



Lorenzo Fedele  
Luciano Furlanetto  
Daniele Saccardi

## Progettare e gestire la manutenzione

**Lorenzo Fedele** è professore di Sicurezza degli Impianti Industriali presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Segretario Generale del Comitato Nazionale Italiano per la Manutenzione (CNIM) e Presidente della Commissione Tecnica Europea CEN TC 319 "Maintenance".

**Luciano Furlanetto** è Presidente della Commissione "Manutenzione" dell'UNI e autore di numerosi volumi in materia di Organizzazione direzionale e di Manutenzione. È stato più volte Presidente dell'Associazione Italiana Manutenzione (AIMAN), presso la quale è attualmente Consigliere.

**Daniele Saccardi** è docente sul tema della Manutenzione e della Logistica nell'ambito di Master universitari e corsi di formazione; su tale materia ha pubblicato numerosi articoli tecnico-scientifici su riviste nazionali e internazionali.

Il tema della manutenzione e, più in particolare, della progettazione e della gestione della manutenzione in ambito industriale, immobiliare, infrastrutturale ecc. riveste un'elevata importanza strategica e sociale, e, negli ultimi anni, ha conosciuto un rapido sviluppo metodologico, di pari passo con lo sviluppo delle tecnologie che si possono adottare.

Il testo rappresenta un manuale sintetico ma esaustivo dell'attuale stato dell'arte in materia di manutenzione e fornisce una panoramica completa e dettagliata delle più recenti applicazioni, supportate dalla trattazione dei concetti fondamentali relativi ai sistemi complessi, alle politiche e alle strategie di manutenzione, agli strumenti di analisi e di simulazione e alle tecnologie diagnostiche.

A conclusione del testo, vengono presentati contributi monografici relativi a significative applicazioni delle tecniche e metodologie di progettazione e gestione della manutenzione descritte nelle parti precedenti. In appendice infine si trova una sezione dedicata alle tecniche e agli strumenti di diagnostica utilizzabili come supporto del processo manutentivo.

ISBN 88-386-6239-8



9 788838 662393

€ 27,00 (IT)  
€ 30,00

INGEGNERIA

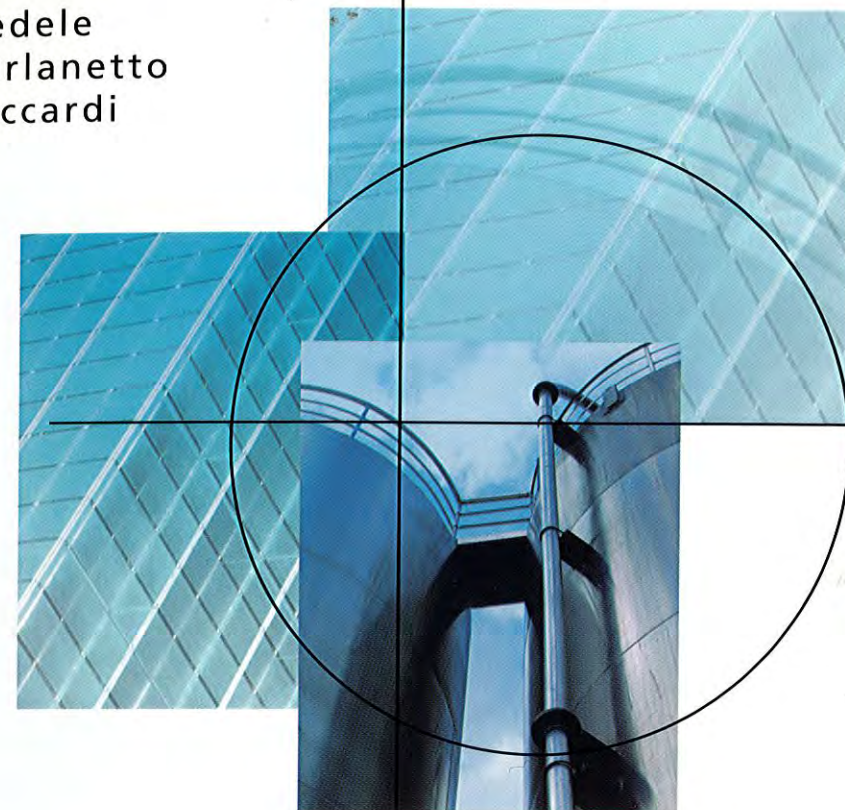
Lorenzo Fedele  
Luciano Furlanetto

Progettare

39-8

aw

Lorenzo Fedele  
Luciano Furlanetto  
Daniele Saccardi



## Progettare e gestire la manutenzione

McGraw-Hill

**collana di istruzione scientifica**  
serie di ingegneria industriale

**Dal catalogo McGraw-Hill:**

C. Forza, F. Salvador, *Configurazione di prodotto*  
K.T. Ulrich, S.D. Eppinger, *Progettazione e sviluppo di prodotto*  
J. Atkinson, *Geotecnica*  
F.P. Beer, E.R. Johnston jr. J.T. De Wolf, *Meccanica dei solidi*  
J.F. Bowles, *Fondazioni progetto e analisi*  
C. Comi, L. Dell'Acqua, *Meccanica delle strutture*  
    1. *Il comportamento dei mezzi continui*  
    2. *Le teorie strutturali e il metodo degli elementi finiti*  
    3. *La valutazione della capacità portante*  
D. Ferretti, Iori, M. Morini, *La stabilità delle strutture*  
P. Foraboschi, *Elementi di tecnica delle costruzioni*  
L. Gambarotta, L. Nunziante, A. Tralli, *Scienza delle costruzioni*  
E. Guagenti Grandori, F. Buccino, E. Garavaglia, G. Novati, *Statica. Introduzione alla dinamica delle strutture*  
R. Lancellotta, J. Calavera, *Fondazioni*  
G. Muscolino, *Dinamica delle strutture*  
R. Nova, *Meccanica delle terre*

*Al lettore*

*La realizzazione di un libro comporta costi variabili (carta, stampa, legatura) e costi fissi, cioè indipendenti dal numero di copie stampate (traduzione, preparazione degli originali, redazione, composizione, impaginazione). I fotocopiatori possono contenere il prezzo perché, oltre a non pagare i diritti d'autore, non hanno costi fissi. Ogni fotocopia, d'altra parte, riducendo il numero di copie vendute dall'editore, aumenta l'incidenza dei costi fissi a copia e costringe l'editore ad aumentare il prezzo; questo, naturalmente, fornisce un ulteriore incentivo a fotocopiare. Se questo circolo vizioso non verrà spezzato, arriveremo al punto in cui gli editori non avranno più convenienza economica a realizzare libri di testo per l'università.*

*In quel momento non ci saranno più neppure le fotocopie.*

*L'editore*

Lorenzo Fedele  
Luciano Furlanetto  
Daniele Saccardi


**Progettare e gestire  
la manutenzione**

**McGraw-Hill**

---

Milano • New York • San Francisco • Washington D.C. • Auckland  
Bogotá • Lisboa • London • Madrid • Mexico City • Montreal  
New Delhi • San Juan • Singapore • Sydney • Tokyo • Toronto

Copyright © 2004 The McGraw-Hill Companies, S.r.l.  
 Publishing Group Italia  
 Via Ripamonti, 89 - 20139 Milano

**McGraw-Hill**   
 A Division of The McGraw-Hill Companies

I diritti di traduzione, di riproduzione, di memorizzazione elettronica e di adattamento totale e parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i paesi.

Nomi e marchi citati nel testo sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

Editor: Paolo Roncoroni  
 Produzione: Donatella Giuliani  
 Realizzazione editoriale: M.T.M., Carugate (MI)  
 Grafica di copertina: G&G  
 Stampa: Arti Grafiche Murelli, Fizzonasco di Pieve Emanuele (MI)

ISBN 88 386 6239-8  
 Printed in Italy  
 123456789AGMLIL987654

<b>Prefazione</b>	<b>XI</b>
<b>Presentazione</b>	<b>XII</b>
<b>PARTE PRIMA</b>	<b>1</b>
<b>1 Complessità dei sistemi</b>	<b>2</b>
<b>2 Elementi di statistica e di teoria della probabilità</b>	<b>13</b>
<b>3 Elementi di teoria della affidabilità, manutenibilità e disponibilità</b>	<b>20</b>
3.1 Cause comuni di guasto	28
<b>4 Affidabilità dei sistemi complessi</b>	<b>29</b>
<b>5 Politiche e strategie di manutenzione</b>	<b>34</b>
5.1 Reliability Centered Maintenance - RCM	38
5.2 Manutenzione produttiva o Total Productive Maintenance - TPM	40
5.3 Strategie manutentive	41
5.3.1 La manutenzione a guasto o correttiva	42
5.3.2 La manutenzione preventiva	42
5.3.3 La manutenzione predittiva	43
5.3.4 La manutenzione migliorativa	45
5.4 La scelta della strategia di manutenzione più opportuna	47
<b>PARTE SECONDA</b>	<b>53</b>
<b>6 Life Cycle Cost Analysis - LCCA</b>	<b>54</b>
6.1 Struttura e riflessioni sugli elementi di costo	58
6.2 La documentazione della LCCA e la terminologia da utilizzare	59
6.3 Le regole della LCCA	62
6.4 Le misure supplementari di una analisi LCC: NS, SIR, AIRR, Payback	65
6.4.1 Net Savings - NS	65

6.4.2	Savings-to-Investment Ratio - SIR	66
6.4.3	Adjusted Internal Rate of Return - AIRR	66
6.4.4	Payback	67
<b>7</b>	<b>Simulazione ingegneristica</b>	<b>70</b>
7.1	Il metodo Monte Carlo	72
7.2	Distribuzioni di probabilità discrete equivalenti a distribuzioni continue	77
7.3	Concetti fondamentali di un algoritmo Monte Carlo	78
7.3.1	I numeri random	78
7.3.2	Il campionamento di numeri random a partire da una qualunque distribuzione di probabilità	79
7.3.3	Integrazione Monte Carlo	80
7.4	Una definizione di affidabilità strutturale	83
7.5	Incremento della efficienza della simulazione	85
7.6	Un semplice esempio di applicazione del metodo Monte Carlo	87
<b>8</b>	<b>FMEA e FMECA</b>	<b>93</b>
8.1	MAGEC	98
8.2	Glossario della FMEA	99
8.3	Diagramma di flusso della FMEA	101
8.4	Analisi delle criticità - Criticality Analysis	102
8.5	Risk Priority Number - RPN	104
8.6	Esempi di modulistica utilizzata nell'analisi FMEA/FMECA	107
8.7	Applicazione della metodologia FMECA	109
<b>9</b>	<b>Modellizzazione a blocchi di affidabilità</b>	<b>112</b>
9.1	Metodologia Reliability Block Diagram	115
9.2	Analisi di sistemi complessi attraverso la modellizzazione RBD	117
9.3	Progettazione orientata alla affidabilità e manutenibilità - DFR e DFM	117
9.3.1	Alcune considerazioni sull'utilizzo di questo metodo	120
9.4	L'integrazione dei modelli RBD con i dati di costo	122
9.5	Una applicazione della metodologia RBD	124
9.6	Prodotti dedicati presenti in commercio	126
9.7	La funzione di annidamento (block nesting)	132
<b>10</b>	<b>Hazard and Operability Analysis - HAZOP</b>	<b>135</b>
10.1	Gli step della metodologia	137
10.2	Glossario della metodologia HAZOP	142
10.3	Alcune regole pratiche	143
<b>11</b>	<b>Fault Tree ed Event Tree analysis</b>	<b>146</b>
11.1	La metodologia FTA	148
11.2	Regole fondamentali da considerare nella costruzione di un FT	150
11.3	Applicazione della FTA nella progettazione e nel successivo esercizio di un sistema	151

11.4	FTA: analisi qualitative e analisi quantitative	152
11.5	L'analisi FT nel processo decisionale	152
11.6	Applicazione della metodologia FTA allo studio di un semplice sistema	154
11.7	Un esempio di FTA utilizzando un tool di calcolo dedicato	156
11.8	Event tree analysis - ETA	159
11.9	Albero delle decisioni	160
11.10	Regole di calcolo	160
<b>12</b>	<b>Catene e processi di Markov</b>	<b>162</b>
12.1	Una semplice applicazione di un processo di Markov	164
12.2	Un ulteriore esempio di calcolo	165
12.3	Criteri di modellizzazione di un sistema attraverso le catene di Markov	167
12.4	Vantaggi e svantaggi connessi all'uso dell'analisi markoviana	170
12.5	Analisi di Markov, standard internazionali	171
12.6	Applicabilità dell'analisi markoviana	172
<b>13</b>	<b>Reti neurali</b>	<b>177</b>
13.1	Il neurone biologico	183
13.2	Il modello del neurone artificiale	185
13.3	Le architetture neurali	188
13.4	I campi di applicazione	191
13.5	Software per reti neurali	194
13.6	Hardware per reti neurali	195
13.7	Creare un controllo neurale	195
<b>14</b>	<b>La logica fuzzy</b>	<b>202</b>
14.1	Gli insiemi fuzzy	204
14.2	Aritmetica fuzzy	205
14.3	Probabilità di eventi fuzzy	207
14.4	La logica fuzzy applicata all'analisi di affidabilità	207
14.5	Un sistema di controllo diagnostico basato sulla logica fuzzy	208
<b>15</b>	<b>Algoritmi genetici</b>	<b>212</b>
15.1	Principi di base degli algoritmi genetici	215
15.2	Principali settori di applicazione degli algoritmi genetici	217
15.3	Operatori principali	217
15.4	Applicazione degli algoritmi genetici alle analisi affidabilistiche	220
15.5	Un esempio di codice	220
<b>16</b>	<b>Sistemi esperti</b>	<b>223</b>
16.1	Caratteristiche generali dei sistemi esperti	223
16.2	Componenti di un sistema esperto	225
16.3	Progettazione di un sistema esperto	226

<b>PARTE TERZA</b>	<b>229</b>
<b>17 Gestione dei piani di manutenzione</b>	<b>230</b>
17.1 La pianificazione dei fabbisogni	232
17.2 Piani di manutenzione	233
17.2.1 Manodopera per mestiere e professionalità	233
17.2.2 Attrezzature di supporto e di ispezione	234
17.3 Giustificazione degli interventi di manutenzione da pianificare	234
17.4 Il budget di manutenzione	236
17.5 Pianificazione e project management	237
17.6 La pianificazione degli approvvigionamenti di materiali tecnici	239
17.7 I conflitti potenziali di una pianificazione	241
17.8 Le tecniche reticolari	241
17.8.1 Project Evaluation and Review Technique - PERT	242
17.8.2 Critical Path Method - CPM	244
17.9 Teoria dei rinnovi	244
<b>18 Criteri e strumenti per la schedulazione</b>	<b>247</b>
18.1 Alcuni problemi di scheduling	249
18.2 Classificazione della schedulazione	250
18.3 Caratterizzazione della schedulazione	251
18.4 Metodi di risoluzione	256
18.5 Principi pratici di schedulazione della manutenzione	257
18.6 Schedulazione della manutenzione: alcune considerazioni	260
18.7 Il ruolo di schedulatore della manutenzione	261
18.8 Un parallelo fra i concetti di schedulazione della produzione e di schedulazione della manutenzione	262
18.9 Software in commercio	263
18.10 Un esempio di applicazione	264
<b>19 Acquisizione dati e monitoraggio delle prestazioni</b>	<b>267</b>
19.1 Alcune definizioni	269
19.2 L'importanza dei dati	271
19.3 Alcune proprietà dei dati	272
19.4 La raccolta dei dati affidabilistici	273
19.5 Sistemi integrati per l'acquisizione dati	274
19.6 Failure Reporting Analysis and Corrective Actions - FRACAS	274
19.6.1 FRACAS: diagramma di flusso	275
19.7 Prospettive nell'acquisizione dati e nel monitoraggio delle prestazioni	279
19.8 Alcune banche dati di riferimento	280
19.9 Supervisory Control And Data Acquisition - SCADA	281
<b>20 Indici di manutenzione</b>	<b>284</b>
20.1 Alcuni esempi di indici	286
20.2 Overall Equipment Effectiveness - OEE	288

20.3 Overall Craft Effectiveness - OCE	290
20.4 Alcune regole pratiche legate alla valutazione degli indici	291
20.5 Considerazioni sull'uso degli indicatori in regime di outsourcing	292

<b>APPENDICE Diagnostica dei sistemi</b>	<b>296</b>
A.1 Il condition monitoring	296
A.1.1 Il monitoraggio visivo	297
A.1.2 Il monitoraggio della performance	297
A.1.3 Il monitoraggio delle vibrazioni e del rumore	298
A.1.4 Il monitoraggio del particolato da usura (wear debris)	298
A.1.5 Il monitoraggio del calore	299
A.2 L'analisi delle vibrazioni e dell'olio lubrificante	300
A.2.1 L'analisi delle vibrazioni	300
A.2.2 L'analisi dell'olio lubrificante	308
A.3 I sistemi informatici a supporto del CM	339
A.3.1 Gli sviluppi futuri nel condition monitoring	341

## CASI DI STUDIO 343

<b>Ottimizzazione della lista delle parti di ricambio di una turbina a gas mediante la metodologia ACM (Availability Centered Maintenance)</b>	<b>344</b>
Introduzione	344
Acronimi	345
Comparazione tra RCM e ACM	345
Ottimizzazione della lista ricambi	346
Analisi dei P&I e delle specifiche	347
Analisi delle condizioni operative della turbina a gas	347
Raccolta dati ed analisi di affidabilità	347
Definizione del programma di maintainability	349
Costruzione dell'RBD	351
Simulazione Monte Carlo e Availability Importance Ranking	351
Definizione della lista ottimale ricambi	351
L'indice di Availability Importance	351
Risultati	352

<b>Ingest Facility - La gestione informatizzata del "global service" di un patrimonio immobiliare</b>	<b>354</b>
1. Contratto	355
1.1 Norme contrattuali	355
2. Organizzazione del servizio	356
2.1 I servizi	356
2.2 Struttura organizzativa	356
2.3 Strumenti tecnologici di gestione dei servizi	357
2.4 Piano di qualità e procedure gestionali	359
2.5 Sistema di reporting delle attività	359

3. Attività operative	361
3.1 Gestione dell'utente (attività a chiamata o a evento)	361
3.2 Gestione delle manutenzioni	361
3.3 Gestione delle manutenzioni straordinarie e dei progetti	363
3.4 Gestione delle attività specialistiche	364
3.5 Gestione degli spazi	365
<b>Il progetto DOMUS per il Bridge Management System della rete ferroviaria italiana</b>	<b>366</b>
Problematiche di gestione della manutenzione alle opere d'arte della rete ferroviaria italiana	366
Aspetti metodologici specifici del progetto DOMUS	369
<b>Indice analitico</b>	<b>374</b>

# Prefazione

## Manutenzione e progresso

La manutenzione di un sistema complesso di oggetti (civile, industriale, infrastrutturale, tecnologico, misto) richiede l'attuazione di azioni a carattere esecutivo, operativo (ovvero, di controllo dell'esecuzione) e gestionale, finalizzate ad assicurare che l'evoluzione della vita del sistema in esame sia coerente con le aspettative del suo progettista. Tali azioni, nel loro complesso, perseguono obiettivi diversi, spesso contemporanei, di sicurezza, ambientali, economici e sociali, che possono essere perseguiti solamente alla luce di una progettazione sistematica e basata su metodologie rigorose.

La disciplina manutentiva-conservativa si pone, in conseguenza, come un'area di studi, ricerche e prassi operative e manageriali di centrale importanza, in un mondo nel quale appare sempre più evidente la necessità di pianificare e mantenere sotto controllo le attività dell'uomo, in una prospettiva di sviluppo sostenibile nell'ambito di un volume di controllo ben definito e circoscritto.

Il Comitato Nazionale Italiano per la Manutenzione (CNIM) già dal 1990, quando la Manutenzione in Italia era vista prevalentemente come un complesso di attività a carattere meramente esecutivo e – spesso – unicamente riparative, rappresenta oggi l'unico organismo culturale in grado di creare le condizioni necessarie per l'incontro di tutti i protagonisti coinvolti (istituzioni pubbliche, enti, imprese, università e centri di ricerca) e la promozione di adeguate iniziative politico-culturali e di ricerca applicata, anche grazie all'ampia rappresentanza garantita nel suo consiglio direttivo. Al riguardo, avendo ricevuto il riconoscimento del mondo istituzionale, che lo ha indicato come l'Ente che meglio in Italia può occuparsi di coordinare studi e ricerche nel campo della Manutenzione (Decreto del Ministero dell'Industria del 16/12/99), il CNIM esplica azioni diverse, con la collaborazione di esponenti del mondo imprenditoriale, istituzionale, universitario, normativo ecc., in particolare sui temi di maggiore attualità, quali, *l'Ingegneria di Manutenzione*, *la Contrattualistica di Manutenzione*, *la Formazione per la Manutenzione*, *la Qualità nei Servizi*, *la Manutenzione nella Sanità*, *la Manutenzione nelle Infrastrutture*, *la Manutenzione delle Opere d'Arte*. ecc.

*Prof. Ing. Aurelio Misiti\**

\* Commissario Straordinario Grandi Opere di Basilicata, Puglia, Calabria e Sicilia. Presidente Onorario del CNIM.

# Presentazione

---

## I servizi di Manutenzione: dal progetto all'esecuzione

Le attività manutentive presentano un'ampia valenza economica, poiché interessano una delle tre fasi di vita (costruzione, utilizzo, conservazione) di qualsiasi bene strumentale, qualunque sia il campo d'impiego nella produzione di beni e servizi, la fase, appunto, della conservazione di un bene, ossia del mantenimento della sua funzionalità e della sua efficienza. Questa valenza economica è ulteriormente accentuata quando - come in questo periodo - il Paese attraversa una fase di limitata espansione del sistema produttivo, presentandosi quindi non come un Paese in costruzione, ma, in larga misura, come un Paese "costruito", per il quale, dunque, la conservazione dei mezzi di produzione e delle infrastrutture assume particolare rilievo.

Inoltre, le attività di manutenzione presentano un alto valore aggiunto e un basso investimento specifico, il che attribuisce loro un particolare interesse nella creazione di posti di lavoro, così come il fatto che esse derivano da esigenze di tipo permanente.

Il numero di imprese che operano nel mercato dei servizi di manutenzione è in crescita per il manifestarsi di una tendenza alla terziarizzazione, esclusi solo i settori nei quali l'attività manutentiva deve adattarsi a esigenze prioritarie di produzione. Sempre più frequentemente, inoltre, si assiste all'offerta di servizi manutentivi compositi, con piena responsabilità dei risultati da parte dell'assuntore (*global service*), o all'offerta di una pluralità di servizi in ambito topograficamente circoscritto (*facility management*). In effetti la terziarizzazione fa sì che l'assuntore dei servizi, svolti per più aziende, possa realizzare importanti economie di scala, migliorare il grado di utilizzazione del personale e ottenere maggiore uniformità del livello di occupazione.

Questo stato di cose determina ampie potenzialità, che tuttavia stentano talvolta a emergere per vari ordini di motivi, che questo manuale tecnico può contribuire a porre in evidenza e superare.

Il volume, infatti, che è frutto dell'esperienza degli studi e delle ricerche applicate compiute dagli Autori, esprime concetti generali che dovrebbero costituire non solo un'utile base operativa, ma anche motivo di stimolo e riflessione sugli importanti benefici che la diffusione della cultura manutentiva e preventiva può apportare, in vista di obiettivi socio-economici, di sicurezza e ambientali.

*Dott. Ing. Marcello Mauro\**

---

\* Presidente della I<sup>a</sup> Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Presidente del CNIM.

## PARTE PRIMA

---



# 1

## Complessità dei sistemi

Un sistema è un insieme di elementi in stretto rapporto fra loro, destinati a determinati scopi e finalità.

L'Ingegneria dei sistemi ha per oggetto la realizzazione degli obiettivi globali dei sistemi attraverso le attività connesse con la programmazione, il progetto, la costruzione, l'esercizio del sistema e, inoltre, il mantenimento della sua efficienza, il suo ampliamento per soddisfare nuove esigenze, il suo miglioramento e aggiornamento [1].

Secondo una visione più generale e, forse, più moderna, l'Ingegneria dei sistemi è il processo che identifica le caratteristiche tecniche e le regole operative di quel sistema che meglio persegue gli obiettivi richiesti [2]. L'Ingegneria dei sistemi, in conseguenza, riguarda coloro che devono fissare gli obiettivi generali dei sistemi, coloro che devono individuare le tecnologie necessarie ecc. (Figura 1.1).

Nel concetto di sistema l'attenzione è posta sulla considerazione congiunta di una collezione di elementi e di un insieme di relazioni fra essi intercorrenti. Il termine sistema denota infatti un insieme di elementi interdipendenti, suscettibili di assumere, in uno stesso istante o in istanti successivi, stati diversi. Il termine stato di un sistema in un certo istante denota l'insieme delle proprietà rilevanti di tutti gli elementi del sistema in tale istante.

L'aggettivo "rilevante" fa chiaramente intendere come l'idea di sistema non afferisca intrinsecamente alla situazione che si vuole rappresentare, ma a una sua concettualizzazione che privilegia alcune delle innumerevoli proprietà attribuibili agli elementi del sistema.

Il concetto di sistema [3], ormai di impiego abituale, ben si applica alla impostazione di problemi tecnici di diversa natura ed è di grande utilità se utilizzato insieme ad alcuni concetti correlati come quello di ambiente, di evento ecc.

Innanzitutto [4], si osserva che si può avere a che fare con *sistemi astratti*, ovvero con un sistema in cui tutti gli elementi costitutivi sono concetti, come i sistemi linguistici, i sistemi filosofici ecc. In tali sistemi, le relazioni fra gli elementi costitutivi sono rappresentate da assiomi, postulati ecc. ed essi sono oggetto di studio delle cosiddette scienze formali.

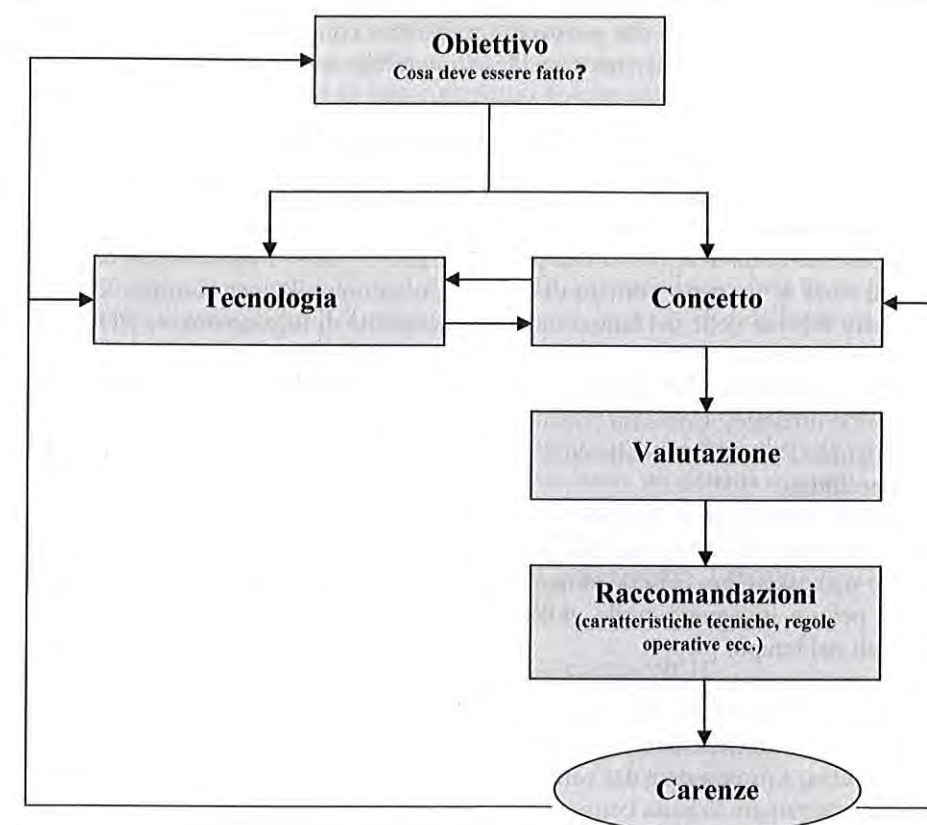


Figura 1.1 Ingegneria dei sistemi: schema concettuale del processo caratteristico.

Nei *sistemi concreti*, viceversa, almeno due degli elementi costitutivi sono oggetti concreti e le relazioni fra essi sono caratterizzabili su base empirica. Nell'ambito di questa trattazione si farà sempre riferimento ai sistemi concreti, anche quando ciò non verrà esplicitamente dichiarato. I sistemi concreti sono oggetto di studio delle cosiddette scienze non formali.

L'ambiente di un sistema è rappresentato dall'insieme degli elementi che, non facendo parte del sistema stesso, con un loro cambiamento possono indurre cambiamenti di stato in esso. Elementi esterni al sistema, che sono in grado di influenzare proprietà irrilevanti del sistema, non si considerano fare parte del suo ambiente.

Un sistema si dice *chiuso* quando esso è da considerarsi privo di ambiente. Al contrario si dice *aperto* un sistema che deve essere considerato unitamente al suo ambiente. È soprattutto di sistemi aperti che ci si occupa nell'ambito delle scienze ingegneristiche.

L'evento di un sistema rappresenta altresì la circostanza in cui si ha il cambiamento di una o più proprietà strutturali del sistema stesso in un arco di tempo speci-

ficato. Per esempio, l'evento relativo al sistema di illuminazione di un edificio potrebbe essere rappresentato dal guasto di un fusibile; corrispondentemente, l'evento relativo all'ambiente del sistema considerato potrebbe essere rappresentato dal sopraggiungere della notte.

Si parla di sistema *statico*, o di sistema *a uno stato*, quando si ha a che fare con una collezione di elementi che non dà luogo a eventi di qualsivoglia natura. Un tavolo, per esempio, ovvero l'insieme di un piano e di quattro gambe di appoggio, può essere riguardato come un sistema statico.

Un sistema *dinamico*, o *multistato*, al contrario è quello caratterizzato da mutamenti di stato in un certo periodo di tempo. Un'automobile, per esempio, che può modificare diverse volte nel tempo molte sue proprietà di funzionamento rilevanti, è un sistema dinamico.

Ancora si definisce *omeostatico* un sistema i cui elementi costitutivi e il cui ambiente sono dinamici. Una casa che mantiene costante nel tempo la propria temperatura malgrado l'evoluzione delle condizioni climatiche esterne è un esempio di sistema omeostatico.

Occorre anche notare che uno stesso sistema può essere riguardato come statico ovvero dinamico in relazione alla diversa prospettiva di ciascuno: una casa, per esempio può essere per ciascun abitante di essa un sistema statico, ma un sistema dinamico per un ingegnere civile, interessato alle modificazioni delle sue proprietà strutturali nel tempo.

Una reazione è un particolare evento di un sistema o del suo ambiente determinato in maniera certa da un altro evento. Lo stato assunto così dal sistema rappresenta una circostanza determinata da un evento sufficiente ma non necessario, nel senso che il sistema, a prescindere dal verificarsi di una particolare sollecitazione, potrebbe comunque assumere lo stato conseguente.

La risposta di un sistema o del suo ambiente, viceversa, rappresenta l'evento, conseguente a un altro (stimolo), necessario ma non sufficiente al suo verificarsi.

L'atto di un sistema, ancora, è un evento di un sistema per il verificarsi del quale non è richiesto alcun mutamento nell'ambiente del sistema. Gli atti, in conseguenza, sono eventi autonomamente determinati dal sistema.

In base alle definizioni precedenti, i sistemi possono essere *reattivi*, *risponditori* o *autonomi (attivi)*; spesso sono una combinazione di queste tre tipologie.

Il comportamento di un sistema è individuato da quegli eventi che ne determinano altri per esso o per il suo ambiente. Le reazioni, le risposte e gli atti di cui si è parlato, dunque, rappresentano essi stessi il comportamento di un certo sistema. Essi sono eventi i cui antecedenti sono di interesse. Il comportamento di un sistema, altresì, è valutato in relazione all'interesse per le conseguenze che si possono avere su di esso e nell'ambiente in cui si trova.

Sulla base dell'analisi del comportamento di un sistema, dunque, è possibile classificare ulteriormente i sistemi (Tabella 1.1).

Si parla di sistema a uno stato quando si ha a che fare con un sistema che può reagire in un solo modo a qualunque sollecitazione interna o esterna, per il quale, cioè, reazioni differenti producono tutte le medesime conseguenze sullo stato finale assunto dallo stesso. Un sistema di tal genere non può rispondere; esso può solo reagire, secondo le regole anticipate, alle diverse sollecitazioni interne o esterne a cui è

soggetto. Sono sistemi a uno stato, per esempio, tutti quelli che funzionano per garantire il mantenimento di un certo stato: termostati, umidostati ecc. Tali sistemi devono necessariamente essere adattivi, ma, al contrario dei sistemi a obiettivo, non sono in grado di alcun tipo di apprendimento poiché essi non possono "scegliere" il comportamento da assumere.

Un sistema *a obiettivo*, altresì, è in grado di rispondere diversamente alle sollecitazioni interne o esterne in una o più differenti modalità, fintanto che un certo stato, che rappresenta appunto il suo obiettivo, non è stato raggiunto, a parità di ambiente. Quindi un tale sistema ha la possibilità di scegliere il comportamento più appropriato alle sue esigenze ed esso si comporta da risponditore, non da reattivo. Se tale sistema è anche dotato di memoria, esso sarà in grado di migliorare la propria efficienza nel raggiungere l'obiettivo.

Un sistema *multiobiettivo*, ancora, è un sistema a obiettivo in grado di perseguire il raggiungimento di più obiettivi, essendo l'obiettivo determinato dallo stato iniziale del sistema stesso. Se un sistema siffatto è caratterizzato dal fatto che i diversi obiettivi hanno una o più proprietà in comune, si dice essere un sistema *a scopo*.

Un sistema, infine, si dice essere *autodeterminista* se può modificare i suoi obiettivi a parità di condizioni e se li seleziona individuando i modi per ottenerli. Un sistema siffatto, in sostanza, mostra volontà e, di conseguenza, l'esempio più ragionevole di esso è rappresentato dall'elemento umano.

Tabella 1.1 Classificazione dei sistemi in base al comportamento [4]

Tipo di sistema	Comportamento	Esito del comportamento
A uno stato	variabile ma determinato (reattivo)	prefissato
A obiettivo	variabile e a scelta (risponditore)	prefissato
Multiobiettivo	variabile e a scelta	variabile ma predeterminato
A scopo	variabile e a scelta	variabile ma predeterminato
Autodeterminista	variabile e a scelta	variabile e a scelta

In generale, i sistemi possono essere caratterizzati da una varietà più elevata di comportamenti e di stati rispetto ai loro elementi componenti, i quali possono essere sistemi essi stessi in una prospettiva gerarchica e relativa. Inoltre, dalla unione di più sistemi, come elementi del sistema neocostituito, è possibile generare sistemi caratterizzati da un comportamento più evoluto, in relazione a quelli principali poc'anzi descritti. Analogamente, è possibile assistere a comportamenti esattamente opposti, ovvero di riduzione di stati conseguibili e di un comportamento meno evoluto.

Si parla, evidentemente, nel primo caso di incremento della varietà, nel secondo, di riduzione della stessa rispetto agli elementi componenti. Un sistema di elementi che, comunque vengano presi, nel loro insieme non incrementano né decrementano la varietà consiste senz'altro di elementi identici che possono essere impiegati uno alla volta, oppure di elementi per i quali azioni simili da parte di gruppi di essi sono equivalenti alle azioni svolte da un singolo elemento.

Per spiegare i concetti di adattamento e apprendimento, relativamente a un sistema di elementi può essere utile introdurre quello di funzione di un sistema. Per *funzione di un sistema* deve intendersi la capacità di un sistema di produrre un ben determinato risultato attraverso diversi comportamenti possibili.

Se si indicano con  $C_i (1 \leq i \leq m)$  i possibili atti di un sistema in un assegnato ambiente, con  $P_i$  le probabilità sussistenti che il sistema ponga in essere uno specifico atto<sup>1</sup> e con  $E_{ij}$  la probabilità che il sistema ponga in essere l' $i$ -esimo atto e consegua così il  $j$ -esimo risultato, si può introdurre l'efficienza del sistema che abbia la funzione di produrre il seguente risultato:

$$O_j = \sum_i P_i E_{ij}$$

Un sistema si definisce dunque *adattivo* se, quando si ha un mutamento nell'ambiente e/o nel suo stato interno che riduce la sua efficienza rispetto a uno o più risultati che dovrebbe raggiungere, esso reagisce in modo da modificare il suo stato e/o quello dell'ambiente così da compensare la perdita di efficienza. Ancora si parla di apprendimento di un sistema quando questo, non intervenendo modificazioni di alcun genere, è in grado di migliorare la propria efficienza nel raggiungere un certo risultato: in tal caso si rende indispensabile che il sistema sia in grado di modificare il proprio comportamento e che, inoltre, sia dotato di memoria.

Fra i vari tipi di sistema, uno particolarmente ricorrente nelle questioni tecnico-ingegneristiche è quello cosiddetto *a ingresso*, ovvero un sistema che ricorre nei casi in cui i soli oggetti di interesse, indipendentemente dalla configurazione interna del sistema, sono appunto gli ingressi (ossia gli stati che condizionano l'evoluzione del sistema e che possono essere a esso imposti) e le uscite (ossia gli stati di uno o più elementi del sistema stesso, i cui valori sono suscettibili di agire, in qualità di entrate sull'ambiente esterno e/o su altri sistemi).

Il concetto di sistema a ingresso è importante anche ai fini della concezione di accoppiamenti fra vari sistemi, onde potere aggregare sistemi semplici in sistemi più complessi, o eventualmente, all'opposto, disaggregare sistemi complessi in sistemi più semplici.

La concezione sistemica ben si applica alle problematiche affidabilistiche, gestionali e manutentive.

Le problematiche manutentive, in effetti, sia dal punto di vista degli oggetti a cui si applicano, sia dal punto di vista organizzativo e aziendale, richiedono la considerazione di numerosi elementi (un certo numero di addetti, gli impianti, gli immobili ecc.) fra i quali intercorrono relazioni di vario tipo (relazioni di comando, relazioni basate sull'informazione ecc.) elementi appunto sui quali è fondato il concetto stesso di sistema.

Grande importanza nella formulazione e nello studio dei problemi di progettazione e di gestione per la manutenzione hanno il concetto di varietà di un sistema e la nozione di modello.

La *varietà* (o *molteplicità*) di un sistema è la grandezza che esprime il numero dei suoi stati possibili; essa è, di norma, assai elevata, ma l'esperienza mostra abitualmente un gran divario fra il numero di stati astrattamente possibili e il numero di quelli concretamente realizzati: la selezione di questi ultimi si configura come regolazione del sistema, ed è realizzata da regolatori fisici e da operatori umani.

<sup>1</sup> Se gli atti sono mutuamente esclusivi e almeno uno di essi si verifica, deve valere la seguente ben nota proprietà statistica, detta di chiusura  $\sum_i P_i = 1$ .

Un modello è invece un processo artificiale che ne rappresenta un altro, naturale o artificiale. Si può in effetti dire che per un operatore  $O$  un oggetto  $M$  è un modello di un oggetto  $A$ , se  $O$  può utilizzare  $M$  per rispondere ai quesiti che lo interessano riguardo ad  $A$ . Anche l'idea di modello ha importanza essenziale, visto che l'intelligibilità dei fatti e l'amplificazione del ragionamento portano in via affatto generale all'utilizzazione di modelli.

Si è accennato alla importanza della nozione di varietà nelle problematiche gestionali e di manutenzione. Tale importanza deriva da una condizione necessaria alla quale il controllo e la gestione di qualunque sistema è soggetto, condizione nota come *legge di Ashby* o *della varietà necessaria*.

Si considerino infatti le possibilità che un centro di controllo  $C$  ha di far assumere un determinato stato a un qualsiasi sistema  $S$ , sul cui ingresso agiscano sia i comandi di  $C$  che le perturbazioni provenienti dall'ambiente  $D$ , e si esprimano le varietà di  $S$ ,  $C$ ,  $D$  (indicate con  $V_S$ ,  $V_C$ ,  $V_D$ ) in termini logaritmici, ossia mediante i logaritmi in base 2 dei numeri dei rispettivi stati possibili. La legge di Ashby afferma che in tale caso la minima varietà  $V_S$  del sistema (quando risulta perciò massimo il grado di controllo su  $S$ ) è non inferiore alla differenza fra  $V_D$  e  $V_C$ : in altri termini che per far assumere a  $S$  uno stato ben preciso determinato da  $C$ , occorre che  $C$  esprima una varietà almeno pari a quella dell'ambiente  $D$ . Soltanto la molteplicità di  $C$  può dunque assorbire la molteplicità proveniente da  $D$ :

$$\min V_S \geq V_D - V_C \quad (1.1)$$

L'azione gestionale, proprio perché volta a esercitare un controllo sul sistema produttivo affinché raggiunga i suoi obiettivi, deve quindi essere attenta alla legge di Ashby – ciò che non sempre avviene – considerata l'assoluta ineludibilità della condizione da essa espressa, condizione che per giunta ha portata assolutamente generale.

La visione sistemistica suggerita dalla Ingegneria dei sistemi consente di affrontare in modo generale – ma non generico – molti problemi tecnici e, in particolare, quelli gestionali e manutentivi. La considerazione degli oggetti di manutenzione come di sistemi gerarchici, infatti, permette di applicare i criteri e le metodologie manutentive, sia in fase di progettazione sia in fase di gestione, in modo sostanzialmente invariato a prescindere dal particolare tipo di sistema (impianto industriale, impianto tecnologico, apparecchiatura, infrastruttura, struttura).

La manutenzione di un sistema complesso di oggetti (civile, industriale, infrastrutturale, tecnologico) richiede l'attuazione di azioni a carattere esecutivo, operativo (ovvero, di controllo dell'esecuzione) e gestionale, finalizzate ad assicurare che l'evoluzione della vita del sistema in esame sia coerente con le aspettative del suo progettista. Tali azioni, nel loro complesso, perseguono obiettivi diversi, spesso contemporanei, di sicurezza, ambientali, economici e sociali. La disciplina manutentiva-conservativa si pone, in conseguenza, come un'area di studi, ricerche e prassi operative e manageriali di centrale importanza, in un mondo nel quale appare sempre più evidente la necessità di pianificare e mantenere sotto controllo le attività dell'uomo, in una prospettiva di sviluppo sostenibile nell'ambito di un volume di controllo ben definito e circoscritto.

La gestione e la manutenzione, come si anticipava, si riferiscono a sistemi complessi organizzati. La complessità ha i caratteri del molteplice, del ricorsivo, dell'incerto, dell'instabile: essa attiene anche al dominio dell'informazione. La complessità, disciplina studiata nell'ambito della Ingegneria dei sistemi ma anche proprietà e grandezza caratteristica di ogni sistema, cresce all'aumentare del numero degli stati possibili, di modo che la molteplicità (o l'informazione richiesta per individuare ogni stato) può essere assunta, in prima istanza, come misura della complessità del sistema. La complessità, peraltro, non deve pensarsi come proprietà intrinseca del sistema stesso, ma piuttosto come legata agli elementi che nella sua descrizione saranno stati scelti come primitivi, ossia legata al codice utilizzato. È del resto nell'esperienza comune che situazioni all'apparenza complesse si semplificano talora grandemente scegliendo nuove primitive e una descrizione diversa.

I modi per definire la complessità come grandezza tipica di un sistema sono molteplici. Più che descrivere la complessità come grandezza assoluta, infatti, sembra più agevole ricorrere a definizioni relative, in relazione alle diverse proprietà che concorrono a rendere complesso un sistema. La complessità di un sistema cresce, in generale, con la numerosità degli elementi componenti, con la molteplicità delle relazioni sussistenti e con la molteplicità degli stati che il sistema può assumere. Può anche essere presa in considerazione una definizione della complessità collegata alle proprietà linguistiche del sistema: tanto più è difficile descrivere un sistema, il suo comportamento e i suoi obiettivi, tanto più il sistema può essere considerato complesso.

In un celebre articolo del 1948, lo scienziato americano Warren Weaver offrì una stimolante interpretazione della complessità [5]. Egli propose una classificazione molto generale dei problemi oggetto di studio delle Scienze, anche in relazione all'evoluzione storica di queste. Secondo la sua visione, esisterebbero almeno tre classi di problemi:

- i problemi relativi alla semplicità, ovvero i problemi, in larga parte a due variabili, oggetto di studio delle scienze prima del '900;
- i problemi relativi alla complessità disorganizzata, oggetto di interesse dal 1900 in avanti, in cui il numero delle variabili in gioco è spesso estremamente elevato e ciascuna di esse ha un andamento molto poco prevedibile o, addirittura, sconosciuto; tuttavia, malgrado questa disorganizzazione, i sistemi nella loro complessità sono caratterizzati da un certo ordine medio che ne rende possibile l'analisi, per esempio per mezzo degli strumenti messi a disposizione dalla Statistica;
- i problemi relativi alla complessità organizzata, di più recente introduzione, sarebbero, invece, relativi a tutte le situazioni non comprese nelle due precedenti categorie e per le quali si renderebbe necessaria l'introduzione di nuovi strumenti di analisi, più efficaci rispetto a quelli statistici: secondo Weaver, la scienza si sarebbe dovuta impegnare negli anni successivi a quelli in cui egli scriveva, proprio per mettere a punto metodologie innovative di analisi dei problemi complessi.

L'architettura della complessità è stata efficacemente analizzata da H.A. Simon [6], il quale, fra l'altro, osserva che in gran parte i sistemi complessi hanno struttura gerarchica e sono quasi scomponibili. Con l'aggettivo gerarchico si vuole indicare un sistema formato da sottosistemi, che a loro volta sono formati da sottosistemi gerar-

chici, e così via. Tale proprietà appare di grande utilità nelle applicazioni tecniche perché consente, mantenendo l'approccio generalista a cui si è già fatto cenno, di scegliere il livello di dettaglio più appropriato alle esigenze del caso. La quasi scomponibilità consiste, invece, nella presenza di relazioni forti soltanto fra gli elementi di ciascun sottosistema e di interazioni deboli fra i diversi sottosistemi; ciò si traduce nella presenza di forme stabili intermedie, poste fra il sistema complessivo e gli elementi costitutivi del sistema, elementi intesi non tanto come parti ultime del sistema considerato, quanto come portatori dei limiti prescelti di scomponibilità nella concezione adottata. La presenza di forme stabili intermedie ha un determinante effetto catalizzatore nella formazione dei sistemi complessi.

La complessità è una nota dominante del nostro tempo, e deve essere presa correttamente in considerazione. Spesso infatti si reagisce a essa in modo distorto, e cioè con ingiustificate semplificazioni, basate sia sulla parcellizzazione della realtà sia su azioni riduzioniste, che attribuiscono una stessa identità a ciò che dovrebbe essere mantenuto distinto.

Agli interventi che si possono mettere in atto per modificare la complessità di un sistema è legato un indice di estrema importanza pratica: la *ridondanza*. La ridondanza si esprime in termini di informazione, prendendo appunto in considerazione l'informazione  $H_m$  occorrente per descrivere un sistema nel quale tutti gli elementi siano indipendenti ed equiprobabili (misura quindi della diversità potenziale del sistema), e la quantità di informazione  $H$  occorrente per descrivere lo stesso sistema in presenza di determinati vincoli. La ridondanza è appunto definita dal seguente rapporto:

$$R = \frac{H_m - H}{H_m} \quad (1.2)$$

In qualsiasi sistema – come si è detto – la selezione degli stati concretamente realizzati fra quelli – di norma assai più numerosi – astrattamente possibili, si configura come regolazione del sistema stesso, ossia come perdita di varietà prodotta da vincoli aggiuntivi introdotti per il tramite delle variabili d'azione. Se i valori delle variabili d'azione sono scelti in modo da mantenere quelli delle variabili essenziali entro un campo di appartenenza considerato accettabile, o se riducono a uno la varietà, si parla di regolazione su bersaglio del sistema, intendendo la regolazione essenzialmente in termini di permanenza. Si parla invece di controllo quando si aggiunge alla regolazione la modifica nel tempo dello stato in cui si vuole portare il sistema.

Quando a un sistema si sovrappone una gerarchia di sistemi di controllo, si conferisce al sistema stesso una organizzazione. In quest'ultima il controllo domina la regolazione e ogni centro di controllo governa le variabili d'azione dei centri di controllo che gli sono subordinati.

La coesistenza di due livelli di stabilità e di due ritmi diversi di intervento su un sistema, propri rispettivamente della regolazione (pilotata appunto dalle variabili regolate) e del controllo (pilotato dalle variabili essenziali e agente sul regolatore) contraddistingue i sistemi *ultrastabili*. Tali sistemi ricorrono molto frequentemente e realizzano uno dei meccanismi di base, che rende appunto presenti due ordini di interventi correttivi, aventi frequenza diversa, una frequenza più elevata per interventi localizzati e circoscritti, e una frequenza più bassa per interventi di maggiore am-

piezza; proprio la diversità dei predetti meccanismi rende possibile la coesistenza di tipi di intervento attuati con mezzi e persone diverse, sintonizzati perciò su modalità di comportamento diverse.

D'altra parte, l'esistenza di più livelli gerarchici nei sistemi ha proprio nei motivi ora visti la sua ragion d'essere, nel fatto, cioè, che interventi con ritmi diversi amplificano il controllo e favoriscono la stabilità: gli interventi a più alto livello (e a più bassa frequenza) lasciano il tempo sufficiente affinché le correzioni a livello più basso (e a più alta frequenza) possano avvenire, e il sistema possa reagire e riequilibrarsi; se però con le correzioni circoscritte al basso livello non si riesce a mantenere il sistema sotto controllo, gli interventi più ampi modificano il suo modo stesso di funzionare, e stabiliscono le condizioni affinché gli interventi del primo tipo possano esercitarsi con modalità più efficaci.

Il compito centrale delle scienze naturali è quello di rendere comunemente comprensibile quel che appare incomprensibile o non comune, quello di mostrare che la complessità, vista in un'ottica corretta, è sostanzialmente una sovrastruttura, una maschera della semplicità: il compito delle scienze naturali, dunque, è quello di trovare i percorsi nascosti nel caos apparente.

Come le scienze naturali si occupano della conoscenza degli oggetti e dei fenomeni naturali, così ci si potrebbe chiedere se possano esistere scienze artificiali che si occupino di quanto di artificiale ci circonda. Innanzi tutto si rende necessario precisare l'aggettivo artificiale. Spesse volte il termine è utilizzato con un'accezione non positiva, o per intendere qualcosa di non prodotto dalla natura, qualcosa di fabbricato dall'uomo. Talvolta si fa distinzione fra ciò che è artificiale e ciò che è sintetico, anche se, in realtà, utilizzando entrambi i termini ci si accosta al mondo dell'Ingegneria.

L'Ingegneria si preoccupa di come gli oggetti dovrebbero essere fatti per perseguire determinati scopi e, conseguentemente, si rende necessario sintetizzare e/o realizzare artificialmente tali oggetti. In sintesi si può affermare che gli oggetti artificiali, rispetto a quelli naturali:

- a) sono sintetizzati da esseri umani;
- b) possono imitare apparenze naturali pur non riuscendo a coincidere del tutto con gli oggetti naturali;
- c) possono essere caratterizzati relativamente a modi di funzionare, a obiettivi che devono perseguire, a capacità di adattamento che li devono contraddistinguere;
- d) sono spesso oggetto di descrizione, in particolar modo nelle fasi della loro progettazione.

In sostanza si può affermare che i sistemi artificiali imitano i sistemi naturali e che tale imitazione acquista il significato, assai importante in molte applicazioni tecniche, di simulazione. La simulazione che oggi è resa applicabile in moltissimi casi grazie allo sviluppo di numerose tecniche e, soprattutto, grazie alla diffusione della elaborazione automatica dei dati a basso costo (personal computer), si pone infatti, come strumento per investigare, quando si conoscono le leggi che governano i fenomeni e per cercare di scoprire le leggi stesse che regolano i fenomeni, quando queste non sono note. La simulazione è dunque un eccellente strumento di ricerca e studio.

I sistemi artificiali che si possono prendere in considerazione sono, naturalmente, molteplici. Fra questi, per esempio, i sistemi economici, quelli sociali, organizzativi aziendali, umani, tecnici in genere ecc. Ciascuno di essi può essere di interesse nel campo della manutenzione e, in particolare, i sistemi organizzativi aziendali, per quanto attiene alle questioni organizzative delle imprese di manutenzione e delle aree aziendali dedite alla manutenzione, quelli tecnici in quanto oggetto delle azioni gestionali e manutentive per assicurare un loro comportamento idoneo al raggiungimento di determinati obiettivi operativi. Nel considerare la complessità di tali sistemi, oltre a fare riferimento alle definizioni che di questa grandezza si possono dare e delle quali si è data anticipazione, sembra utile anche tenere conto di alcuni punti di vista che, sulla complessità, si sono succeduti negli anni.

Uno dei primi concetti, tra quelli in qualche modo collegati alla complessità, è stato, subito dopo la Prima guerra mondiale, quello di *olismo*, ovvero di quella proprietà del sistema naturale tale che la somma delle sue parti elementari non rappresenti il sistema stesso nella sua interezza.

Nel secondo dopo guerra l'introduzione della cosiddetta *cibernetica*, ovvero di quella teoria avente a che fare con meccanismi asserviti, con modalità di gestione delle informazioni e con la possibilità di elaborare in modo automatico i dati di funzionamento di tali apparecchiature, rappresenta – più o meno direttamente – un nuovo modo di vedere la complessità.

È in questo momento che vengono anche avanzate diverse teorie finalizzate a favorire lo sviluppo di un'unica *teoria generale dei sistemi*, che permetta di astrarre dalle proprietà generali e generalmente valide per sistemi anche molto diversi fra loro (fisici, biologici, sociali ecc.). Non sono da sottovalutare, in questa fase, le obiettive difficoltà sussistenti nell'ipotizzare che sistemi anche molto diversi fra di loro possano avere alcune proprietà in comune. Il ricorso alla metafora e alle analogie apparve di grande importanza a questo scopo, purché si sviluppasse – contemporaneamente – anche la capacità di distinguere le metafore e le analogie, per così dire, superficiali da quelle effettivamente significative.

Se poteva apparire un obiettivo troppo ambizioso quello di elaborare una teoria generale dei sistemi, tuttavia, appariva almeno percorribile la ricerca di proprietà comuni a sistemi complessi differenti. La complessità, appunto, si proponeva quale raggruppamento di proprietà e caratteristiche che, in qualche modo, potevano essere messe in comune fra diversi sistemi. Ben presto gli studi sulla complessità ebbero una importante evoluzione, anche grazie alla loro applicazione a sistemi molto vicini alla vita quotidiana, come i sistemi naturali, i sistemi sociali ecc. Fu così che si diffusero la *teoria delle catastrofi*, la *teoria del caos*, la *teoria degli algoritmi genetici* e la *teoria sui meccanismi riproduttivi cellulari*.

La teoria delle catastrofi fece la sua comparsa nel 1968 solidamente basata su diverse regole matematiche correlate con criteri per la classificazione di sistemi dinamici. Questi ultimi sono caratterizzati da comportamenti non lineari, che li portano a "scivolare" improvvisamente verso stati di disequilibrio, pur trovandosi inizialmente in condizioni di stabilità. Non è difficile immaginare come molti sistemi naturali possano essere talvolta caratterizzati da simili comportamenti, dando, appunto, luogo a vere e proprie catastrofi.

Anche la teoria del caos è solidamente basata sulla matematica, ma le sue origini

sono ben precedenti, visto che la si fa risalire agli studi sulla meccanica celeste di Poincaré (1892). I sistemi caotici sono sistemi dinamici deterministici che, in seguito a un disturbo – anche infinitesimale – che ne perturba lo stato iniziale, possono alterare radicalmente il loro comportamento. Dunque, anche se si tratta, come si diceva, di sistemi deterministici, essi possono avere un comportamento praticamente non prevedibile. I ricercatori hanno osservato che molti sistemi possono avere un comportamento di tipo caotico e ciò, unitamente alla diffusione di computer molto veloci, ha consentito di astrarre per essi alcune proprietà comuni, che oggi rendono – almeno parzialmente – prevedibili taluni fenomeni caotici. Gli studi sul caos, in effetti, sono ancora oggi oggetto di grande interesse per la loro potenziale efficacia nell'affrontare e risolvere numerosi problemi relativi a fenomeni non lineari: molti processi naturali la cui comprensione ancora non è del tutto accertata potrebbero trovare una spiegazione proprio grazie alla teoria del caos.

Un più recente sviluppo negli studi sulla complessità ha condotto a elaborare due ulteriori approcci computazionali aventi a che fare – soprattutto – con l'evoluzione dei sistemi, ovvero gli algoritmi genetici e la riproduzione cellulare.

Da un punto di vista strettamente evolutivo, si può affermare che un organismo è rappresentabile per mezzo di un vettore di caratteristiche che sono appunto i suoi geni. L'evoluzione di qualunque organismo richiede che tale vettore si combini con altri oppure muti esso stesso. Ricorrendo alla programmazione su di un moderno calcolatore di un siffatto modello di organismo e delle sue possibili evoluzioni, è possibile simulare il comportamento di molteplici sistemi e, in particolare, di quelli gerarchici, che paiono predominare nel mondo naturale.

L'approccio cosiddetto della riproduzione cellulare deve la sua elaborazione alla impostazione di un programma informatico in grado di creare oggetti simbolici di vario tipo e di applicare regole adatte a garantire la loro riproduzione o distruzione, in relazione alle condizioni ambientali che si determinano. Tale procedura può servire a rappresentare in maniera estremamente vivida la simulazione della evoluzione di sistemi in grado di autoriprodursi.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] A.M. Angelici, *Lineamenti della scienza e ingegneria dei sistemi*, Accademia dei Lincei, Roma, 1970.
- [2] H.R. Westerman, *Systems engineering – Principles and practice*, Artech House, 2001.
- [3] P. Parvopassu, *Direzione e organizzazione aziendale*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 1999.
- [4] R.L. Ackoff, "Towards a system of systems concepts", *Management Science*, n. 11, *American Scientist*, New York, July 1971.
- [5] W. Weaver, "Science and complexity", *American Scientist*, 36: 536, 1948.
- [6] H.A. Simon, *The sciences of the artificial*, The MIT Press, Boston, 1996.
- [7] W.R. Blischke, D.N. Prabhakar Murthy, *Reliability – Modeling, Prediction and Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 2000.

# 2

## Elementi di statistica e di teoria della probabilità

Ai fini della presente trattazione, risulta opportuno soffermarsi sui concetti di base della Statistica, che diviene uno strumento importante per la valutazione della affidabilità dei sistemi o componenti di sistema. La teoria dell'affidabilità, infatti, studia i problemi di previsione, stima e ottimizzazione della probabilità di sopravvivenza, della durata media di vita e della percentuale di buon funzionamento dei sistemi, attraverso lo studio delle leggi di occorrenza dei guasti.

Una delle grandezze fondamentali su cui si basa la Statistica è la *probabilità*, introdotta per la prima volta nel diciassettesimo secolo con lo studio dei giochi d'azzardo. Questi, per loro natura, implicano nel loro svolgimento una componente di incertezza sugli esiti delle giocate, che conduce appunto all'azzardo, cioè al rischio o pericolo di perdere la giocata. Questi giochi, dunque, prevedono lo svolgimento di azioni dall'esito incerto, ma con un esito di lungo termine prevedibile. Per esempio, si sa che dal lancio di una moneta sufficientemente simmetrica e bilanciata, ci si può aspettare una sostanziale equivalenza della frequenza di occorrenza per ciascuna faccia (fra le volte che esce una faccia della moneta e l'altra).

Tale tipo di incertezza e di regolarità su di un arco temporale sufficientemente lungo, tale da consentire il ripetersi di numerosi eventi relativi al fenomeno che si sta analizzando, si verifica spesso nelle scienze sperimentali, rendendo interessante l'analisi statistica che diviene uno strumento prezioso e, in molti casi, essenziale.

La probabilità è stata oggetto di successive definizioni nel tempo, in seguito allo svilupparsi di nuove teorie e scuole di pensiero sulla disciplina statistica.

L'associazione fra probabilità e giochi d'azzardo ha suggerito, inizialmente, la definizione classica di probabilità: se un fenomeno casuale può dar luogo, nel suo verificarsi ripetitivo, a  $n$  eventi che si escludono a vicenda e ugualmente possibili, e se  $n_A$  di questi danno luogo al verificarsi dell'evento  $A$ , allora la probabilità che si verifichi  $A$  è data dal rapporto  $n_A/n$ .

Esempi classici sono il lancio di dadi e l'estrazione di una carta da un mazzo di carte. Se si considera un dado con sei facce, gli eventi associati all'uscita di una faccia qualunque sono ugualmente probabili ed esclusivi (se esce una faccia, infatti, non può uscirne un'altra). Dunque la probabilità che esca una faccia dal lancio del dado, in base alla definizione fornita, è  $1/6$ . Analogamente la probabilità che si estragga una certa carta da un mazzo composto da 52 carte è pari a  $1/52$ .

La *probabilità classica* definita alla maniera *classica* è sempre un numero compreso fra 0 e 1, essendo 0 quando si è certi che l'evento non si verifica e 1 quando si è certi del contrario, cioè che l'evento si verifica.

La definizione classica fornita appare abbastanza immediata nell'applicazione, ma occorre prestare molta attenzione alle ipotesi poste: la probabilità classica, cioè, può essere calcolata solamente quando si abbia a che fare con eventi ugualmente probabili e mutuamente esclusivi.

Un altro limite della definizione classica si manifesta quando si incontrano domande del tipo: qual è la probabilità che un uomo cominci a fumare prima di 50 anni? Tale quesito è plausibile in statistica, ma non trova una risposta alla luce della probabilità classica, che è aprioristica. Per questo motivo si è sviluppata la *teoria frequentista*, che definisce una probabilità di più vasta applicabilità.

Si supponga di considerare l'esperimento del lancio di una moneta perfettamente bilanciata; come si è visto nella trattazione classica, la probabilità che esca una faccia o l'altra è circa la stessa, a priori. Se a questa considerazione teorica si fa seguire l'esperimento pratico, si scopre che il numero di volte che esce una faccia della moneta, o l'altra, è circa  $1/2$ , ma non proprio  $1/2$ . La definizione classica, infatti, fornisce una valutazione a priori; la definizione frequentista, invece, fornisce una valutazione della probabilità sulla base del verificarsi effettivo degli eventi, cioè della frequenza di accadimento di un determinato evento dopo un certo numero di tentativi. In tale senso, la probabilità  $p$  di accadimento di un evento viene approssimata dalla frequenza, che è un numero rappresentativo della probabilità, ma non è la probabilità esatta dell'evento determinato.

Potendo concepire una serie di osservazioni o esperimenti in condizioni sufficientemente uniformi sul verificarsi di un evento  $A$ , dunque, può essere introdotto e valutato un numero  $f$ , detto *frequenza relativa*, che approssima la probabilità  $p$  dell'evento.

Le teorie probabilistiche appena viste (classica e frequentista) hanno un elemento in comune: entrambe fanno riferimento a eventi ripetibili in condizioni simili o abbastanza simili. Può accadere, però, di dovere valutare la probabilità di un evento non necessariamente ripetibile, o comunque ripetibile in condizioni non simili (per esempio, può accadere di considerare la probabilità che scoppi una guerra entro una certa data). Questo tipo di probabilità, che non fa riferimento a eventi ripetibili in condizioni simili, bensì a fatti non oggettivi o pressoché unici, viene detta appunto *probabilità soggettiva*. Essa, come la probabilità classica e la frequenza relativa, rientra perfettamente nell'ambito della disciplina statistica poiché consente di valutare la probabilità di una certa classe di eventi, esattamente come avviene per le altre due grandezze già viste. La definizione di probabilità soggettiva porta alla costruzione di un modello che si fonda su assiomi di validità generale e che, possibilmente, abbia validità generale, ovvero comprenda tutte le definizioni viste di probabilità.

Dato un certo sistema e supponendo di effettuare con esso un certo esperimento, gli esiti di tale esperimento rappresentano degli eventi che, presi unitamente, costituiscono quello che in Statistica si chiama lo *spazio degli eventi* o *insieme completo degli eventi*.

La probabilità associata a tali esperimenti di un dato tipo e definita in modo assiomatico, così da salvaguardare la richiesta generalità, è dunque una funzione fra insiemi, che gode di alcune proprietà particolari.

Assegnato lo spazio campionario  $\Omega$  di tutti gli eventi conseguenti a un generico esperimento compiuto su di un dato sistema, e lo spazio degli eventi  $A$ , associato a un esperimento specifico, la probabilità di un generico evento  $E$ , sottoinsieme di  $A$ , è un numero  $p$  tale che:

1.  $p(E) \geq 0$ ;
2.  $p(E) \leq 1$ ;
3.  $p(E) = 1$  se l'evento è certo;
4. dati due eventi  $A$  e  $B$  è:

$$p(A \cup B) + p(A \cap B) = p(A) + p(B) \quad (2.1)$$

5. dati due eventi  $A$  e  $B$ :

$$p(A \cap B) = p(A/B) \cdot p(B) = p(B/A) \cdot p(A) \quad (2.2)$$

Gli assiomi 4 e 5, in quanto tali, non sono dimostrabili ma possono essere visualizzati alla luce della teoria insiemistica. L'assioma 5, inoltre, introduce la *probabilità condizionale*  $p(A/B)$ , cioè la probabilità che si verifichi un evento  $A$  sapendo che l'evento  $B$  si è verificato.

Dall'assioma 4 discende il *teorema delle probabilità totali*: se due eventi  $A$  e  $B$  sono incompatibili (cioè mutuamente esclusivi,  $p(A \cap B) = 0$ ) allora la probabilità del verificarsi dell'uno dell'altro è la somma delle probabilità di ciascuno dei due eventi

$$p(A \cup B) = p(A) + p(B) \quad (2.3)$$

Dall'assioma 5, invece, discende il *teorema delle probabilità composte*: se due eventi  $A$  e  $B$  sono indipendenti, allora la probabilità che si verifichino contemporaneamente è pari al prodotto delle probabilità associate ai singoli eventi

$$p(A \cap B) = p(A) \cdot p(B) \quad (2.4)$$

Assegnato uno spazio degli eventi, se tutti gli eventi che si possono verificare sono mutuamente esclusivi, si ha, dunque:

$$\sum_i p(E_i) = p(E_1) + p(E_2) + \dots = 1 \quad (2.5)$$

Le espressioni trovate, alcune assiomatiche altre dimostrabili, costituiscono una risorsa importante per l'effettuazione dei calcoli probabilistici.

La frequenza di un evento associato a un certo sistema, come anticipato, costituisce un'approssimazione della probabilità di quell'evento, utile per considerare a posteriori, cioè sulla base di esperienze reali, tale grandezza. La *legge dei grandi nu-*

meri, o legge empirica del caso, afferma che la frequenza di un evento associato a una serie di prove effettuate su un sistema è pari alla sua probabilità se il numero delle prove è molto grande:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} f = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N} = p \quad (2.6)$$

ove  $N$  è il numero di esperimenti effettuato e  $n$  il numero di volte che si è verificato l'evento prestabilito.

La trattazione delle probabilità condizionali induce a introdurre il *teorema di Bayes* (da qualcuno chiamato *teorema della probabilità delle cause*): assegnati due eventi  $R$  e  $S$ , vale l'assioma 5 da cui discende l'espressione:

$$p(R/S) = \frac{p(R \cap S)}{p(S)} = \frac{p(S/R) \cdot p(R)}{p(S)} = \frac{p(S/R) \cdot p(R)}{p(S/R) \cdot p(R) + p(S/\bar{R}) \cdot p(\bar{R})} \quad (2.7)$$

Tale teorema trova una importante applicazione nel caso della accettazione di risorse produttive (materie prime) in una azienda: supponendo che  $R$  significhi possedere requisiti qualitativi elevati e  $S$  avere superato una certa prova iniziale,  $p(R/S)$  rappresenta la probabilità che un materiale che ha superato una certa prova possieda effettivamente i requisiti richiesti.

In genere, si è interessati a una distribuzione di probabilità piuttosto che a un singolo valore di questa grandezza, cioè a una distribuzione dei valori della probabilità associati a un insieme completo di eventi.

Tutte le probabilità espresse nella distribuzione di valori devono essere comprese fra 0 e 1 e devono essere tali che la loro somma sia pari a 1 (*proprietà di chiusura*)

$$\sum p_i = 1 \quad (2.8)$$

In particolare, supponendo di considerare un insieme di numeri  $X$  posto in corrispondenza biunivoca con un insieme completo di eventi, è possibile valutare la probabilità associata al manifestarsi di uno di questi numeri. Il generico  $x$  appartenente a tale insieme numerico viene detto *variabile aleatoria* e può assumere valori discreti oppure continui.

Per comprendere il significato di una variabile aleatoria, si consideri il seguente caso particolare: un disco può ruotare intorno al suo centro e ha un raggio tracciato in modo da essere facilmente visibile; assegnata un'ascissa angolare (cioè un riferimento fisso rispetto alla rotazione del disco), la variabile aleatoria (in questo caso continua) è l'angolo che durante la rotazione forma il raggio visibile rispetto al riferimento fisso; ci si chiede quale sia l'angolo alla fine della generica rotazione imposta. Evidentemente, se la rotazione è imposta casualmente, anche l'angolo formato dal raggio predeterminato con il riferimento fisso avrà, alla fine della rotazione, un valore casuale; poiché tale angolo può assumere con continuità valori differenti, si ha a che fare con una variabile aleatoria continua.

Assegnata una variabile aleatoria, si può considerare una sua generica distribuzione (Figura 2.1) e le grandezze caratteristiche: il *valore atteso*, o speranza matematica o valore medio, la *varianza*, o scarto quadratico medio, e la sua radice quadrata, la *deviazione standard*.

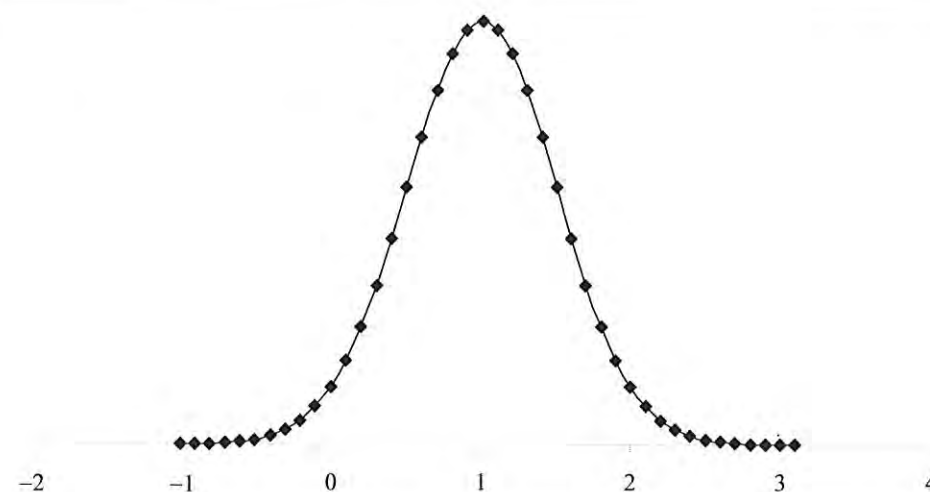


Figura 2.1 Esempio di distribuzione probabilistica.

Il valore atteso  $\bar{x}$  rappresenta il valore baricentrico della distribuzione, dunque il valore di  $x$  più probabile. Indicando con  $D(x)$  la *densità di probabilità* ( $D(x) = \frac{dp}{dx}$ ), cioè la probabilità infinitesima associata a una variazione infinitesima di  $x$ , risulta:

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot D(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} D(x) dx} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot D(x) dx \quad (2.9)$$

La varianza  $\sigma^2$  è una grandezza indicativa dello scostamento dei valori della distribuzione dal valore più probabile, cioè il valore atteso. Essa, in sostanza, fornisce una valutazione della "apertura" del diagramma della funzione di distribuzione e la sua espressione è la seguente:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 \cdot D(x) dx \quad (2.10)$$

Discende la deviazione standard  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 \cdot D(x) dx} \quad (2.11)$$

Assegnata una certa distribuzione probabilistica è possibile risalire alla cosiddetta *funzione di ripartizione*  $F(x)$ , che rappresenta la probabilità che l'evento si verifichi



in un certo intervallo di valori della variabile aleatoria, in generale nell'intervallo  $[-\infty, x]$ :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x D(x) dx \quad (2.12)$$

Nel seguito si illustrano le più comuni funzioni di distribuzione.

La *distribuzione di Bernoulli* o *binomiale* è una distribuzione discreta, espressa dalla seguente relazione:

$$p(k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot q^{n-k} \quad (2.13)$$

Infatti, si considerino due eventi  $E_1$  e  $E_2$ , e sia  $p$  la probabilità costante di  $E_1$  e  $q$  la probabilità costante di  $E_2$ , con  $p + q = 1$ , per la proprietà di chiusura. Eseguendo  $n$  prove indipendenti, sia  $k$  il numero di volte che si verifica l'evento  $E_1$ ;  $k$  è una variabile aleatoria discreta che può assumere i valori  $0, 1, 2 \dots n$ . La probabilità che in  $n$  prove si presenti una certa sequenza è  $p^k \cdot q^{n-k}$ , mentre il numero di sequenze in cui  $E_1$  compare  $k$  volte è dato dal coefficiente binomiale  $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!}$ . Allora, essendo le  $n$  prove indipendenti, in base al teorema delle probabilità composte risulta valida l'espressione. Il valore atteso è:

$$\bar{k} = n \cdot p \quad (2.14)$$

e la varianza

$$\sigma^2 = n \cdot p \cdot q \quad (2.15)$$

La *distribuzione di Poisson* è anch'essa una distribuzione discreta. Assegnata una variabile aleatoria discreta  $k$ , risulta:

$$p(k) = \frac{m^k \cdot e^{-m}}{k!} \quad (2.16)$$

$$\bar{k} = \sigma^2 = m \quad (2.17)$$

Tale funzione di distribuzione si manifesta soprattutto in presenza di eventi rari, perciò è anche detta *distribuzione degli eventi rari*.

La *distribuzione di Gauss*, o *normale*, è fra le più comuni. Si dice che una assegnata variabile aleatoria continua segue la legge di Gauss se risulta essere valida la seguente relazione:

$$D(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (2.18)$$

Il valore medio risulta essere:

$$\bar{x} = m \quad (2.19)$$

La *distribuzione esponenziale* si verifica quando la variabile aleatoria continua  $x$  è caratterizzata dalla seguente densità di probabilità:

$$D(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{con } \lambda > 0 \quad (2.20)$$

e il valore atteso e la varianza sono date rispettivamente dalle seguenti espressioni:

$$\bar{x} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.21)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.22)$$

### Riferimenti bibliografici

- [1] D. Babbo, L. Fedele, M. Tronci, *La Manutenzione: dalla manutenzione su guasto alla manutenzione migliorativa*, Ed. Esagrafica, Roma 2001.

# 3

## Elementi di teoria della affidabilità, manutenibilità e disponibilità

La teoria della affidabilità studia il comportamento dei sistemi e dei componenti di sistema, cercando di appurarne la vita media, la capacità di sopravvivenza e la probabilità di buon funzionamento.

L'*affidabilità* di un componente si può definire come la probabilità che il componente funzioni senza guastarsi in un intervallo di tempo assegnato, date le sollecitazioni cui è sottoposto e le condizioni ambientali in cui opera. Questa definizione presuppone:

- che sia fissato in modo univoco il criterio per giudicare se l'elemento è funzionante;
- che le condizioni ambientali d'impiego siano stabilite e mantenute costanti nel periodo in questione;
- che sia definito l'intervallo di tempo durante il quale si richiede che il componente funzioni.

Da quanto detto si evince che l'affidabilità è funzione dello stato  $C$  del componente (cioè se il componente è guasto o meno ecc.)<sup>1</sup>, delle condizioni ambientali e delle sollecitazioni  $A$ , cui è soggetto oltre che del tempo  $t$ :

$$R = R(C, A, t) \quad (3.1)$$

Considerato un numero costante di componenti di uno stesso tipo, il numero di componenti vivi al tempo  $t$  e il numero di componenti guasti allo stesso istante, risulta essere:

<sup>1</sup> Ciò è facile se si ha a che fare con *componenti bistabili*, cioè caratterizzati dal fatto che possono funzionare o meno; è meno facile se lo stato del componente può variare con continuità fra la condizione di non funzionamento e quella di funzionamento.

$$N_0 = N_v(t) + N_g(t) \quad (3.2)$$

Si può di conseguenza definire l'affidabilità  $R(t)$  come il rapporto:

$$R(t) = \frac{N_v(t)}{N_0} \quad (3.3)$$

e l'*inaffidabilità*  $F(t)$ :

$$F(t) = \frac{N_g(t)}{N_0} = 1 - \frac{N_v(t)}{N_0} = 1 - R(t) \quad (3.4)$$

$F(t)$  e  $R(t)$ , dunque, sono delle funzioni di probabilità. La densità di probabilità della inaffidabilità  $f(t)$  è:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - R(t))}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Il prodotto  $f(t) \cdot dt$ , dunque, rappresenta la probabilità che il componente considerato si guasti nell'intervallo di tempo compreso fra  $t$  e  $t + dt$ .

Un'altra grandezza molto importante della teoria affidabilistica è il *tasso di guasto*  $\lambda(t)$ , che è in relazione con la probabilità condizionale  $\lambda(t) \cdot dt$  che un componente sopravvissuto fino al tempo  $t$  si guasti al tempo  $t + dt$ . Questa grandezza, dunque, che non è una densità di probabilità, si differenzia dalla densità dell'inaffidabilità che fa riferimento, infatti, all'intera popolazione dei componenti, mentre  $\lambda(t) \cdot dt$  fa riferimento alla popolazione sopravvissuta, minore o al limite uguale alla popolazione totale.

In base alla definizione data, dunque, vale la seguente relazione:

$$\begin{aligned} \lambda(t) \cdot dt &= \frac{\text{probabilità guasto in } [t, t + dt]}{\text{probabilità non guasto in } [0, t]} = \\ &= \frac{\text{probabilità guasto in } [0, t + dt] - \text{probabilità guasto in } [0, t]}{R(t)} \end{aligned}$$

e quindi:

$$\lambda(t) \cdot dt = \frac{-R(t + dt) - (-R(t))}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{R(t)} = \frac{f(t) \cdot dt}{R(t)} \quad (3.6)$$

da cui discende la seguente espressione:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t) \quad (3.7)$$

e quindi:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.8)$$

Ragionando in termini finiti:

$$f(t) = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{\Delta N_g}{\Delta t} \quad (3.9)$$

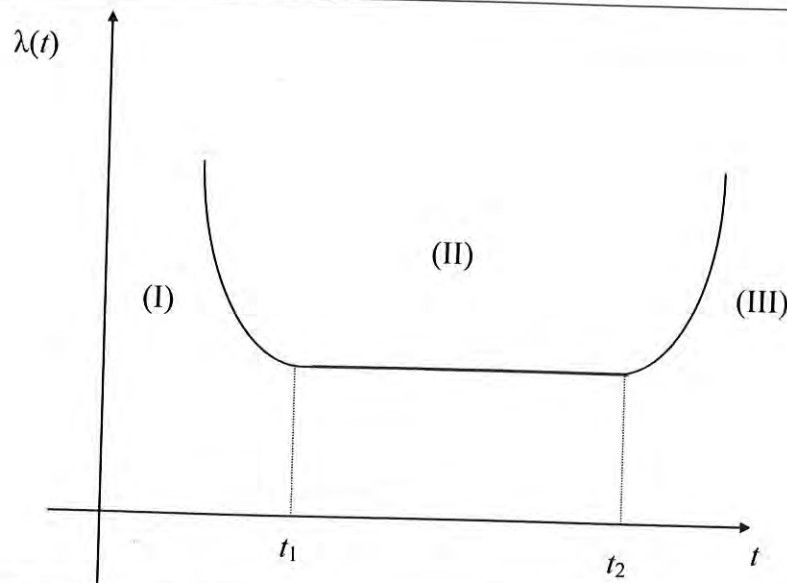


Figura 3.1 Diagramma tipico del tasso di guasto.

e

$$\lambda(t) = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} = \frac{1}{N_v} \cdot \frac{\Delta N_g}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Alcuni componenti sono caratterizzati dalla cosiddetta proprietà di non memoria dal punto di vista affidabilistico. Cioè, per essi il tasso di guasto si mantiene costante nel tempo, e non dipende dal particolare istante preso in considerazione. Se il tasso di guasto è costante ne discende che la affidabilità  $R(t)$  è caratterizzata da una funzione di distribuzione di tipo esponenziale. La situazione del tasso di guasto costante è visibile nella successiva Figura 3.1, ove è rappresentata la cosiddetta *bath tube curve* (curva a vasca da bagno).

La regione (I) è caratteristica dei componenti che sono stati malamente concepiti o progettati male (componenti meccanici/strutturali) o dei componenti che presentano difettosità nei materiali (componenti elettrici/elettronici): in questa area si manifesta il cosiddetto fenomeno della mortalità infantile. La regione (II) è caratteristica dei componenti a tasso di guasto costante, nei quali il guasto si manifesta in modo casuale (tipicamente il caso dei componenti elettronici). La regione (III) è la zona tipica dei componenti caratterizzati dai fenomeni classici di invecchiamento (usura, abrasione, erosione ecc.).

Nell'ambito della regione (II), dunque, la distribuzione dell'inaffidabilità è di tipo esponenziale con tasso di guasto costante. Quest'ultima condizione può verificarsi anche in presenza di un sistema di componenti, o a tasso di guasto costante, ovviamente, o a tasso di guasto variabile in modo che si possa considerare la variazione del tasso di guasto complessivo (in prima analisi dato dalla somma dei tassi dei sin-

goli componenti) circa nullo. In caso di tassi di guasto variabili, la distribuzione affidabilistica più rappresentativa appare quella di Weibull:

$$\frac{dR(t)}{dt} = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{per } t \geq \gamma \quad (3.11)$$

$$R(t) = 1 \quad \text{per } t < \gamma$$

ove:

$\gamma$  = vita minima (tempo entro il quale non si verificano guasti);

$\eta$  = vita caratteristica (in tale intervallo di tempo si guasta il 63,2% della popolazione);

$\beta$  = parametro di forma.

Normalmente si assume  $\gamma = 0$ .

Nella zona (III), tipica dei componenti meccanici, appare sensato considerare, quale distribuzione della inaffidabilità, la distribuzione normale o gaussiana.

I sistemi o i componenti possono essere distinti in:

- sistemi/componenti non riparabili, per i quali il verificarsi del guasto rappresenta una transizione irreversibile, che viene trattata nell'ambito degli studi affidabilistici in senso stretto;
- sistemi/componenti riparabili, per i quali il guasto o anomalia di funzionamento rappresenta solo uno dei momenti tipici della vita del componente, al quale seguono altri intervalli di funzionamento e di non funzionamento che sono oggetto degli studi relativi alla disponibilità.

Per i sistemi o componenti non riparabili il parametro *Mean Time To Failure* (MTTF) esprime il tempo in cui si verifica il guasto, a partire dall'inizio della vita del componente al tempo  $t = 0$ .

Il MTTF, evidentemente, rappresenta il valore medio della distribuzione di probabilità della inaffidabilità  $F(t)$ :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = - \int_0^{\infty} t \cdot \frac{dR(t)}{dt} dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.12)$$

Nel caso di componenti caratterizzati dalla cosiddetta proprietà di non memoria, cioè con tasso di guasto  $\lambda$  costante, la (3.12) diviene:

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.13)$$

All'istante  $t = MTTF$ , risulta essere:

$$R(t) = R(MTTF) = e^{-1} \approx 0,37 \quad (3.14)$$

cioè la probabilità che un componente funzionante all'istante iniziale ( $t = 0$ ) non si guasti al tempo  $t = MTTF$  è pari a 0,37.

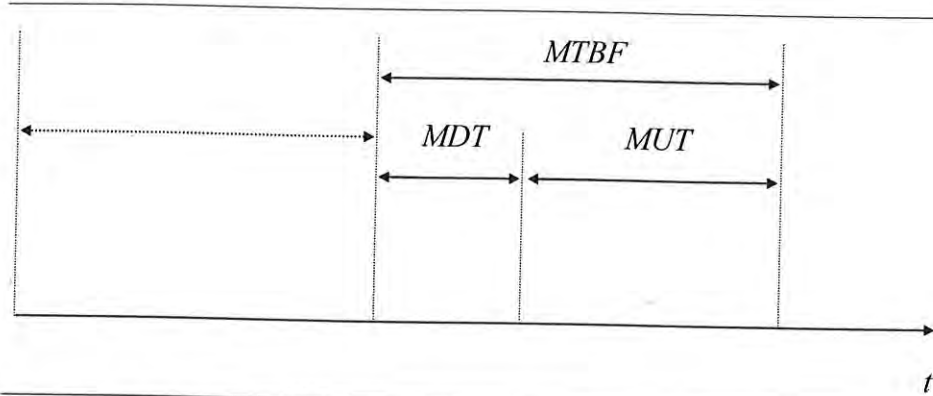


Figura 3.2 Flusso di guasti e riparazioni nei sistemi riparabili.

Nel caso dei sistemi/componenti riparabili, come già si è avuto modo di dire, gli studi si concentrano sulla disponibilità. In tali sistemi si determina un flusso di guasti e di riparazioni che danno luogo a periodi di tempo significativi dal punto di vista del sistema e dei suoi componenti (Figura 3.2).

All'intervallo di tempo  $MTTF$  già definito, fa seguito un periodo di mancato funzionamento durante il quale il sistema viene riparato: questo intervallo di tempo è noto con il nome di *Mean Down Time (MDT)* ed è la somma di altri tre intervalli temporali, individuati da altrettanti parametri:

- *LDT (Logistic Delay Time)*, tempo di arresto del componente necessario all'approntamento dei mezzi del supporto logistico (tecnici, parti di ricambio, attrezzature, documentazione);
- *ADT (Administrative Delay Time)*, tempo di arresto del componente dovuto a questioni di natura gestionale/amministrativa (priorità nell'assegnazione del personale, scioperi, attese per l'ottenimento di autorizzazioni ecc.);
- *MAMT (Mean Active Maintenance Time)*, tempo medio richiesto per effettuare la manutenzione, che non comprende né *ADT* né *LDT*.

Una volta riparato, il sistema/componente rimane in funzionamento per un ulteriore intervallo temporale che definisce un nuovo parametro, il *Mean Up Time (MUT)*.

La somma di *MUT* e *MDT* porta alla definizione di un nuovo termine, il *Mean Time Between Failures (MTBF)*, cioè la cadenza espressa in ore di funzionamento con cui ci si deve attendere il verificarsi dei guasti.

La *disponibilità*  $A(t)$  di un sistema/componente (riparabile) è definita come la probabilità che un componente funzionante all'istante  $t = 0$  non sia guasto all'istante  $t$  considerato; essa può essere valutata come rapporto tra il tempo medio di funzionamento corretto del componente stesso e il tempo totale di attività (tempo operativo e tempo dedicato alla manutenzione).

La disponibilità si può considerare sotto tre forme diverse:

- inherent availability (disponibilità intrinseca)*,  $A_i$ , che rappresenta la probabilità che un sistema, utilizzato sotto particolari condizioni e in un ambiente ideale di

supporto (piena disponibilità di attrezzatura, ricambi, manuali di istruzione, personale qualificato per la manutenzione ecc.), operi in ogni istante in maniera soddisfacente;

- operational availability (disponibilità operativa)*,  $A_o$ , ovvero la probabilità che un sistema utilizzato sotto particolari condizioni e in un assegnato ambiente operativo reale, operi in maniera soddisfacente quando richiesto;
- achieved availability (disponibilità raggiunta)*,  $A_a$ , che rappresenta la disponibilità effettivamente raggiunta, tenendo conto anche dei ritardi logistici e amministrativi.

L'andamento della funzione  $A(t)$  è rappresentato nella Figura 3.3:

$$A(t) = 1 \quad \text{all'istante } t = 0$$

$$A(t) = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad \text{per } t \text{ che tende all'infinito}$$

come si desume dall'espressione seguente

$$\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (3.15)$$

Analogamente, si può definire la grandezza complementare della disponibilità, ovvero l'*indisponibilità*  $Q(t)$ :

$$A(t) + Q(t) = 1 \quad (3.16)$$

Un'altra grandezza di interesse nella trattazione dei sistemi riparabili è la *manutenibilità*  $M(t)$ , la quale rappresenta la probabilità che il componente guasto all'istante  $t = 0$  possa essere riparato all'istante  $t$ .

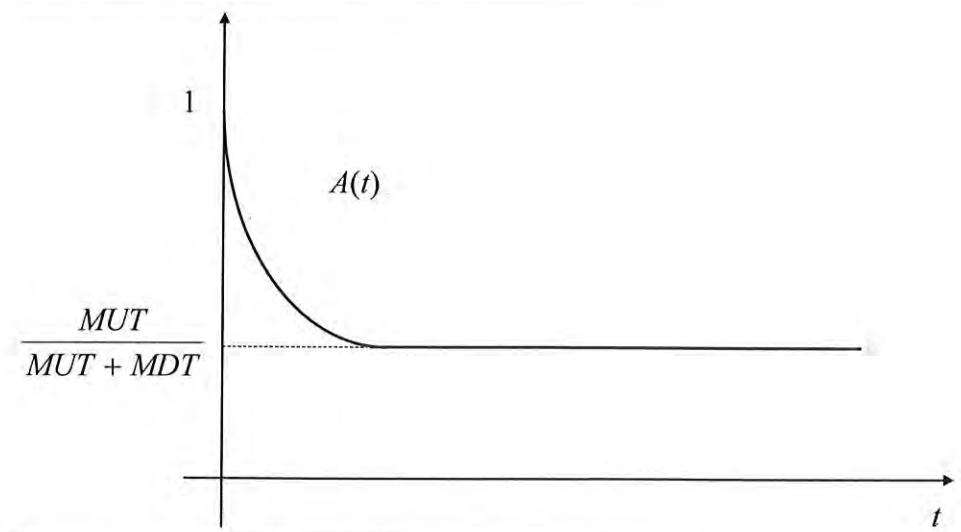


Figura 3.3 Andamento tipico della disponibilità.

Vale la seguente relazione:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} M(t) = 1 \quad (3.17)$$

La densità di probabilità della manutenibilità è la funzione  $g(t)$ :

$$g(t) = \frac{dM(t)}{dt} \quad (3.18)$$

da cui discende un altro parametro di interesse, il *Mean Time To Repair (MTTR)*, che è il valor medio della distribuzione statistica della manutenibilità:

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot g(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - M(t)) dt \quad (3.19)$$

Analogamente al tasso di guasto, è possibile introdurre il *tasso di riparazione*  $\lambda_g(t)$ , tale che  $\lambda_g(t) \cdot dt$  è pari alla probabilità che il componente guasto venga riparato nell'intervallo infinitesimo  $dt$ . Con una dimostrazione analoga a quella già vista per il tasso di guasto, risulta essere:

$$\lambda_g(t) \cdot dt = \frac{dM(t)}{1 - M(t)} \quad (3.20)$$

Se il tasso di riparazione risulta essere costante e pari a  $\mu$ , si può scrivere:

$$\mu \cdot dt = \frac{dM(t)}{1 - M(t)} \quad (3.21)$$

e quindi:

$$\begin{aligned} \ln(1 - M(t)) &= -\mu t + \text{cost} \\ (1 - M(t)) &= e^{-\mu t + \text{cost}} \\ M(t) &= 1 - e^{-\mu t + \text{cost}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Essendo  $M(0) = 0$ , allora:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (3.23)$$

Discende che:

$$MTTR = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu} \quad (3.24)$$

La considerazione dei sistemi riparabili conduce ad analizzare, fra l'altro, anche sistemi in cui il tasso di transizione fra lo stato di funzionamento e lo stato di guasto rimanga costante nel tempo. In tale condizione, è possibile risalire a una dipendenza di tipo statistico fra le riparazioni, e quindi gli stati di funzionamento dei sistemi, e i guasti, conducendo a effettuare una analisi basata sui cosiddetti *processi markoviani*, trattati più avanti.

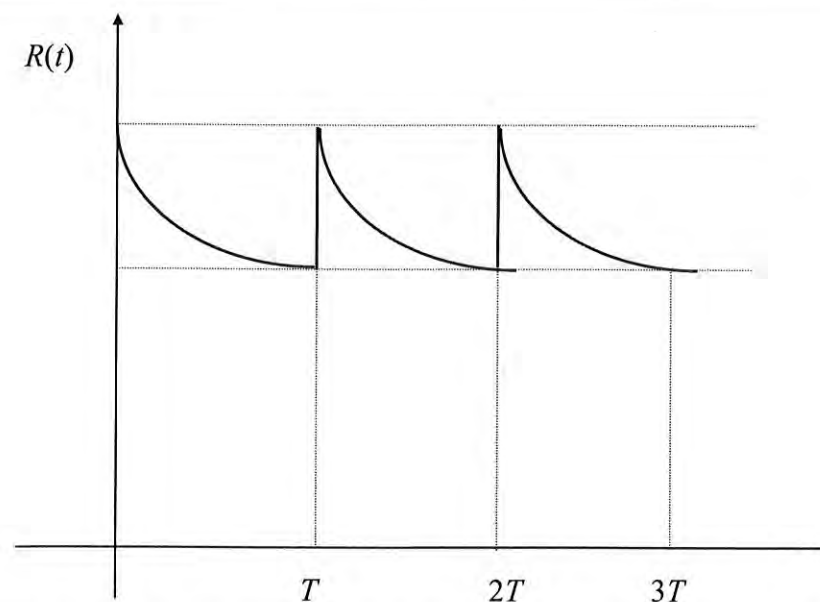


Figura 3.4 Affidabilità di un sistema in manutenzione periodica.

La trattazione degli studi affidabilistici si completa con la considerazione a) dei guasti che si autoevidenziano e che non si autoevidenziano e b) delle cause comuni di guasto.

I guasti che non si autoevidenziano richiedono una analisi periodica nel tempo per evitare che la situazione di guasto si manifesti nel momento peggiore, ovvero, quando il componente, o il sistema, viene chiamato a produrre un intervento (per esempio, il caso di un sistema di sicurezza, come un impianto antincendio che è normalmente in stand by). Nel caso dei guasti che si autoevidenziano, si può ricorrere alla teoria affidabilistica appena trattata.

Si supponga di considerare un sistema caratterizzato da tasso di guasto costante e guasto che non si autoevidenzia; in tal caso, l'affidabilità del sistema segue la legge esponenziale negativa e dunque decresce gradualmente nel tempo.

Per capire se il sistema a un certo istante è funzionante è necessario chiamarlo in servizio oppure eseguire un test di controllo. Se il sistema viene periodicamente testato a intervalli di tempo regolari  $T$ , allora è possibile introdurre il parametro *Probability of Failure On Demand (PFOD)* che, se è  $T \gg MTTR$  (cioè la riparazione si considera istantanea) è definito dalla seguente espressione:

$$PFOD = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt \quad (3.25)$$

Tale parametro rappresenta la probabilità che un sistema soggetto a un controllo periodico si guasti quando viene chiamato a intervenire; esso viene calcolato basandosi

sull'ipotesi di un intervento manutentivo periodico che riporta il sistema nelle sue condizioni iniziali, lasciando inalterato il tasso di guasto (se questo è costante).

La probabilità di buon funzionamento in un intervallo fra due interventi manutentivi  $(1 - p(t))$ , dunque, ha il significato di una affidabilità (Figura 3.4). Si può scrivere, dunque:

$$p(t) = F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.26)$$

e, se  $\lambda t \ll 1$

$$p(t) = F(t) \approx \lambda \cdot t \quad (3.27)$$

da cui

$$PFOD = \frac{\lambda \cdot t}{2} \quad (3.28)$$

Si vede così che, essendo il tasso di guasto costante, *PFOD* dipende esclusivamente da *T*.

### 3.1 Cause comuni di guasto

Le *cause comuni di guasto* (*Common Cause Failures - CCF*), rappresentano eventi comuni a più componenti presenti in un sistema e sono in grado di indurre guasti in tutti i componenti coinvolti.

Si possono manifestare diversi tipi di dipendenza, per esempio:

- dipendenza funzionale, quando viene a mancare un input funzionale come l'alimentazione elettrica a una classe di componenti; si può rilevare mediante l'applicazione della *fault tree analysis* (*analisi dell'albero dei guasti*) con cui è possibile evidenziare la presenza di eventi comuni a più rami dell'albero;
- presenza di un evento esterno comune, come, per esempio, nel caso in cui si manifesti un incendio in grado di porli contemporaneamente fuori servizio;
- difetti presenti in una fornitura, quando si manifesti un difetto in un certo numero di componenti di un lotto;
- presenza di fattori operativi che influenzano in uno stesso modo più componenti, per esempio, per la presenza di vibrazioni, temperature intense ecc.

La presenza delle cause comuni di guasto ha una influenza non irrilevante sulle analisi affidabilistiche. In alcuni casi particolari è possibile studiare tali effetti comuni, mediante tecniche di analisi come quella dell'albero dei guasti e ottenere così una quantificazione approssimata delle conseguenze.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] D. Babbo, L. Fedele, M. Tronci, *La Manutenzione: dalla manutenzione su guasto alla manutenzione migliorativa*, Ed. Esagrafica, Roma 2001.

## Affidabilità dei sistemi complessi

Un sistema è un insieme di elementi o componenti caratterizzati da particolari condizioni funzionali e affidabilistiche, ciascuno dei quali contribuisce a realizzare il funzionamento del sistema complessivo con un certo livello affidabilistico.

I sistemi possono essere analizzati con una metodologia *top down*, attraverso la quale lo si scompone e lo si semplifica, o *bottom up*, che conduce alla determinazione del livello affidabilistico del sistema globale a partire dalla considerazione delle affidabilità dei singoli componenti.

I sistemi complessi possono essere classificati in:

- a) *sistemi non ridondanti*: anche detti *sistemi serie*, nei quali il verificarsi del guasto di un componente comporta il guasto di tutto il sistema;
- b) *sistemi ridondanti*: anche detti *sistemi parallelo*, che non si guastano anche se si guasta un componente.

I sistemi non ridondanti, di tipo serie cioè, sono caratterizzati dal fatto che il guasto di un componente determina il non funzionamento del sistema. L'affidabilità del sistema non ridondante è pari al prodotto delle affidabilità dei singoli componenti:

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) \quad (4.1)$$

Se il tasso di guasto è costante ed è  $R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ , allora è:

$$R_S(t) = e^{-\lambda_S t} \quad (4.2)$$

con  $\lambda_S = \sum_i \lambda_i$ , e

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_S} \quad (4.3)$$

L'affidabilità di un sistema serie, dunque, può essere incrementata agendo sul componente meno affidabile:

$$R_S + \Delta R_S = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot [R_i + \Delta R_i] \cdot \dots \cdot R_n \quad (4.4)$$

da cui:

$$R_S + \Delta R_S = R_S + R_S \cdot \frac{\Delta R_i}{R_i} \quad (4.5)$$

e quindi:

$$\Delta R_S = R_S \cdot \frac{\Delta R_i}{R_i} \quad (4.6)$$

I sistemi ridondanti, o di tipo parallelo, sono caratterizzati da un livello di affidabilità superiore, benché ciò comporti una maggiore complessità e costi di primo impianto più elevati.

Tali sistemi possono essere di due tipi: sistemi caratterizzati da *ridondanza attiva*, nei quali i componenti ridondanti svolgono un ruolo funzionale, e sistemi caratterizzati da *ridondanza passiva*, i cui componenti entrano in funzione solo in caso di guasto<sup>1</sup>.

Nel caso di ridondanza attiva, deve valere per il sistema e per i singoli componenti la relazione  $R(t) + F(t) = 1$ , e dunque:

$$(R_1(t) + F_1(t)) \cdot (R_2(t) + F_2(t)) \cdot \dots = 1 \quad (4.7)$$

Sviluppando il prodotto nel caso di 3 componenti, per esempio, si ottiene:

$$R_1 R_2 R_3 + (R_1 R_2 F_3 + R_1 F_2 R_3 + F_1 R_2 R_3) + \\ + (R_1 F_2 F_3 + F_1 R_2 R_3 + F_1 F_2 R_3) + F_1 F_2 F_3 = 1$$

ove il primo addendo rappresenta il caso in cui i tre componenti sono funzionanti, il secondo il caso in cui due componenti sono funzionanti e uno guasto, il terzo il caso in cui due componenti su tre sono guasti e il quarto, infine, il caso in cui tutti i componenti sono guasti.

Se i tre componenti sono uguali, discende la seguente espressione:

$$R^3 + 3 \cdot R^2 \cdot F + 3 \cdot R \cdot F^2 + F^3 = 1$$

In particolare, se i componenti del sistema sono identici e indipendenti, interessa studiare il caso in cui il sistema sia funzionante se sono funzionanti  $m$  componenti su  $n$ . In tal caso, la affidabilità del sistema è caratterizzata da una distribuzione discreta di tipo binomiale:

$$R_S(t) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} R^k \cdot (1 - R)^{n-k} \quad (4.8)$$

L'inaffidabilità di un sistema parallelo è pari al prodotto delle inaffidabilità dei componenti:

$$F_S(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t) \quad (4.9)$$

da cui discende la relazione delle affidabilità:

$$1 - R_S(t) = (1 - R_1(t)) \cdot (1 - R_2(t)) \cdot \dots \cdot (1 - R_n(t)) \quad (4.10)$$

<sup>1</sup> L'intervento del dispositivo ridondante si manifesta grazie all'azione svolta da un apposito commutatore.

Nel caso in cui il tasso di guasto dei componenti è costante, è agevole calcolare il tasso di guasto di tutto il sistema. Per esempio, nel caso di 2 componenti uguali:

$$R_S(t) = 2 \cdot e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

$$f_S(t) = 2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} - 2 \cdot \lambda e^{-2\lambda t}$$

$$Z(t) = \frac{2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} - 2 \cdot \lambda e^{-2\lambda t}}{2 \cdot e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}}$$

Si trova, dunque, che l'affidabilità di un sistema parallelo dipende dal tempo, e quindi non è costante.

Con una dimostrazione analoga a quella vista per i sistemi serie, si può trovare, inoltre, che il miglioramento affidabilistico di un sistema parallelo passa per il miglioramento del suo componente migliore:

$$\frac{\Delta R_S}{\Delta R_i} = \frac{1 - R_S}{1 - R_i}$$

A titolo esemplificativo di quanto finora visto, si consideri il confronto fra due configurazioni tipiche, la serie-parallelo e la parallelo-serie.

Il primo tipo di configurazione è rappresentato nella Figura 4.1, ove si considerano 4 componenti uguali.

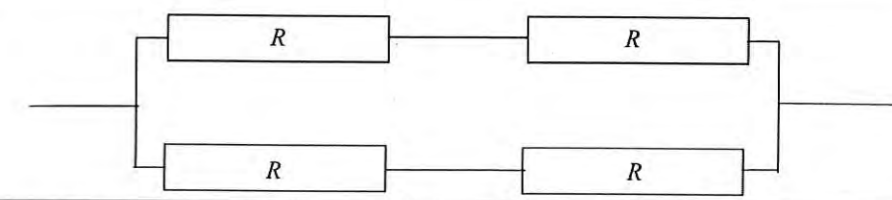


Figura 4.1 Configurazione serie-parallelo.

L'affidabilità del sistema dato in Figura 4.1 è:

$$1 - R_S = (1 - R^2) \cdot (1 - R^2)$$

$$R_S = 2 \cdot R^2 - R^4$$

Il secondo tipo di sistema è rappresentato nella Figura 4.2.

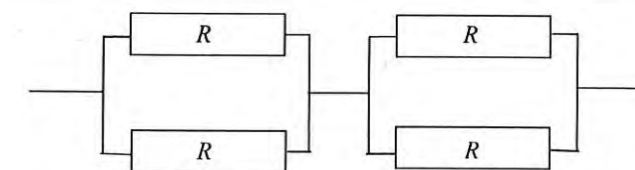


Figura 4.2 Configurazione parallelo-serie.

Nel caso in cui i componenti siano uguali, l'affidabilità del sistema è pari a:

$$R_S = (2 \cdot R - R^2) \cdot (2 \cdot R - R^2) = R^4 - 4 \cdot R^3 + 4 \cdot R^2$$

Dall'analisi dei due casi tipici appena visti emerge che la configurazione parallelo-serie è, a parità di legge di guasto, maggiormente affidabile.

I sistemi ridondanti di tipo passivo sono anche detti sistemi *stand by*. Essi sono caratterizzati dal fatto che durante il funzionamento alcuni componenti rimangono in stand by, appunto, ed entrano in funzione solamente in caso di guasto.

L'intervento dei componenti ridondanti passivi, come è già stato ricordato, è determinato dall'azione di un opportuno commutatore oppure dall'intervento umano.

Per valutare l'affidabilità di un sistema stand by, si supponga che esso sia costituito da soli 2 componenti, *A* e *B*. Possono verificarsi due situazioni:

1. al tempo *t*, il componente *A* funziona regolarmente; la probabilità di questo evento è pari a  $R_A(t)$ ;
2. il componente *A* si è guastato a un istante *x* (con  $0 \leq x \leq t$ ); il componente *B* ridondante è entrato regolarmente in funzione allo stesso istante e funziona al tempo *t*; la probabilità di questo secondo evento è pari a:

$$\int_0^t R_B(t-x) \cdot f_A(x) dx \quad (4.11)$$

Gli eventi 1 e 2 appena visti sono mutuamente esclusivi; dunque, l'affidabilità del sistema si può scrivere, in base al teorema degli eventi totali:

$$R_S(t) = R_A(t) + \int_0^t R_B(t-x) \cdot f_A(x) dx \quad (4.12)$$

Se le affidabilità sono espresse da funzioni esponenziali, e quindi il tasso di guasto dei due componenti *A* e *B* sono costanti e uguali, si ha:

$$R_S(t) = e^{-\lambda t} + \int_0^t e^{-\lambda(t-x)} \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda x} = e^{-\lambda t} + \lambda t \cdot e^{-\lambda t} \quad (4.13)$$

Il parametro *MTTF*, invece, è:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_S(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt + \int_0^{\infty} \lambda t \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{2}{\lambda} \quad (4.14)$$

Nel caso in cui i componenti siano diversi e abbiano un diverso tasso di guasto, risulta invece essere:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_A} + \frac{1}{\lambda_B} \quad (4.15)$$

Se si volesse tenere conto dell'affidabilità del commutatore che determina l'azionamento del componente ridondante di sicurezza, si dovrebbe introdurre il parametro corrispondente  $R_C$ ; l'affidabilità totale del sistema (sistema + commutatore), dunque, diverrebbe:

$$R_{ST} = R_S \cdot R_C \quad (4.16)$$

Se risulta essere  $R_C = 1$ , si verifica che l'affidabilità del sistema stand by è superiore a quella del sistema parallelo di tipo attivo.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] D. Babbo, L. Fedele, M. Tronci, *La Manutenzione: dalla manutenzione su guasto alla manutenzione migliorativa*, Ed. Esagrafica, Roma 2001.



## 5

## Politiche e strategie di manutenzione

La manutenzione si occupa di studiare – dal punto di vista progettuale e gestionale – come attuare azioni tecnico-esecutive, operative (o di controllo dell'esecuzione) e manageriali [1] al fine di garantire la disponibilità dei sistemi, l'economicità della conduzione dei sistemi, la loro sicurezza e l'impiego ottimale delle risorse ambientali.

Il raggiungimento di questo articolato obiettivo è reso possibile dalla attuazione di azioni gestionali e conservative che consistono in un complesso di attività tecniche e amministrative rivolte direttamente ad assicurare la continuità dell'esercizio dei sistemi e indirettamente a garantire, appunto, sicurezza, economicità e razionalità nell'impiego delle risorse naturali e ambientali.

È facile fare una certa confusione nell'identificazione dei vari approcci manutentivi, a causa delle diversità che gli autori si sforzano di mettere in luce, spesso sfumate e difficili da rendere compiutamente, a volte anche a causa delle traduzioni. Nella cultura italiana, anticipando alcuni concetti, non esiste una distinzione chiara tra *manutenzione produttiva* e *Total Productive Maintenance (TPM)*, così come non esiste chiarezza sul significato da attribuirsi alla cosiddetta *manutenzione migliorativa*. In genere ci si riferisce a esperienze maturate in settori merceologici specifici con il rigoroso innesto della cultura e delle tecniche produttive giapponesi [2]. Secondo alcuni autori, però, questa espressione starebbe a indicare la *Proactive Maintenance*, introdotta fra i primi da E. C. Fitch [3], che del TPM rappresenta soltanto un aspetto. In questa trattazione si intende fornire un quadro d'insieme dei diversi approcci manutentivi possibili, ponendo in risalto, quando possibile, le interrelazioni e le tappe che ne hanno segnato lo sviluppo.

Il concetto di manutenzione sottende un vasto insieme di problematiche, con innumerevoli risvolti operativi, al punto da rendere piuttosto difficile una schematizzazione a grandi linee dei possibili approcci che, nel tempo, hanno segnato lo sviluppo di questo settore.

Uno tra i primi aspetti da mettere in luce è la distinzione, che si evince dalle definizioni di politica e strategia manutentiva: gerarchicamente, quest'ultima si presenta in un secondo momento, caratterizzando l'approccio operativo ai problemi della manutenzione, da sviluppare secondo i criteri forniti dalla politica manutentiva adottata. La politica manutentiva sta, invece, a indicare l'atteggiamento complessivo che l'organizzazione assume nei confronti delle problematiche manutentive, che può poi esplicitarsi nell'utilizzo (a seconda dei reparti, della singola macchina, della convenienza economica ecc.) di varie strategie. È il caso, per esempio, della *Total Productive Maintenance (TPM)*, che è un approccio manutentivo sviluppato in Giappone in tempi abbastanza recenti. Gli aspetti innovativi sono, principalmente, il recepimento e l'applicazione delle teorie riguardanti la manutenzione a guasto, l'affidabilità e la manutenibilità, la particolare attenzione rivolta alle questioni legate all'efficienza economica del progetto e, in ultimo, l'introduzione di un onnicomprensivo sistema di manutenzione che va a toccare l'attività di tutti gli operatori.

Sempre a livello di politica, ma con un approccio meno invasivo rispetto al TPM, si cita la *Reliability Centered Maintenance (RCM)*. Agli inizi degli anni '60 del secolo scorso, quando si decise di effettuare un'indagine approfondita sull'efficienza della *manutenzione preventiva*, iniziò a prendere consistenza la possibilità di un'evoluzione dei criteri adottati fino a quel momento nella prevenzione dei guasti. Molto spesso, infatti, l'approccio della manutenzione preventiva era applicato dogmaticamente, programmando le revisioni a scadenze temporali prefissate, senza alcun riguardo per eventuali raffronti con i dati derivanti dall'esperienza maturata. La RCM, invece, ha come obiettivo quello di consolidare l'affidabilità intrinseca del progetto, con un'analisi complessa, che prevede un certo numero di fasi significative (formazione del personale, raccolta informazioni, identificazione e suddivisione del sistema, strategia, periodicità dei controlli, efficienza di costo) e che ha condotto alla piena affermazione della *manutenzione predittiva* come logica evoluzione della manutenzione preventiva.

Lo schema di Figura 5.1 fornisce un'idea delle relazioni gerarchiche che intercorrono tra i vari orientamenti. Dall'analisi dello schema si evince come l'attività manutentiva si sviluppa, già da tempo, in tre diverse direzioni, contemperando altrettante categorie di interventi:

- interventi che sono posti in essere solo dopo che il guasto si è presentato (manutenzione non programmata);
- interventi che scaturiscono da un logico e predeterminato piano programmatico (manutenzione programmata);
- interventi incentrati sul tentativo di dare luogo a un processo di miglioramento continuo nella gestione di queste problematiche (manutenzione migliorativa), a partire dalle procedure operative fino alla ridefinizione progressiva delle situazioni critiche, basandosi sull'esperienza acquisita.

Particolare importanza rivestono le possibili varianti della manutenzione preventiva:

- manutenzione programmata*, attuata a intervalli predeterminati, in base al numero di operazioni, al chilometraggio ecc., basata sull'utilizzo di dati affidabilistici (*MTBF*, tasso di guasto ecc.);

2. *manutenzione su condizione* (CBM), effettuata in base alla conoscenza delle effettive condizioni del sistema, maturata grazie a un'attività di *Condition Monitoring*.
3. *manutenzione predittiva*, basata sulla capacità di prevedere il degrado nel tempo a partire dal rilievo di alcuni parametri significativi.

Il processo storico che ha portato verso l'approfondimento delle tematiche affidabilità prende le mosse negli anni '40 del secolo scorso, a causa delle necessità operative dell'ultima guerra: enti militari e civili degli Stati Uniti realizzarono, in più fasi, uno sforzo organizzativo che prevedeva la creazione di dipartimenti appositamente strutturati per lo studio di affidabilità, sicurezza, manutenibilità e delle loro interrelazioni. Di manutenibilità come caratteristica di un sistema e come disciplina ingegneristica si cominciò a parlare agli inizi degli anni '50 con l'obiettivo di ridurre i costi di manutenzione.

Fino al 1960 non c'è stato alcuno sforzo che mirasse a effettuare un'indagine approfondita sull'efficienza della manutenzione preventiva, intesa come un processo utile per evitare guasti [4]. Coloro che si occupavano di questo tipo di approccio manutentivo sembravano così sicuri della correttezza del proprio operato, da non curarsi minimamente né di verificarlo né tantomeno di operare una standardizzazione per via induttiva in base all'esperienza acquisita. Intorno alla fine degli anni '50, l'esigenza di dover gestire flotte di aerei a reazione accrebbe l'interesse delle compagnie aeree verso un miglioramento dell'efficienza dell'attività manutentiva nel trasporto aereo.

Poiché era credenza diffusa che l'affidabilità di un sistema diminuisse nel tempo, i primi studi esaminarono la relazione tra affidabilità ed età, mediante tecniche già utilizzate nel settore delle assicurazioni sulla vita. I risultati prodotti da questi studi sembrarono confutare alcune diffuse certezze: si scoprì, infatti, un numero elevato di casi di "mortalità infantile" riguardanti un campione rappresentativo di diverse categorie di apparati; ciò sembrava comprensibile nel caso dei dispositivi elettronici, molto meno nel caso dei sistemi meccanici.

Nel 1965 alcuni studi effettuati dalle compagnie aeree dimostrarono che le sostituzioni programmate di sistemi complessi, in base ai criteri della manutenzione preventiva, non avevano alcun effetto sulla affidabilità; queste considerazioni portarono alla definizione di un nuovo approccio manutentivo, che fu sviluppato nel 1968. Si pensò di applicare, a questo scopo, un albero logico delle decisioni, il quale permetteva di evidenziare immediatamente l'importanza dell'impatto dell'inaffidabilità sulle varie operazioni.

Questa tecnica fu utilizzata quello stesso anno, quando rappresentanti delle compagnie aeree e degli industriali costituirono il *Maintenance Steering Group* (MSG), il cui primo atto fu quello di redigere un documento, l'MSG-1, *Handbook: Maintenance Evaluation and Program Development*, che conteneva le procedure necessarie per sviluppare un programma di manutenzione preventiva per il Boeing 747; metodi analoghi furono utilizzati per altri velivoli (DC-10, L-1011, Concorde e A-300). Successivamente si decise di aggiornare alcuni dettagli, rendendo il documento in questione uno strumento utile per implementare i programmi manutentivi per tutti gli aerei di nuova concezione; il risultato di questo sforzo, pubblicato nel 1970, è noto come MSG-2, *Airline/Manufacturers Maintenance Program Planning Document*.

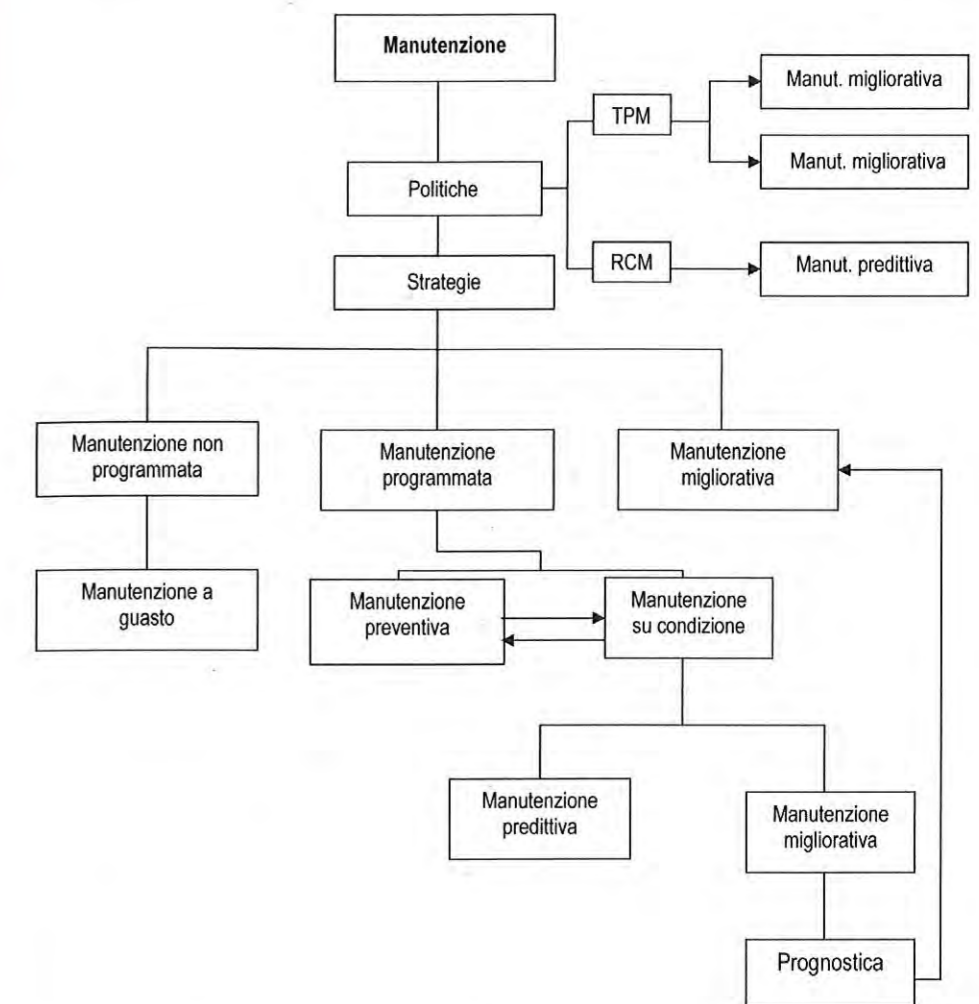


Figura 5.1 Possibile schematizzazione delle politiche e delle strategie di manutenzione.

Queste metodologie furono inizialmente applicate agli aerei della Marina Militare (P-3A, S-3A, F-4J) e furono tradotte in una serie di manuali che culminarono nel NAVAIR 00-25-400, un documento che è stato utilizzato per ridefinire le specifiche della manutenzione preventiva sulla maggior parte dei velivoli della US Navy. Sebbene molti dei concetti espressi nell'MSG-2 avessero rivoluzionato le procedure per lo sviluppo dei programmi manutentivi, si trascurò di riportarne alcuni aspetti nel NAVAIR 00-25-400: per esempio le procedure per definire la frequenza delle ispezioni non furono trascritte. Per colmare questo tipo di lacune e per aggiornare l'MSG-2, il Department of Defense (DoD) statunitense sollecitò gli stessi autori dei suddetti documenti a predisporre una relazione complessiva su queste tematiche: tale

rapporto, denominato *Reliability Centered Maintenance* (RCM), è del 29 dicembre 1978 e illustra in maniera completa gli scopi e le procedure di questo programma.

## 5.1 Reliability Centered Maintenance - RCM

La RCM nasce dal tentativo di trovare risposte a interrogativi che fino a quel momento erano stati parzialmente ignorati:

- cosa fa l'hardware?
- in che tipo di avarie funzionali incorre?
- quali sono le probabili conseguenze?
- che cosa si può fare per prevenirle?

Molto spesso l'approccio della manutenzione preventiva era applicato dogmaticamente, programmando le revisioni a scadenze temporali prefissate, senza alcun riguardo per eventuali raffronti con i dati derivanti dall'esperienza maturata. La RCM ha come obiettivo quello di consolidare l'affidabilità intrinseca del progetto; piuttosto che focalizzare l'attenzione direttamente su ciascun sottosistema chiedendosi che tipo di manutenzione preventiva possa essere attuata, la RCM suggerisce un approccio per così dire globale e si basa sull'applicazione delle seguenti fasi:

1. suddividere il prodotto in sistemi e sottosistemi da analizzare separatamente;
2. identificare gli elementi funzionali significativi;
3. determinare, per ogni elemento significativo, i requisiti manutentivi sulla base dell'analisi delle sue funzioni e dei possibili modi di guasto;
4. determinare quando, come e da chi debba essere svolto ciascun compito;
5. utilizzare le informazioni ricavabili dall'esperienza e le più idonee tecniche analitiche per migliorare di volta in volta l'applicazione delle fasi precedenti.

Si tratta, quindi, di considerare l'intero programma di manutenzione preventiva, indipendentemente dal livello delle risorse assegnate per adempiere alle specifiche, valutandone tutti gli aspetti. Tutto ciò richiede una struttura organizzativa integrata ed efficiente, che sia completamente responsabile per gli aspetti di pianificazione e di management della manutenzione.

La RCM mira alla definizione di un programma di manutenzione preventiva per l'intero sistema e sarebbe quindi errato focalizzare l'attenzione su ciascun livello di sottosistema senza prima aver ben compreso le interfacce esistenti in corrispondenza di esso nello svolgere una funzione la cui utilità è sentita dall'intero sistema.

Si tratta di un'analisi complessa, di cui è possibile segnalare le fasi più significative.

1. *Formazione del personale.* La preparazione di un programma manutentivo basato sulla RCM richiede un periodo iniziale dedicato all'apprendimento dei concetti fondamentali di questa metodologia. È importante anche che l'analista abbia una conoscenza approfondita del progetto, delle caratteristiche funzionali e delle esperienze operative del sistema in studio; in questo senso può essere utile un approccio che preveda una forma di collaborazione con i supervisori in possesso dell'esperienza richiesta sulle modalità di guasto, così da permettere un'analisi di buona qualità. Non è consigliabile utilizzare, per la formazione del personale, do-

cumentazioni preesistenti riguardanti il programma di manutenzione: ciò che si richiede è, invece, un approccio innovativo, una ricerca creativa dei requisiti più adatti e di ciò che dovrebbe essere fatto, piuttosto che un riesame di ciò che è già stato fatto.

2. *Raccolta di informazioni.* Si richiedono le informazioni tecniche per ogni sistema e per i suoi componenti: informazioni descrittive (caratteristiche progettuali, schemi di sistema, disegni) e operative (istruzioni per la manutenzione, standard delle prestazioni, dati di guasto).
3. *Identificazione e suddivisione del sistema.* Uno dei primi compiti da assolvere consiste nell'identificare tutti i sottosistemi presenti, effettuandone una suddivisione logica attraverso la predisposizione di una *System Work Breakdown Structure* (SWBS). Questa scomposizione va fatta per l'intero sistema, e non per ogni singolo gruppo dell'SWBS. Quando si parla di sistema, sono possibili due interpretazioni: come raggruppamento di elementi simili o come un'unità organica e funzionale. In generale è la seconda scelta quella che garantisce una maggiore semplicità di analisi, unendo gli input agli output; il primo approccio potrebbe porre gli input in un sistema e gli output in un altro. Ciò che importa, comunque, è che l'analista e il revisore tecnico finale siano d'accordo sulla struttura da dare al sistema.
4. *Analisi dei sistemi.* La RCM prevede un'analisi dei requisiti manutentivi dei vari sottosistemi, la quale prosegua fino a un livello che è funzione della complessità del sistema e dell'esperienza dell'analista.
5. *Strategia.* La strategia descrive la metodologia da seguire quando ci si rende conto di non essere in possesso di informazioni sufficienti: l'idea è che se non si può prendere un decisione finale, bisogna comunque optare verso l'alternativa che minimizza il rischio, per poi eventualmente eseguire un aggiornamento in presenza di nuovi elementi utili. Lo strumento operativo che consente questa procedura è l'*albero logico* delle decisioni, in cui si utilizzano una serie di domande (a cui è possibile rispondere solo sì o no) per caratterizzare le eventuali avarie funzionali. Le risposte permetteranno di formulare un giudizio sulla criticità di ciascun modo di guasto e sulla possibilità di individuare il requisito manutentivo che ne permetta un efficiente controllo.
6. *Periodicità dei controlli.* Studi avanzati in questo settore hanno rivelato che, molto spesso, non esistono correlazioni inverse tra il tempo e l'affidabilità: ciò non significa che i singoli componenti non si usurano, bensì che gli istanti di tempo in cui si presentano i guasti sono distribuiti in modo da rendere inutile un programma di manutenzione preventiva. Al limite, come si vedrà, un approccio del genere può condurre all'incremento del tasso medio di guasto. A ogni modo, se si opta per una serie di revisioni a scadenza fissa, è importante scegliere oculatamente la frequenza con cui procedere all'attività manutentiva: spesso, infatti, l'*MTBF* non costituisce un dato significativo in questo senso, in quanto non fornisce indicazioni su come l'affidabilità varia nel tempo, ma solo sull'età media in cui si presenta il guasto. In quest'ottica, risulta conveniente adottare una periodicità iniziale dettata dall'esperienza, ipotizzando una certa funzione di distribuzione dei guasti, per poi modificarla in base alle conoscenze acquisite operativamente sull'hardware.

7. *Efficienza di costo.* La problematica economica nella fase progettuale, che è decisiva in un settore commerciale, viene spesso sottovalutata in campo militare, ma la riduzione dei budget che caratterizza questi ultimi anni l'ha riportata prepotentemente in primo piano. Si parla, allora, di efficienza di costo, proprio intendendo misurare l'efficienza raggiunta nell'utilizzare delle risorse per ottenere certi risultati. In pratica bisogna valutare i costi annuali derivanti dallo svolgimento delle singole attività manutentive e compararli con i costi diretti annuali dei guasti che ciascuna attività mira a prevenire.

Riassumendo, la RCM è un insieme di regole, di metodi e di procedure per il progetto e la gestione economica della manutenzione, i cui principi mirano a incrementare rapidamente e a sostenere una crescita della disponibilità e della sicurezza degli impianti. In sostanza la RCM utilizza come base la teoria dell'affidabilità, ossia un modello di analisi delle cause di guasto, che consente al manutentore di definire i piani e le modalità di gestione degli interventi.

Ciò si ottiene praticando la RCM su tre livelli [2]:

1. stimolando la valutazione delle conseguenze dei guasti, in modo da integrare le decisioni circa la sicurezza, i parametri economici e i costi di manutenzione;
2. sviluppando la ricerca sui modelli di comportamento al guasto dei sistemi complessi, in modo da avere un nuovo approccio nella scelta delle più opportune politiche di prevenzione, o nell'individuazione di attività alternative, nel caso la manutenzione preventiva non sia applicabile;
3. combinando queste attività, in un processo che garantisca la produzione di scelte ottimali.

## 5.2 Manutenzione produttiva o Total Productive Maintenance - TPM

La *Total Productive Maintenance* è stata definita come [Nakajima, 1984] una forma di "manutenzione produttiva svolta da tutti i lavoratori dell'azienda organizzati in piccoli gruppi di attività".

Non si tratta di una vera e propria politica manutentiva, ma di un insieme di regole e di comportamenti organizzativi, volti al raggiungimento della qualità e dell'efficienza della manutenzione in apparati produttivi complessi nei quali le tradizionali procedure non sono più sufficienti per la gestione dei fenomeni e occorre coinvolgere tutte le strutture aziendali, mobilitando ciascuno verso il raggiungimento dell'eccellenza.

In altri termini [2], si tratta di un approccio globale ai problemi della organizzazione, nell'ottica del miglioramento delle prestazioni dei mezzi produttivi e degli impianti, che tiene conto della matrice giapponese e delle esperienze applicative fatte nell'industria italiana. Si è, cioè, capita l'importanza di riportare sotto l'unica responsabilità di chi coordina, al livello operativo, un segmento di produzione, alcuni dei principali fattori che determinano il successo: vale a dire, la manutenzione di linea e il controllo della qualità.

Si manifesta, quindi, un nuovo ruolo sul piano organizzativo per la funzione manutenzione, un ruolo di servizio per la produzione qualificato e proteso verso il mi-

glioramento continuo della efficienza e della efficacia. In un simile contesto, il responsabile di un impianto non può più attribuire la responsabilità di taluni insuccessi alla manutenzione, perché egli decide gli indirizzi e le scelte che determinano la disponibilità dell'impianto. Questa stretta rispondenza della manutenzione alle esigenze della produzione, insieme a un forte orientamento al miglioramento continuo e alla prevenzione mediante il monitoraggio, sono racchiusi nel concetto di TPM.

In questo contesto, il TPM riconosce l'esistenza, all'interno dell'azienda, di diverse situazioni manutentive, che possono richiedere differenti tecniche per raggiungere un buon risultato; conseguentemente, essa utilizza differenti metodologie, che possono differire da impianto a impianto o da macchina a macchina, purché efficaci in una data situazione. Molte tra le strategie utilizzate non sono certamente nuove: ciò che è innovativo è la cultura giapponese, l'impegno che essa prevede per tutti i dipendenti.

Il maggior contributo del TPM nei confronti della teoria della manutenzione è dato dal tentativo di abbattere la barriera artificiale, o linea di demarcazione, esistente all'interno di un'azienda, tra la manutenzione e i reparti di produzione. L'implementazione del TPM prevede, cioè, l'abbandono definitivo della mentalità "tu rompi, io aggiusto", con conseguente aumento dell'efficienza produttiva [2].

Una completa definizione della TPM, quindi, comprende [Nakajima, 1984]:

- a) il tentativo di massimizzare l'efficacia dei mezzi produttivi in termini di efficienza economica e redditività;
- b) la concretizzazione di un complesso sistema di manutenzione produttiva, che includa una manutenzione preventiva e un miglioramento continuo della manutentività per l'intero ciclo di vita di ciascun componente;
- c) il coinvolgimento di tutti i dipendenti dell'azienda, dal top management in giù, nell'implementazione della manutenzione produttiva;
- d) la promozione della manutenzione attraverso piccoli gruppi di attività.

La manutenzione produttiva comporta una capacità professionale di tipo diffuso, volta alla prevenzione, alla conduzione del sistema produttivo e al riassorbimento in tempi rapidi delle fermate. Questo si ottiene ricomponendo sul campo le responsabilità di gestione del sistema produttivo, non solo per ciò che riguarda le attività tradizionali demandate all'operatore di produzione, ma anche la responsabilità dell'attività manutentiva e della qualità del prodotto.

L'ottimizzazione della politica aziendale di manutenzione dovrebbe essere perseguita nel quadro del miglioramento della redditività aziendale e del servizio erogato e, in particolare, del miglioramento continuo del risultato operativo. Tale miglioramento continuo è espressione di una stretta sinergia tra manutenzione e produzione che si concretizza nella manutenzione produttiva.

## 5.3 Strategie manutentive

L'attività manutentiva mira a ottenere una certa continuità del processo produttivo; quest'obiettivo, in passato, era perseguito attraverso ridondanze operative e funzionali, oppure garantendo un calcolato eccesso di capacità produttiva o, infine, applicando un aggressivo programma di revisione e sostituzione dei sistemi critici.

Tutti questi approcci si sono dimostrati parzialmente inefficienti: sistemi ridon-

danti e capacità in eccesso immobilizzano capitali che potrebbero essere più proficuamente utilizzati per l'attività produttiva, mentre portare avanti una politica di revisioni eccessivamente prudente si è rivelato un metodo piuttosto costoso per ottenere gli standard richiesti. La manutenzione si è dunque trasformata, in termini di missione, da attività prevalentemente operativa di riparazione, a complesso sistema gestionale, orientato, più che altro, alla prevenzione del guasto. Si tratta di un passaggio non facile, che implica un considerevole mutamento culturale del management, in generale, e del manutentore, in particolare.

### 5.3.1 La manutenzione a guasto o correttiva

La manutenzione a guasto o *Breakdown Maintenance* rappresenta certamente il modo di intervenire più antico, spontaneo e semplice, che vede nella riparazione del guasto l'occasione per la piena affermazione della professionalità dei manutentori. Questa, a sua volta, viene intesa come prontezza della risposta organizzativa, come disponibilità e abilità degli operatori.

Si è già visto come si debba ricorrere a questo tipo di approccio, piuttosto drastico, nel caso di guasto improvviso o catastrofico, cioè in condizioni che una buona attività manutentiva dovrebbe scongiurare a priori. Ci si basa sull'idea secondo cui, in presenza di sistemi non critici e facili da rimpiazzare a basso costo, è conveniente aspettare che il guasto si presenti, prima di intervenire. Può accadere, in effetti, che la riduzione dei tempi di fermata e l'aumento della disponibilità non sia tale da compensare il maggior onere derivante da strategie di intervento più sofisticate.

Si tratta, dunque, di individuare il componente guasto (compito di immediata realizzazione per un manutentore esperto) e prendere tutte le misure atte a ristabilire l'integrità operativa del sistema.

Sfortunatamente questa strategia presenta numerosi aspetti discutibili:

- i fermi macchina si presentano in maniera casuale e spesso nel momento meno opportuno;
- un guasto grave e inaspettato su un componente può avere conseguenze deleterie su altri elementi del sistema, compromettendone la funzionalità con un aggravio consistente dei costi;
- riparazioni non programmate comportano spesso tempi lunghi (per ottenere le parti di ricambio, assegnare il tecnico adatto ecc.), ostacolando la produzione e tenendo occupato poco proficuamente il personale tecnico.

### 5.3.2 La manutenzione preventiva

Nell'ambito della manutenzione preventiva (*Preventive Maintenance*) rientrano tutti quegli interventi che vengono eseguiti in base alla convinzione che sia determinabile la vita media di qualche componente e che si possa anticipare il guasto di un sistema complesso (macchina o linea di produzione), predefinendo il momento dell'intervento, in genere di sostituzione, in funzione del tempo di vita attesa del componente stesso. Tale concezione ha avuto un grande successo negli anni '60 e '70, perché rispondeva a un'esigenza assai sentita dai manutentori, ossia dare una base di "scientificità" e di programmabilità al proprio impegno [5]. Essa indubbiamente ha favori-

to la crescita culturale e organizzativa della funzione manutenzione, che ha dovuto dotarsi dei primi strumenti di programmazione. Non si tardò, comunque, a constatare come tale pratica generalizzata facesse salire i costi in termini di impiego sia delle risorse umane sia dei materiali tecnici, senza incidere sostanzialmente sulla disponibilità degli impianti.

È un tipo di manutenzione che si trova un gradino più su di quella precedente, perché in questo caso il sistema meccanico è ancora funzionante ma le sue prestazioni risultano deteriorate fino ad arrivare allo stato di guasto imminente, suggerendo di operare ispezioni, revisioni e attività analoghe, suddivisibili in tre classi [3]:

- normale manutenzione dei sottosistemi operanti correttamente e dei meccanismi che richiedono una certa cura, mediante lubrificazione, pulizia, regolazione, cambi, ecc;
- ricerca dei componenti guasti ridondanti ed eventuale riparazione o sostituzione;
- revisione o sostituzione dei componenti usurati.

Due sono le possibili filosofie da seguire per implementare un'attività di *failure avoidance*:

- su condizione*: è un atteggiamento che riflette la strategia del "se funziona non si tocca", promuove la manutenzione solo quando necessaria ed evita di bloccare capitali ingenti per garantirsi le parti di ricambio occorrenti a coprire tutte le eventualità;
- secondo un programma*: manutenzione effettuata a intervalli costanti (*time based maintenance*), a date stabilite di calendario (*hard time maintenance*) o sulla base di parametri di utilizzo del macchinario (ore di funzionamento o chilometri percorsi), per assicurare al sistema un sufficiente livello di affidabilità, sicurezza e prestazioni.

Nel caso in cui un componente venga sostituito in base al programma di manutenzione preventiva, esso viene "rimosso" dalla zona a guasto casuale della curva a vasca da bagno, dove il tasso di guasto è al minimo, e riportato nella regione dei guasti infantili, cioè proprio dove il tasso di guasto raggiunge il valore massimo.

Si può concludere, allora, che programmare la manutenzione di un sistema meccanico che segue il modello della curva a vasca da bagno porta a un aumento della probabilità complessiva di guasto: si tratta dunque di un'attività molto dispendiosa, che finisce per abbassare l'affidabilità del sistema e che risulta in conflitto con l'obiettivo, perseguito dall'azienda, di incrementare il tempo medio tra due successive fermate dell'impianto.

### 5.3.3 La manutenzione predittiva

Una visione più moderna delle problematiche manutentive ha condotto all'utilizzo di tecniche non distruttive per testare i sistemi/apparati allo scopo di identificare, con un consistente anticipo, la presenza di guasti, così da poter programmare una revisione solo quando le condizioni della macchina ne determinano la necessità. Quest'approccio è detto *manutenzione predittiva* e comporta numerosi vantaggi: si tratta di una manutenzione *on-condition* che prevede la programmazione in tempo reale degli in-

terventi manutentivi, in funzione delle condizioni della macchina e dei requisiti da rispettare, permettendo di evitare *downtime* non previsti o catastrofiche reazioni a catena migliorando l'affidabilità globale del sistema per giunta a un costo ridotto.

È un tipo di manutenzione che mira a predire e identificare i guasti incipienti, non alterando il ciclo di guasto né estendendo il valore di *MTBF* del sistema, bensì informando puntualmente il manutentore dei problemi che richiedano la programmazione di opportune azioni correttive. Da questo punto di vista si può inquadrare questa come una manutenzione "reattiva". L'assunto di partenza è che solo raramente un componente giunge al guasto in modo improvviso; nella maggioranza dei casi (soprattutto per sistemi meccanici, idraulici e pneumatici) il guasto costituisce il punto di arrivo di un deterioramento progressivo.

La manutenzione secondo condizione viene definita sulla base di parametri, che consentono di capire qual è lo stato effettivo della macchina e che sono rilevati attraverso una serie di misure, ispezioni visive, controlli non distruttivi, prove operative o funzionali senza, in genere, dovere smontare i componenti del sistema meccanico. Queste azioni, effettuate a intervalli regolari definiti per ogni caratteristica, consentono di rilevare quando le prestazioni di un componente iniziano a degradare e, sulla base di queste informazioni, di decidere se effettuare un intervento di riparazione o di sostituzione prima che si verifichi il guasto.

Le tecniche su cui si basa questa pratica manutentiva sono, principalmente, le seguenti:

- *monitoraggio visivo*: alla ricerca di eventuali cricche di fatica, difetti di saldatura, disallineamenti ecc.;
- *monitoraggio della rispondenza alle specifiche*: verificare che pressione, flusso, temperatura, velocità, assumano valori prossimi a quelli di progetto;
- *monitoraggio delle vibrazioni e del rumore*;
- *monitoraggio dei detriti da usura (debris)*.

Questa strategia di manutenzione non utilizza metodi probabilistici per effettuare una prognosi dei guasti, ma adopera l'andamento di trend dei parametri monitorati per predire i guasti potenziali. La manutenzione secondo condizione va quindi intesa come un processo diagnostico che, fornendo indicazioni sullo stato di salute della macchina, consente di pianificare interventi di revisione, basandosi sulle reali condizioni dei componenti piuttosto che sul tempo di funzionamento.

È una filosofia manutentiva che, oltre a permettere indubbi vantaggi economici e operativi, ha anche rilevanti implicazioni sulla progettazione: infatti, per ridurre al minimo i tempi passivi dovuti ai frequenti controlli, è opportuno che il sistema meccanico sia dotato di tutta una serie di accessi necessari alla determinazione dello stato di efficienza dei componenti. L'individuazione delle parti da sottoporre a revisione, l'identificazione dei parametri significativi nonché la definizione delle frequenze di controllo sono tutte attività che devono essere sviluppate possibilmente in parallelo all'avanzamento del progetto. I benefici ottenibili non sono esclusivamente economici: il successo della *Condition Based Maintenance* (CBM) non solo previene la rottura e la fermata della macchina, ma aiuta anche ad aumentare la sicurezza degli impianti e dei dipendenti, ad assicurare che l'impianto sia efficacemente utilizzato, comportando una serie di altri vantaggi non trascurabili, riassunti nella Tabella 5.1.

**Tabella 5.1** Benefici associati alla CBM [5]

Sicurezza	Il tempo di risposta della CBM permette il fermo macchina prima di raggiungere condizioni critiche
Aumento della disponibilità dell'impianto, minori costi di manutenzione	Si possono aumentare gli intervalli tra due successive revisioni. Il downtime può essere ridotto avendo predisposto le risorse
Maggiore efficienza dell'impianto e migliore qualità	Si possono variare le condizioni di funzionamento delle macchine per ottenere un compromesso tra quanto si deve produrre e lo stato della macchina
Migliore possibilità di negoziazione con i fabbricanti	Poiché le condizioni si misurano quando il macchinario è nuovo, alla fine della garanzia e dopo la revisione è possibile avere dei dati di paragone
Migliori relazioni con i clienti	Sapendo in anticipo quando un guasto si presenterà, è possibile organizzare meglio la produzione
Opportunità di progettare meglio impianti futuri	L'esperienza opportunamente raccolta in file storiche può servire a questo scopo
Aumento della soddisfazione nel lavoro	Il manager di manutenzione è in grado di pianificare meglio il lavoro del personale al suo servizio

### 5.3.4 La manutenzione migliorativa

Il limite della manutenzione predittiva va individuato nel suo essere orientata al guasto (*failure oriented*); è più efficace rispetto agli approcci tradizionali, ma lascia ampi spazi di miglioramento in termini di affidabilità e riduzione dei costi. Questa strategia pretenderebbe di fornire all'operatore una segnalazione di allerta con un anticipo sufficiente a permettere di programmare le riparazioni necessarie, minimizzando il downtime. Ciò dipende, naturalmente, dal programma di monitoraggio e dal tempo necessario per ottenere i risultati delle analisi; se si rendono indispensabili analisi più approfondite in presenza di dati controversi, le condizioni di guasto incipiente possono nel frattempo trasformarsi e portare il sistema in condizioni, ben più preoccupanti, di guasto imminente. Reali benefici si possono conseguire, invece, attraverso un altro tipo di manutenzione "su condizione": la manutenzione migliorativa (o produttiva) (*Proactive Maintenance*), ove il termine "migliorativa", si oppone al concetto di reazione, nel senso che si riferisce a un'azione la quale si svolge prima dell'evento critico.

Si tratta di un'attività di pre-allerta che si realizza in anticipo rispetto a qualsiasi danno relativo al materiale o alla prestazione del sistema; cioè di una serie di azioni miranti a correggere quelle condizioni che possono condurre al deterioramento del sistema. Invece di analizzare l'alterazione del materiale o della performance per valutare l'entità delle condizioni di guasto incipiente o imminente, la manutenzione migliorativa si propone di individuare e correggere valori anomali delle cause prime di guasto che potrebbero portare a condizioni di instabilità operativa. Queste ultime altro non sono che le "radici del guasto" e segnalano quel primo livello di malfunzionamento che si è chiamato "guasto condizionale". Per esempio, i cuscinetti dei motori elettrici sono spesso stati indicati come le vere "cause" di guasto, mentre, in effetti, sono le correnti vaganti che attraversano l'albero rotante che, generando un arco elettrico, finiscono per provocare la vaiolatura delle guide dei cuscinetti: in questo caso la causa prima del guasto sono le correnti parassite e non i cuscinetti difettosi.

Questa pratica manutentiva costituisce la prima linea di difesa contro il degrado del materiale (guasto incipiente) e il conseguente indebolimento delle prestazioni (guasto imminente) che inevitabilmente conducono al *breakdown*; riesce così a garantire un'alta affidabilità con elevati tempi di utilizzo per i vari componenti del sistema, incidendo in maniera rilevante sui valori del tasso di guasto e di *MTBF* del sistema (Figura 5.2). Senza contare che, intervenendo con un anticipo così marcato, si riesce a evitare sia il degrado funzionale che precede il guasto, sia il verificarsi di molti guasti secondari che si potrebbero presentare sugli elementi adiacenti a quello in esame (per esempio a causa delle vibrazioni indotte da quest'ultimo).

Nella fase iniziale l'operatore è chiamato a un'attività di monitoraggio dei parametri chiave, che permetta di valutare la criticità delle cause prime di guasto: se si identifica una condizione di instabilità vuol dire che si è in presenza di un guasto condizionale; segue poi una fase di correzione dei fattori critici individuati.

Tutto ciò richiede una buona familiarità con il sistema in studio da parte del personale addetto alla manutenzione, il quale deve avere una comprensione profonda dei principi operativi e delle caratteristiche, per poter correttamente individuare le radici del guasto.

Riassumendo, si può affermare che la manutenzione migliorativa richiede le seguenti azioni [3]:

- monitoraggio dei parametri chiave indicativi della salute del sistema (cioè le condizioni operative delle cause prime di guasto), per esempio il livello di contaminazione del fluido lubrificante;
- definizione dei valori di soglia, cioè dei valori massimi accettabili per ogni parametro, per esempio il massimo livello di contaminazione ISO o la massima temperatura;
- riconoscimento e interpretazione di eventuali valori anomali di questi parametri chiave, che indicano una certa instabilità delle condizioni operative, per esempio livello ISO di contaminazione al di sopra della soglia limite;
- precisazione dei mezzi e dei metodi da applicare per correggere le cause prime di guasto e ripristinare la stabilità del sistema, per esempio migliorare il sistema di filtraggio e le procedure di ricambio dell'olio.

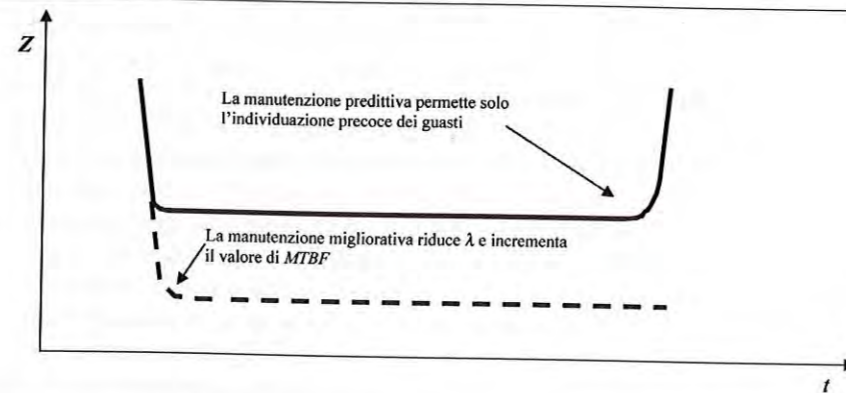


Figura 5.2 Effetto sul tasso di guasto della manutenzione migliorativa.

## 5.4 La scelta della strategia di manutenzione più opportuna

L'attuazione della politica aziendale di manutenzione richiede criteri di progettazione della manutenzione improntati alla logica della minimizzazione del costo globale (costi propri e costi indotti). Tale logica presiede a tutte le azioni della manutenzione durante il ciclo di vita del bene e nel rispetto dei vincoli legislativi per quanto riguarda la sicurezza e il rispetto dell'ambiente.

Per avere un'idea della diffusione di alcune strategie manutentive in Italia, va detto che, attualmente, la manutenzione a guasto è ancora molto diffusa e pesa per circa il 50%. La prevenzione di tipo statistico-opportunistic si attesta sul 20-30%, mentre il resto è manutenzione su condizione.

Quest'ultima, nelle sue diverse forme, è comunque la strategia verso cui tutte le aziende di processo e manifatturiere si stanno indirizzando.

Lo schema proposto riassume brevemente le logiche che sono alla base della scelta delle politiche manutentive (Figura 5.3).

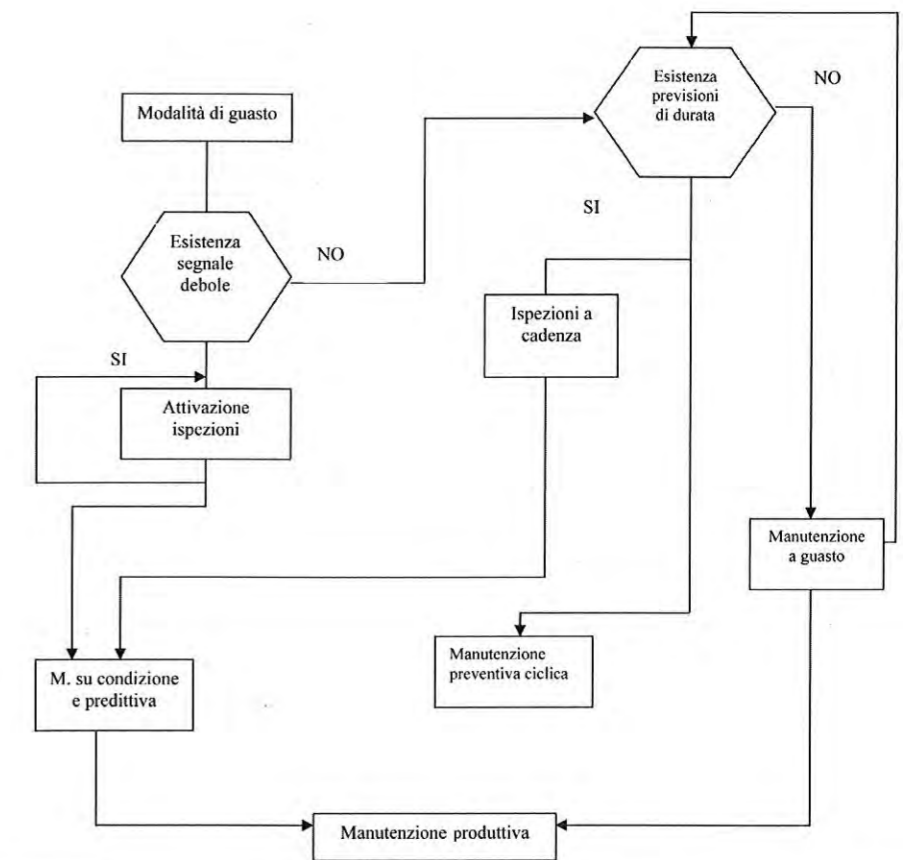


Figura 5.3 Logica per la definizione della strategia manutentiva [2].

Se si esamina il primo blocco, che individua una precisa modalità di guasto su un determinato componente, (a partire da esso) ci si pone la domanda: "Esiste il segnale debole?", cioè, il progredire del guasto mostra "segnali" in qualche modo percepibili o misurabili? In caso affermativo, verificata la fattibilità del controllo, si attiva il monitoraggio del segnale debole per conoscerne l'andamento temporale ed eseguire l'intervento manutentivo nel momento più opportuno, realizzando la situazione tipica della manutenzione su condizione. Se il segnale debole esiste ma non è monitorabile, ci si pone una diversa domanda: "Esiste una stima della durata del componente?". In caso affermativo si hanno ancora due possibilità:

1. attivare ispezioni programmate e strumentate in funzione della ispezionabilità del componente, ritornando alla manutenzione su condizione;
2. eseguire sostituzioni a tempi prefissati, realizzando la manutenzione preventiva ciclica.

Infine, quando non esiste segnale monitorabile e non si hanno stime sulla vita del componente, non rimane che attivare la manutenzione a guasto. In relazione al comportamento del sistema, esiste un mix ottimale di queste politiche che costituiscono la base della manutenzione produttiva.

La scelta delle diverse strategie manutentive è determinata dal grado di criticità che il bene riveste nel ciclo produttivo dell'azienda e anche dalla valutazione economica delle possibili scelte, fatti salvi i principi di sicurezza delle persone e dell'ambiente. In questo senso, risulta molto utile l'utilizzo di metodologie come l'Analisi costi-efficacia (ACE) o l'Analisi costi-Benefici (ACB). Tali metodi presumono la valutazione del Costo Globale di Manutenzione, il quale esprime sia il costo che l'azienda deve sostenere per effettuare una certa politica manutentiva (costo proprio di manutenzione) sia tutta una serie di costi indotti dal guasto. Il costo proprio della semplice manutenzione a guasto è espresso da a) manodopera, b) materiali e ricambi, c) attrezzature e d) costi generali di struttura.

A questi costi si aggiungono:

1. per la manutenzione preventiva ciclica, i costi di preparazione e programmazione lavori;
2. per la manutenzione su condizione, i costi di preparazione e programmazione, i costi di controlli e ispezioni e quelli relativi agli strumenti per il monitoraggio del bene.

I costi indotti dal tipo di politica di intervento sono gli immobilizzi dei ricambi in magazzino (giacenza valorizzata per tasso di possesso) che sono tanto più elevati quanto minore è la programmazione dei lavori. I costi indotti dal guasto sono:

1. il costo di indisponibilità del bene e la conseguente mancata produzione;
2. il costo di immobilizzo delle scorte di prodotto finito o produzione non a specifica, per fronteggiare la variabilità della produzione dovuta al basso grado di affidabilità degli impianti;
3. il costo conseguente al disservizio causato dalla mancata erogazione del servizio.

A scanso di equivoci, va detto che in ogni realtà industriale convivono, in genere, varie strategie di manutenzione, ognuna delle quali integra le altre, senza annullarle,

assorbendo una quota percentuale delle risorse disponibili: è possibile, cioè, applicare un mix di strategie manutentive che, nel suo insieme, costituisce la politica aziendale. La scelta va fatta in base alla criticità dei componenti, a una valutazione economica delle alternative e alle eventuali raccomandazioni del fornitore.

È possibile, quindi, delineare uno schema più completo del precedente, che tenga conto delle considerazioni sopra riportate, come modello di logica decisionale per una corretta selezione della politica manutentiva aziendale (Figura 5.4).

Un ruolo importante nella definizione della strategia manutentiva, inoltre, è giocato dal tipo di guasti che si possono verificare. Se è vero che i guasti sono sempre dannosi, non bisogna, però, credere che abbiano tutti le stesse conseguenze: un gua-

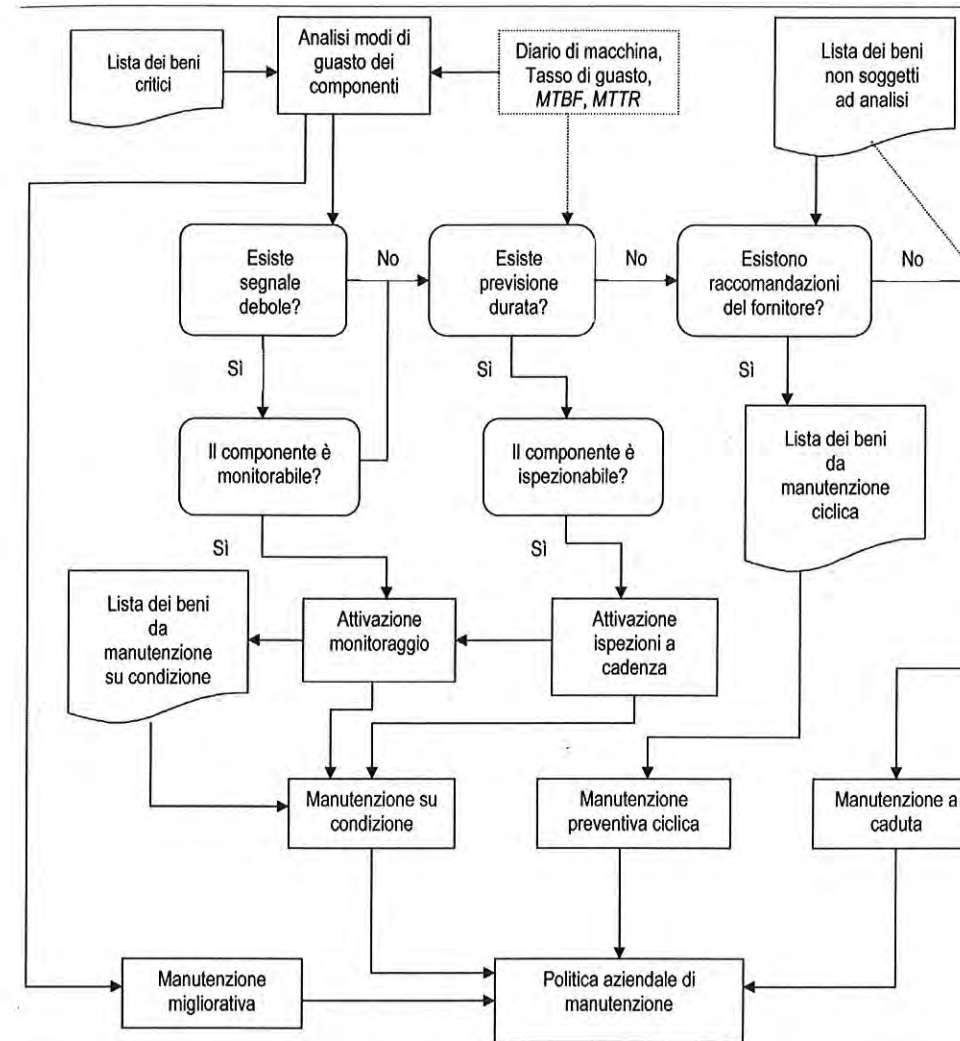


Figura 5.4 Diagramma di flusso per la definizione della politica aziendale di manutenzione [UNI 10366].



sto, per definizione, è l'impossibilità per un materiale, struttura o sistema di svolgere il proprio compito in modo sicuro e ordinato, ma esistono diverse modalità per caratterizzare una tale situazione. Una classificazione dei guasti è riportata nella Tabella 5.2.

**Tabella 5.2** Classificazione dei guasti [3]

Tipo di guasto	Descrizione
Guasto catastrofico	Una condizione di repentina e completa cessazione delle operazioni e un totale deterioramento delle funzioni
Guasto improvviso	Una condizione di degrado accelerato sia del materiale sia delle prestazioni, che si traduce in un parziale indebolimento delle funzioni.
Guasto imminente	Una condizione di percettibile degrado del materiale in presenza di un serio deterioramento delle prestazioni
Guasto incipiente	Una condizione nella quale l'utilizzo di opportuni mezzi di investigazione permette di individuare i primi segni di degrado del materiale, senza che l'utente avverta alcuna modifica nella performance della macchina.
Guasto condizionale	Una condizione di preallerta in cui non si è ancora verificato un degrado né del materiale né della prestazione, ma tale che, se la situazione persiste, si arriverà inevitabilmente a un guasto funzionale.

Le "cause prime di guasto" si presentano quando esistono condizioni anomale che producono una situazione di instabilità del sistema. Nel caso di sistemi meccanici a fluido, per esempio, è possibile individuare alcune, tipicamente le seguenti:

- eccessiva contaminazione del fluido lubrificante;
- fuoriuscita di fluido;
- instabilità chimica del fluido;
- instabilità fisica del fluido;
- cavitazione;
- instabilità della temperatura del fluido;
- condizioni severe di usura;
- deformazione o frattura del materiale.

Se si parte dal presupposto che il produttore ha progettato e costruito il sistema correttamente, un "guasto condizionale" dipenderà totalmente dal verificarsi di una o più di queste cause prime. È in corrispondenza di questo livello di guasto che, in mancanza di sintomi identificabili di degrado della prestazione o del materiale, l'utente potrà soltanto individuare e correggere le cause prime di guasto mediante la *Proactive Maintenance*.

Quando ha luogo un guasto incipiente, vuol dire che la performance del sistema risulta corretta, ma si è già in presenza di un certo degrado del materiale che è riscontrabile con un monitoraggio dei detriti da usura (*debris*), delle vibrazioni o del rumore. Si tratta, allora, di operare quella che viene detta manutenzione predittiva. Se poi inizia a essere riconoscibile anche un certo indebolimento nelle prestazioni del sistema, si parla di condizioni di guasto imminente, dovuto al fatto che l'utente

non è intervenuto per tempo a correggere le condizioni irregolari frutto delle cause prime suddette. A questo punto all'operatore non resta altro da fare che programmare una manutenzione preventiva che miri a evitare la rottura improvvisa e il fermo del sistema.

Ignorando tutti questi segnali del degrado del sistema, si giunge inevitabilmente alla fase di guasto improvviso, quando, cioè, il deterioramento del materiale assume proporzioni tali da indebolire seriamente alcune funzioni del sistema stesso che deve essere subito revisionato e i componenti danneggiati sostituiti. In questo senso si parla di una forma di manutenzione "reattiva" nei confronti di un'avaria già presente, cioè di *Breakdown Maintenance*.

Rimane infine da analizzare il guasto catastrofico, cioè quella condizione in cui la normale operatività del sistema cessa o diventa talmente problematica da renderne difficoltoso il controllo da parte dell'operatore. In questo caso si è costretti a rimuovere gli elementi guasti, ripararli e sostituirli secondo la strategia delle quattro R (*Remove, Repair, Rebuild and/or Replace*) che per molto tempo ha costituito l'unico approccio all'attività manutentiva.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] L. Fedele, "Formazione e qualificazione di nuove figure professionali nel campo della progettazione e della gestione della manutenzione", *Unificazione & Certificazione*, n. 10, novembre/dicembre 2000.
- [2] L. Furlanetto, M. Cattaneo, C. Mastriforti, *Manutenzione produttiva. L'esperienza del TPM in Italia*, ISEDI, Torino, 1996.
- [3] E.C. Fitch, *Proactive Maintenance for Mechanical Systems*, FES, Stillwater, Oklahoma (USA), 1992.
- [4] Direction of Commander, Naval Sea Systems Command, *Reliability - Centered Maintenance Handbook*, S9081-AB-GIB-010/MAINT, 1981.
- [5] A. Baldin, L. Furlanetto, A. Roversi, F. Turco, *Manuale della Manutenzione degli Impianti Industriali*, Franco Angeli, Milano, 1986.
- [6] D. Babbo, L. Fedele, M. Tronci, *La Manutenzione: dalla manutenzione su guasto alla manutenzione migliorativa*, Ed. Esagrafica, 2001.

## PARTE SECONDA



# 6

## Life Cycle Cost Analysis - LCCA

L'analisi del costo del ciclo di vita (*Life Cycle Cost Analysis - LCCA*) è basata su un approccio sistematico e analitico utilizzabile nella valutazione di ipotesi alternative di progetto e ha l'obiettivo di scegliere quella alternativa a cui è associato il minore impiego di risorse e corrispondentemente di costi.

Questa metodologia è nata anche per tenere conto della necessità di integrazione della figura del cliente con il prodotto, partendo dalla considerazione che un certo prodotto, nel corso di tutto il suo ciclo di vita, deve essere in grado di soddisfare il cliente (*life cycle design for customer satisfaction*).

Nel corso degli anni le limitazioni associate a questo strumento ingegneristico sono state accettate come normali restrizioni proprie di un qualsiasi tool di analisi, e comunque le esperienze fatte hanno insegnato a gestire tali limitazioni, minimizzando gli eventuali effetti negativi.

La LCCA valuta i costi di acquisizione, esercizio e manutenzione fino a quelli di dismissione (Figura 6.1) e rapporta l'investimento iniziale con i risparmi futuri, tenendo anche conto degli aspetti finanziari.

Ogni alternativa associabile a un progetto è comprensiva di tutte quelle azioni presenti all'interno dell'intero ciclo di vita (Figura 6.2) di quel progetto, dal suo concepimento alla dismissione finale; inoltre ogni alternativa dovrebbe essere in grado, per essere veramente considerata tale, di garantire il minimo livello di performance richieste [1].

Adottando questa impostazione metodologica è possibile per esempio valutare molti progetti strutturali, finalizzati alla realizzazione di un edificio, e scegliere quello a cui sia associato il più basso costo del ciclo di vita.

La metodologia LCCA può anche essere utilizzata con lo scopo di stabilire una priorità nella allocazione dei fondi rispetto a un certo numero di possibili investimenti di capitale fra differenti progetti, nel caso vi sia una disponibilità limitata di risorse e di budget.

Come vedremo nei prossimi paragrafi un criterio di classificazione degli investi-

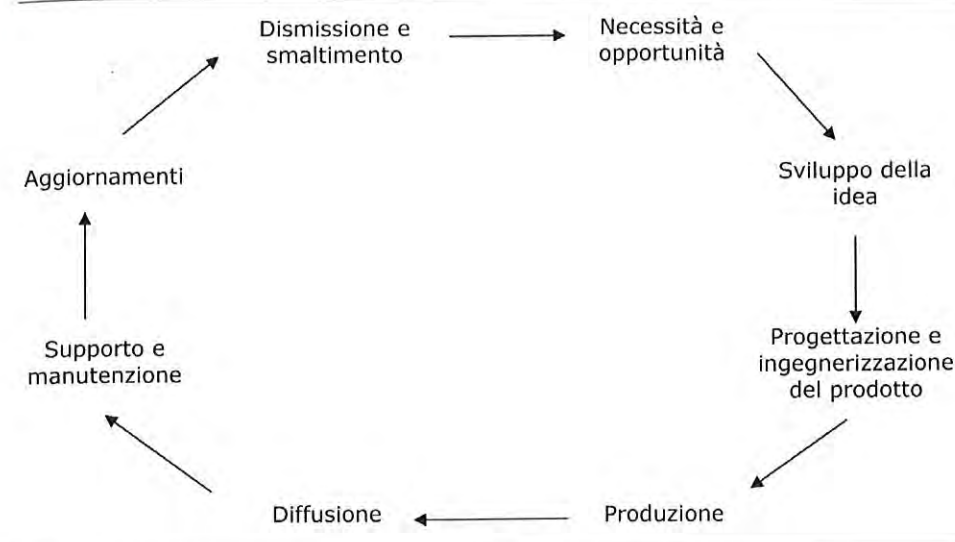


Figura 6.1 Una possibile rappresentazione del ciclo di vita di un prodotto.

menti, consiste nel considerare anche i valori di due importanti indici denominati *SIR* (*Savings-to-Investment Ratio*) e *AIRR* (*Adjusted Internal Rate of Return*).

Un terzo indice che viene calcolato negli studi di LCC è il *NS* (*Net Savings*).

Tutti e tre gli indici menzionati sono parte integrante del metodo LCCA, in quanto tutti e tre risultano basati sulle stesse classi di costo e di risparmio, e sono riferiti a uno stesso orizzonte temporale.

Gli indici *AIRR* e *SIR* rappresentano misure supplementari al calcolo del LCC e sono utili soprattutto per stabilire una classificazione di progetti indipendenti (per esempio un nuovo tetto per l'edificio A o un nuovo impianto di riscaldamento per l'edificio B) e effettuare una scelta nel caso vi sia un budget disponibile sufficiente per la realizzazione di un solo progetto.

Anche il *NS* è un indice supplementare al LCC e può essere utilizzato per determinare quale sia, fra tante, l'alternativa di progetto migliore da un punto di vista della minimizzazione dei costi; si può dimostrare che all'interno di un qualsiasi gruppo di alternative di progetto, mutuamente escludentesi, l'alternativa che presenta il minor LCC sarà anche caratterizzata dal più alto valore di *NS*.

Una osservazione che merita di essere fatta riguarda il confronto fra l'impostazione legata alle logiche della LCCA e quella legata per esempio alla determinazione del *payback period*, utilizzato nelle analisi economiche. Quest'ultimo, nella maggior parte dei casi, viene usato per sapere quanto rapidamente, un investimento iniziale può essere recuperato, e proprio per questo motivo non può essere una misura delle prestazioni economiche di lungo periodo. I metodi legati alla determinazione del *payback period*, ignorano di fatto tutti i costi e i risparmi, che si verificano successivamente al pareggio dell'investimento (raggiungimento del *payback*).

Generalmente nella determinazione del *payback period*, inoltre, non si effettua una distinzione fra alternative di progetto caratterizzate da durate differenti e nella maggior parte dei casi non si tiene conto neppure dei tassi di sconto.

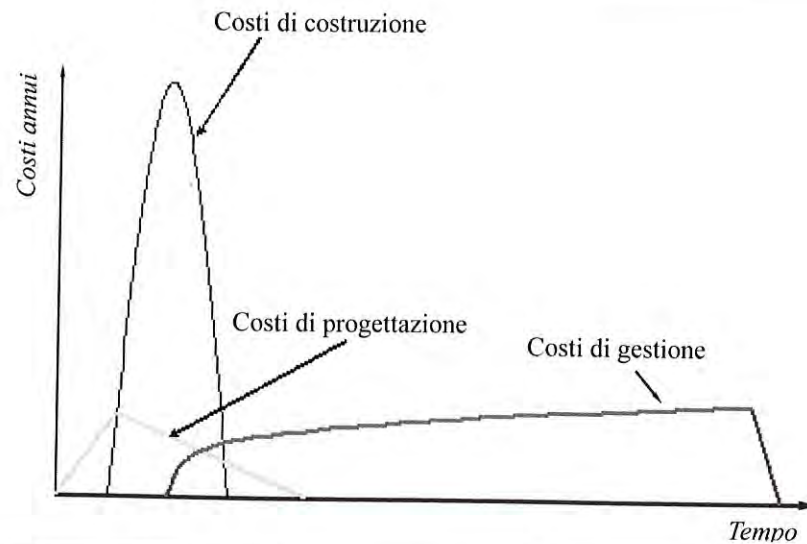


Figura 6.2 Stadi del ciclo di vita.

La LCCA viene, dunque, impiegata per valutare configurazioni alternative di progetto, metodi alternativi di realizzazione, schemi di supporto alternativi; questo tipo di analisi può essere articolata in 10 passi principali (Tabella 6.1).

Tabella 6.1 I passi chiave dell'analisi LCC (NIST Handbook - 135)

Definire il problema e stabilire gli obiettivi
Identificare le alternative realmente fattibili
Stabilire le ipotesi di base e i parametri da considerare
Stimare i costi e i tempi per ciascuna alternativa
Attualizzare i costi futuri
Calcolare e confrontare gli LCC associati ad alternative diverse di uno stesso progetto
Calcolare misure supplementari se necessarie per stabilire una priorità di progetto (NS, AIRR, SIR)
Analizzare l'incertezza dei dati di ingresso
Tenere conto di tutto quello che esula da una valutazione monetaria dei costi e benefici
Proporre e consigliare una decisione

Si dovrà pertanto procedere a:

- definire le caratteristiche del problema o del progetto e degli obiettivi connessi;
- definire i requisiti da utilizzare nel modello di costo;
- raccogliere i dati storici;
- definire il calendario dell'analisi;
- sviluppare la stima e l'analisi dei risultati.

Una corretta applicazione della metodologia LCC consentirà di:

- prevedere le future risorse necessarie;
- influenzare positivamente la fase di ricerca e sviluppo del progetto e tutte le decisioni da prendere durante le fasi di progettazione preliminare;
- supportare la futura pianificazione strategica e la definizione del budget.

Questo tipo di analisi presenta come detto alcune possibili limitazioni che risulta opportuno mettere in evidenza e conoscere:

- le stime e valutazioni dei costi sono effettuate proprio all'inizio della vita di un progetto, quando il grado di accuratezza nella descrizione e quantificazione di alcune voci di costo può risultare ancora approssimativo;
- si assume che un'alternativa di progetto abbia un ciclo di vita prestabilito;
- il costo legato alla esecuzione di una analisi LCC non è sempre giustificato, in altri termini occorre capire per quali progetti ha veramente senso investire tempo e risorse in uno studio di questo tipo, che presenta indubbiamente una certa onerosità;
- vi può essere una elevata sensibilità dei risultati dell'analisi LCC nei confronti di modifiche alle specifiche iniziali di progetto.

Durante un'analisi LCC è possibile incorrere in alcuni errori abbastanza comuni; in progetti rilevanti una LCCA deve costituire una parte integrante della pianificazione strategica e, affinché questa possa risultare corretta, è indispensabile eliminare le condizioni che possono potenzialmente essere fonti di errori e portare ad analisi LCC sbagliate.

Le ragioni di tali errori [2] possono essere riconducibili a:

- omissione di dati;
- mancanza di una struttura sistematica di analisi;
- errata interpretazione dei dati;
- errato impiego delle tecniche di analisi e di stima;
- concentrazione di eventi sbagliati o insignificanti;
- errori nella valutazione della incertezza;
- errori nel controllo del lavoro;
- errata considerazione delle voci di costo;
- errati valori nei parametri utilizzati nel calcolo dei costi.

Come mostrato in Figura 6.3, si può notare che, al termine della fase di ricerca e sviluppo e appena prima dell'avvio della fase di produzione o di realizzazione del progetto, una percentuale molto elevata, approssimativamente il 95% del costo cumulato del ciclo di vita, sia già stato stabilito.

Dal momento che l'analisi del costo del ciclo di vita di un progetto o di un bene può essere estesa anche a orizzonti temporali molto lunghi, risulta necessario ricorrere alle regole della matematica finanziaria, all'interno delle quali compaiono parametri caratteristici quali la durata del progetto e il tasso di interesse; infatti tutti i contributi di costo devono essere attualizzati, in modo da tenere conto del costo del denaro nel tempo.

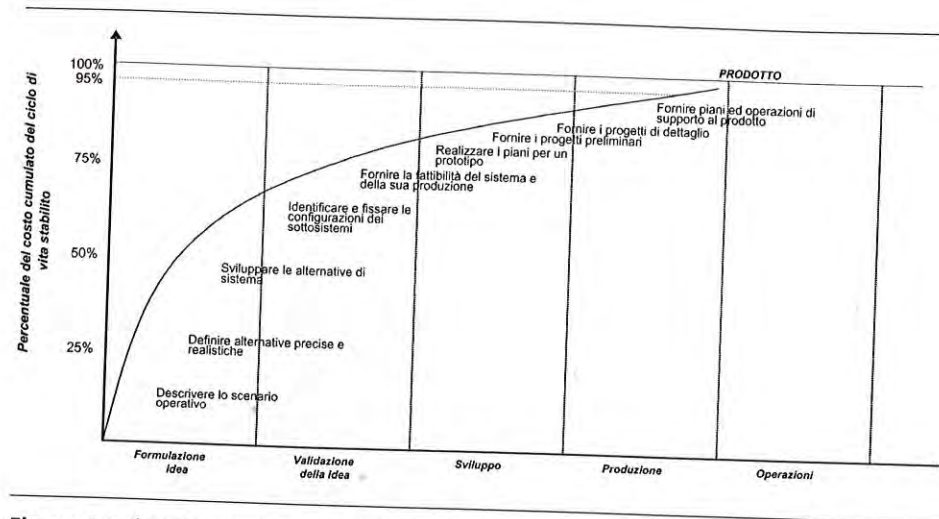


Figura 6.3 Il costo cumulato del ciclo di vita.

## 6.1 Struttura e riflessioni sugli elementi di costo

La LCCA considera dunque ogni elemento di costo che si manifesta durante il ciclo di vita di un sistema, cercando di evidenziare quale sia la scelta migliore fra alternative di sviluppo e realizzazione.

In precedenza è stato ricordato che questa metodologia presenta alcuni elementi di debolezza, che con il tempo si sono comunque riusciti a controllare e gestire [4]:

- la LCCA non è una scienza esatta, e di fatto non esistono impostazioni migliori di altre in assoluto, di volta in volta gli esperti del metodo devono capire come adattare una impostazione generale a un caso specifico, caratterizzato anche da incertezze;
- i risultati sono sempre esprimibili come stime e non possono mai risultare più accurati degli input dai quali derivano;
- risulta molto difficile determinare la accuratezza delle stime fatte, e le varianze ottenute con metodi statistici sono spesso molto ampie;
- nella costruzione dei modelli LCC, spesso si ha una notevole difficoltà a conoscere gli elementi di costo, soprattutto di quelli legati alla fase operativa di un sistema, all'interno della quale possono essere per esempio introdotti elementi di innovazione tecnologica non prevedibili al momento dello studio;
- è sempre necessario adattare un modello alla realtà cui si riferisce in modo da aumentarne la utilità;
- è sempre necessario definire uno scenario di vita del sistema analizzato, da come esso sarà progettato a come questo sarà installato e utilizzato per tutto il suo ciclo.

Seppur caratterizzato da alcuni punti deboli, il metodo consente di condurre analisi strutturate, le quali devono essere basate su uno schema di riferimento che tenga conto di tutte le possibili categorie di costo (Figura 6.4).

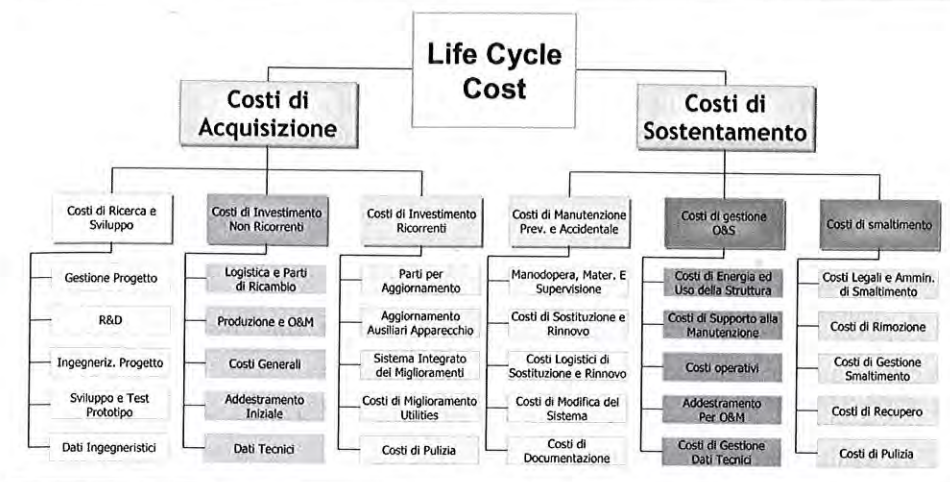


Figura 6.4 Struttura di riferimento per le categorie di costo.

## 6.2 La documentazione della LCCA e la terminologia da utilizzare

Gli studi di tipo LCC, di qualunque dimensione essi siano, necessitano di essere attentamente documentati in modo da tenere traccia dell'intero processo di valutazione, creare un *modus operandi* nel supporto alle decisioni e avere in modo semplice informazioni accessibili e comprensibili da utilizzare negli studi futuri.

È possibile fissare alcuni punti di uno studio LCC, i quali richiedono una documentazione che dovrà essere commisurata alla complessità delle decisioni da prendere e alla dimensione dell'intero progetto.

L'elenco di seguito riportato evidenzia quali sono gli elementi di una LCCA che necessitano di una documentazione completa:

1. *Descrizione del progetto*
  - informazioni generali;
  - tipo di decisione da prendere;
  - vincoli.
2. *Alternative*
  - descrizione tecnica;
  - razionalizzazione delle alternative;
  - considerazioni non monetarie.
3. *Parametri comuni*
  - periodo di studio;
  - data di inizio del ciclo di vita del sistema;
  - data di inizio della fase di esercizio del sistema;
  - tasso di sconto;
  - modalità di trattamento della inflazione;
  - ipotesi operative.

4. *Dati di costo e fattori relativi*
  - costi di investimento;
  - costi operativi;
  - costi di utilizzo delle *utilities*;
  - temporizzazione dei costi;
  - fonti dati di costo;
  - valutazione della incertezza.
5. *Calcoli*
  - attualizzazioni;
  - calcolo di tutti i costi del ciclo di vita;
  - calcolo degli indici economici supplementari (*SIR*, *NS*, *AIRR*).
6. *Interpretazione*
  - risultanze derivanti da confronti di LCC associati ad alternative distinte;
  - valutazione della incertezza;
  - risultanze delle analisi di sensitività.
7. *Risparmi o costi non monetari*
  - descrizione degli intangibili.
8. *Altre considerazioni*
  - annotazioni.
9. *Raccomandazioni*

Al termine di uno studio LCC, dovrà essere prodotto un report contenente, per ogni alternativa di progetto ipotizzata, un sommario dei risultati all'interno del quale dovrebbero in particolare essere evidenziati i vari contributi di costo del LCC (investimento iniziale, costo delle operazioni, della manutenzione e delle riparazioni, valore residuo e costi di rimpiazzo) associabili a ogni singola alternativa di uno stesso progetto, in modo da poter fare confronti.

Una delle possibili ragioni a cui possono essere imputati errori negli studi LCC è quella della mancanza di condivisione del significato delle grandezze e dei parametri che vengono considerati in questa analisi. Di seguito è pertanto riportato un glossario, contenente alcuni termini e definizioni di uso comune nelle analisi LCC; esso è presente all'interno del Manuale 135 del National Institute of Standards and Technology (NIST) degli Stati Uniti d'America, il quale costituisce un riferimento di primaria importanza in analisi di questa natura.

**Tabella 6.2** Glossario LCCA (Fonte: NIST Handbook 135)

Definizione	Descrizione
<i>Adjusted Internal Rate of Return (AIRR)</i>	Rendimento annuale di un progetto sul periodo di studio, tenendo conto del reinvestimento degli interi profitti.
<i>Annually Recurring Costs</i>	Sono tutti quei costi che si ripetono ogni anno in ugual misura, per tutto il periodo di studio, o che cambiano da un anno all'altro secondo un quantità nota.

(segue)

(continua)

Definizione	Descrizione
<i>Base Case</i>	Sistema di base rispetto al quale viene confrontata una alternativa di progetto.
<i>Base Date</i>	È l'inizio del primo anno del periodo di studio, che in genere coincide con la data in cui l'analisi LCC viene svolta.
<i>Base Year</i>	È il primo anno del periodo di studio, che in genere coincide con l'anno in cui l'analisi LCC viene svolta.
<i>Cash Flow</i>	Il flusso di costi e risparmi risultante dall'investimento di un progetto.
<i>Discount Factor</i>	Un fattore moltiplicativo utilizzato per convertire un Cash Flow che avviene in un certo istante nel tempo (in genere nel futuro) al suo equivalente corrispondente a un certo istante comune (in genere la Base Date).
<i>Discount Rate</i>	È il tasso di interesse che riflette il valore temporale del denaro per l'investitore.
<i>Economic Life</i>	È quel periodo di tempo all'interno del quale un certo sistema è considerato essere l'alternativa a minor costo in grado di soddisfare determinate prestazioni.
<i>Future Value</i>	È l'equivalente temporale del valore di Cash Flow passati, presenti o futuri, espressi in un certo istante temporale futuro.
<i>Initial Investment Costs</i>	Sono i costi iniziali associati al progetto, ingegnerizzazione, acquisto e installazione (tranne i costi affondati), per ognuno dei quali si assume che si manifesti come una somma forfetaria all'inizio del Base Year o introdotto durante il periodo di pianificazione/costruzione.
<i>Internal Rate of Return (IRR)</i>	È il rendimento annuale derivante da un progetto, su un certo periodo di studio, ovvero è quel tasso di interesse che, se usato per attualizzare i Cash Flow, annulla i Net Savings ( <i>NS</i> ).
<i>Life Cycle Cost (LCC)</i>	È il costo totale attualizzato, associato al ciclo di vita di un certo sistema su un certo periodo di studio.
<i>Life Cycle Cost Analysis (LCCA)</i>	Un approccio generale alla valutazione economica che comprende molte misure di natura economica come <i>LCC</i> , <i>NS</i> , <i>SIR</i> , <i>AIRR</i> , ciascuna delle quali tiene conto di tutte le fasi del ciclo di vita di un sistema.
<i>Net Savings (NS)</i>	Risparmi calcolati rispetto al tempo, a cui sono sottratti i costi differenziali calcolati rispetto al periodo di studio, per una certa alternativa di progetto rispetto a un Base Case.
<i>Operating, Maintenance and Repair (OM&amp;R) Costs</i>	Tutti i costi non corrispondenti all'investimento, legati all'utilizzo di un sistema.
<i>Planning/Construction (P/C) Period</i>	È il periodo compreso fra la Base Date e la Service Date, all'interno del quale sono sostenuti soltanto i costi di investimento iniziali.
<i>Present Value (Present Worth)</i>	È il valore equivalente riferito all'inizio del Base Year dei Cash Flow passati, presenti e futuri.

(segue)

(continua)

Definizione	Descrizione
Residual Value	Il valore stimato, al netto di qualunque costo di smaltimento, di un qualsiasi sistema rimosso o rimpiazzato durante il periodo di studio o che resta al termine del periodo di studio o, ancora, ricoperto attraverso una rivendita al termine del periodo di studio (è detto anche valore di rivendita).
Savings-to-Investment Ratio (SIR)	Per una alternativa di progetto rispetto al Base Case, è il rapporto di performance economiche avente a numeratore i valori scontati dei risparmi di energia e acqua, più i risparmi legati a altri costi operativi e a denominatore il valore aumentato dell'Initial Investment Costs, al netto del Valore Residuo (tutto in termini di valore attualizzato).
Service Date	Durante il periodo di studio è l'istante in cui un sistema viene posto in esercizio e si iniziano a maturare i costi operativi.
Simple Payback (SPB) Period	È, per un progetto, la misura del periodo di tempo richiesto affinché i risparmi cumulati eguaglino la somma dei costi di investimento iniziale e di altri costi maturati, senza considerare il tasso di sconto.
Study Period	È il periodo di studio, ovvero il periodo di tempo corrispondente alla durata del ciclo di vita analizzato, e all'interno del quale tutti i costi saranno ricondotti. Esso può essere visto come unione di due macroperiodi del ciclo di vita di un sistema: la fase di Planning/Construction e la fase di Service.

### 6.3 Le regole della LCCA

I costi che si manifestano all'interno di un progetto, lo fanno in istanti temporali differenti e necessitano pertanto di essere scontati al loro valore attuale (*Present Value*).

Come è noto, il tasso di sconto usato per scontare cash flow futuri al valore attuale si basa sul valore nel tempo del denaro dell'investitore.

Nel settore privato, il tasso di sconto dell'investitore è generalmente coincidente con il *MARR* (*Minimum Acceptable Rate of Return*) per investimenti caratterizzati dalla stessa durata e dallo stesso rischio.

Dal momento che differenti investitori hanno differenti opportunità di investimento, il tasso di sconto appropriato può variare in modo significativo da un investitore all'altro.

Quando una somma di denaro è investita a un certo tasso di interesse, il valore futuro di quella somma in un qualunque istante può essere determinato con alcune regole di matematica finanziaria.

Supponiamo a questo proposito che una somma iniziale  $P_0$  sia investita per  $t$  anni a un tasso di interesse  $i$ , composto annualmente.

In un anno, il reddito dovrebbe essere  $iP_0$  e sommandolo all'importo iniziale ci dovrebbe fornire:

$$P_1 = P_0 + iP_0 = P_0(1 + i)$$

Dopo  $t$  anni, la somma futura composta dovrebbe essere

$$P_t = P_0(1 + i)^t$$

Viceversa se conosciamo  $P_1$  e  $i$  possiamo determinare  $P_0$ :

$$P_0 = \frac{P_1}{(1 + i)}$$

Il *tasso di sconto* è un tipo speciale di tasso di interesse, che rende l'investitore indifferente al fatto che l'ammontare delle varie somme di denaro ricevute è avvenuto in istanti temporali diversi.

Il tasso di sconto  $d$  è utilizzato come il tasso di interesse  $i$  nella determinazione del *Present Value* ( $PV$ ), di una somma di denaro ricevuto o pagato in un certo istante futuro nel tempo.

Dunque in base a questo, risulta possibile determinare il  $PV$  di una somma futura  $F_t$  ricevuta al termine dell'anno  $t$ , utilizzando la seguente regola:

$$PV = \frac{F_t}{(1 + d)^t}$$

I costi connessi a un progetto che si verificano in diversi istanti nel tempo, su un certo periodo di studio, non possono essere direttamente sommati nel calcolo del *LCC*, dal momento che il denaro speso in tempi diversi ha un valore diverso per l'investitore.

È possibile schematizzare le formule di attualizzazione e i fattori di sconto che si possono utilizzare nei vari casi (Tabella 6.3).

**Tabella 6.3** Riepilogo formule per il calcolo del *Present Value* ( $PV$ ) (Fonte: NIST Handbook 135).

#### Formula del $PV$ per somme isolate

Il fattore *Single Present Value* ( $SPV$ ) è utilizzato per calcolare il valore attuale  $PV$ , di una futura somma di denaro che si manifesta al termine dell'anno  $t$ ,  $F_t$  dato un certo tasso di sconto  $d$

$$PV = F_t \times 1/(1 + d)^t = F_t \times SPV_{(t,d)}$$

#### Formula del $PV$ per somme uniformi e annualmente ricorrenti

Il fattore *Uniform Present Value* ( $UPV$ ), è utilizzato per calcolare il valore attuale  $PV$  di una serie di eguali somme di denaro  $A_0$  che si ripetono annualmente su un certo periodo di  $n$  anni, dato  $d$

$$PV = A_0 \times \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1 + d)^t} = A_0 \times \frac{(1 + d)^n - 1}{d(1 + d)^n} = A_0 \times UPV_{(n,d)}$$

#### Formula del $PV$ per somme non uniformi e annualmente ricorrenti

Il fattore *Modified Uniform Present Value* ( $UPV^*$ ) è utilizzato per calcolare il valore attuale  $PV$ , per somme che ricorrono annualmente su un periodo di  $n$  anni, ma che cambiano da anno ad anno, secondo un certo tasso di escalation costante  $e$  (per esempio  $A_{t+1} = A_t(1 + e)$ ), dato  $d$ . Il tasso di escalation può essere positivo o negativo e indica per ogni anno di quanto si prevede che i costi cambieranno a causa di un aumento del prezzo nel tempo.

$$PV = A_0 \times \sum_{t=1}^n \frac{(1 + e)^t}{(1 + d)^t} = A_0 \times \frac{(1 + e)}{(d - e)} \left[ 1 - \left( \frac{1 + e}{1 + d} \right)^n \right] = A_0 \times UPV_{(n,d,e)}^*$$

La formula generale da utilizzare nel calcolo del *Present Value* del *LCC* è dunque data da:

$$LCC = \sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+d)^t}$$

nella quale:

- $LCC$  = costo totale in *PV* associabile a una certa alternativa;  
 $C_t$  = somma, associabile all'anno  $t$ , di tutti i costi rilevanti, inclusi i costi iniziali e futuri, meno qualsiasi cash flow positivo;  
 $N$  = numero di anni nel periodo di studio;  
 $d$  = tasso di sconto utilizzato per riportare i cash flow al valore attuale.

Una espressione semplificata per il calcolo del *LCC* di un sistema può essere la seguente:

$$LCC = I + Repl - Res + E + W + OM\&R$$

dove:

- $LCC$  = costo totale in *PV* associabile a una certa alternativa;  
 $I$  = costi di investimento in *PV*;  
 $Repl$  = costi di rimpiazzo del capitale in *PV*;  
 $Res$  = valore residuo in *PV* a cui sono sottratti i costi di dismissione;  
 $E$  = costi di energia in *PV* (eventuale);  
 $W$  = costi di acqua in *PV* (eventuale);  
 $OM\&R$  = costi operativi, di manutenzione e riparazione in *PV*.

Una precisazione che è opportuno fare a questo punto riguarda il concetto di *costi rilevanti*.

In una analisi *LCC* può risultare difficile comprendere quali siano i costi che è necessario includere nella valutazione di alternative differenti. Per rispondere a questa domanda, si devono osservare gli effetti economici che risulteranno da ogni alternativa di progetto; non sempre però tutto è traducibile in quantità monetarie.

Si può affermare che nella pratica non è necessario includere in una *LCCA* tutti i costi di un progetto, ma soltanto quei contributi di costo che risultano essere rilevanti nelle decisioni e che sono significativi rispetto alla decisione dell'investimento da effettuare.

Sono rilevanti quei costi che cambiano da una alternativa di progetto a un'altra, mentre sono significativi quando essi sono abbastanza consistenti da rendere credibile una differenza nel costo del ciclo di vita associato a una alternativa di progetto.

I *costi affondati* (*sunk cost*) dovrebbero essere esclusi da una valutazione di tipo *LCC*.

Un'ulteriore osservazione riguarda la utilità di una analisi *LCC* al fine di una valutazione dei rendimenti associabili a scelte di progetto completamente differenti; per esempio per definire la capacità di produzione ottimale di uno stabilimento; in altre parole, la metodologia non indica se sia più conveniente costruire un supermercato da 15 o da 30 corsie, ma una volta definiti precisamente gli obiettivi del progetto, consente di scegliere l'alternativa che farà conseguire le performance (minime)

fissate, nel modo economicamente migliore. Per gli scopi precedentemente indicati risultano essere più adeguate valutazione del tipo Costi/Benefici o misure dei Rate of Return.

## 6.4 Le misure supplementari di una analisi LCC: NS, SIR, AIRR, Payback

Di seguito vengono riportate le formule esplicative delle principali misure economiche che possono essere considerate come parte integrante del metodo di analisi del costo del ciclo di vita; nei casi in cui la sola determinazione del *LCC* non sia ritenuta sufficiente, l'utilizzo di altri indicatori può essere di notevole supporto alle decisioni.

Ciascuna di queste misure economiche, può dare indicazioni specifiche e di conseguenza, allo scopo di avere una visione globale del problema, evitando sottovalutazioni o visioni parziali, è opportuno calcolarle tutte e riportarle in forma di report associabile a una singola alternativa di progetto.

### 6.4.1 Net Savings - NS

La misura del *NS* costituisce una variante della misura *Net Benefits (NB)* associabile alle performance economiche di un progetto.

Attraverso la formula del *NS* si calcola la somma netta attualizzata che si aspetta di risparmiare su un predefinito periodo di studio e che è associabile a una alternativa di progetto.

Questa misura può essere espressa come differenza fra i valori attualizzati del *LCC* associabile al caso base considerato per un progetto e del *LCC* associabile a una alternativa:

$$NS = LCC_{BaseCase} - LCC_{Alternative}$$

Nel caso *NS* risulti maggiore di 0, significherà che l'alternativa risulta essere più conveniente del caso di base. Qualora vi siano più proposte alternative per uno stesso progetto, quella alternativa che ha il *LCC* più basso presenterà anche il maggiore valore di *NS*.

La misura del *NS* può comunque essere determinata e confrontata per i singoli contributi costituenti il *LCC*.

La formula generale utilizzata per il calcolo del *NS* può essere espressa nel modo seguente:

$$NS_{A:BC} = \sum_{t=0}^N \frac{S_t}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^N \frac{\Delta I_t}{(1+d)^t}$$

dove:

- $NS_{A:BC}$  = *NS* espresso in *PV*, della alternativa ( $A$ ) rispetto al caso di base ( $BC$ );  
 $S_t$  = risparmi nei costi operativi nell'anno  $t$ , associati all'alternativa;  
 $\Delta I_t$  = costi di investimento addizionali riferiti all'anno  $t$ , associati all'alternativa;  
 $t$  = anno (0 è il *Base Year*);  
 $d$  = tasso di sconto;  
 $N$  = numero di anni del periodo di studio.



Si noti comunque che i risparmi difficilmente risulteranno già essere presenti alla *Base Case*.

Nel calcolo del *NS*, tutte le alternative dovranno essere valutate utilizzando la stessa durata del periodo di studio e lo stesso tasso di sconto.

#### 6.4.2 Savings-to-Investment Ratio - SIR

Il *SIR* è una misura della prestazione economica associabile a una alternativa di progetto che esprime in forma di rapporto, la relazione fra risparmi e costi di investimento addizionali, associabili a una singola alternativa di progetto.

Come il *NS* anche il *SIR* è una misura relativa delle prestazioni, poiché può essere calcolata soltanto rispetto a un *Base Case*; questo significa che la stessa *Base Date*, la stessa durata del periodo di studio e lo stesso tasso di sconto, devono essere utilizzati per il *Base Case* e le sue alternative.

Una alternativa di progetto è giudicata economicamente conveniente e giustificata, rispetto a un certo caso di base, quando il *SIR* risulta essere maggiore di 1.0.

Questo equivale a dire che i suoi risparmi sono maggiori degli incrementi di costo di investimento e che i risparmi netti saranno maggiori di 0.

È comunque importante precisare che quando si valutano alternative di progetto mutuamente escludentesi, l'alternativa a cui corrisponde il *LCC* più basso risulta essere quella più efficace da un punto di vista dei costi; l'alternativa di progetto avente il *LCC* più basso però non è generalmente quella che presenta il più alto *SIR*. Per questo motivo il *SIR* non deve essere utilizzato da solo per effettuare una scelta fra alternative di progetto mutuamente escludentesi.

La formula generale per la determinazione del *SIR* è riportata di seguito:

$$SIR_{A:BC} = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{S_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{\Delta I_t}{(1+d)^t}}$$

dove:

$SIR_{A:BC}$  = rapporto fra risparmi attualizzati e costi di investimento addizionali dell'alternativa rispetto al caso di base;

$S_t$  = risparmi nei costi operativi nell'anno  $t$ , attribuibili all'alternativa;

$\Delta I_t$  = costi di investimento addizionali riferiti all'anno  $t$ , attribuibili all'alternativa;

$t$  = anno (0 è il *Base Year*);

$d$  = tasso di sconto;

$N$  = numero di anni del periodo di studio.

Questa misura economica risulta dunque utile nel caso in cui si voglia valutare una singola alternativa di progetto rispetto a un caso di base o per classificare alternative di progetto indipendenti.

#### 6.4.3 Adjusted Internal Rate of Return - AIRR

Si tratta di una misura del rendimento percentuale annuo derivante da un progetto di investimento su una certa durata del periodo di studio.

Anche l'*AIRR* è una misura relativa della efficienza dei costi, infatti richiede di essere determinato rispetto a un *Base Case* di riferimento; questo implica la necessità di considerare la stessa *Base Date*, lo stesso periodo di studio e lo stesso tasso di sconto per la valutazione del *Base Case* e della alternativa.

L'*AIRR* viene confrontato con il *Minimum Acceptable Rate of Return (MARR)*, che è in genere coincidente con il tasso di sconto utilizzato in un'analisi *LCC*. Soltanto nel caso in cui *AIRR* risulti maggiore del *MARR*, il progetto risulterà economicamente giustificato; nel caso limite in cui *AIRR* eguagli il tasso di sconto, i risparmi del progetto eguagliano i suoi costi e il progetto risulta essere economicamente neutrale.

Questo indicatore può essere utilizzato nelle stesse applicazioni del *SIR*: può essere considerato per decidere se accettare o rifiutare una alternativa di progetto (rispetto a un *Base Case*) o per allocare un certo budget di investimento finito, su un certo numero di progetti indipendenti.

In generale l'alternativa di progetto caratterizzata dal più alto valore dell'*AIRR*, non coinciderà con l'alternativa caratterizzata dal più basso *LCC*.

La determinazione dell'*AIRR* può essere fatta con la seguente formula:

$$AIRR = (1+r) \times (SIR)^{\frac{1}{N}} - 1$$

dove:

$r$  = tasso di reinvestimento;

$N$  = numero di anni del periodo di studio.

Il calcolo del *AIRR* richiede pertanto quello preliminare del *SIR*.

#### 6.4.4 Payback

Esistono due misure del payback che sono spesso utilizzate nelle analisi economiche per l'investimento di un capitale: *Simple Payback (SPB)* e *Discounted Payback (DPB)*.

Entrambe questi indici misurano il tempo necessario per coprire i costi di investimento iniziali.

*SPB* e *DPB* sono espressi come numero di anni trascorsi fra l'inizio di un periodo di service e il tempo in cui i risparmi cumulati (al netto di ogni costo incrementale di investimento avvenuto successivamente alla data di messa in servizio del sistema) sono appena sufficienti a controbilanciare il costo incrementale di investimento iniziale del progetto.

Si tratta di misure relative perché devono essere correlate a un *Base Case* di riferimento.

Mentre nel calcolo del *SPB* non vengono considerati cash flow scontati, nel calcolo del *DPB* invece si effettua una attualizzazione dei vari cash flow che si manifesteranno nel corso degli anni all'interno della durata del periodo di studio.

Nel caso in cui il *DPB* risulti minore della durata del periodo di service utilizzato nell'analisi, il progetto risulterà essere generalmente efficiente dal punto di vista dei costi.

Sia nel calcolo del *SPB* sia in quello del *DPB* vengono ignorati tutti i costi e i risparmi, così come i valori residui, che si verificano successivamente alla data di payback.

Questo tipo di indice non risulta adeguato per compiere una scelta fra alternative di progetto, mutuamente escludentesi.

La formula per la determinazione del payback è riportata di seguito:

$$\sum_{t=1}^y \frac{(S_t - \Delta I_t)}{(1+d)^t} \geq \Delta I_0$$

dove:

- $y$  = durata minima del periodo in cui i cash flow netti futuri dovranno essere accumulati in modo da controbilanciare i costi di investimento iniziali;  
 $S_t$  = risparmi nei costi operativi nell'anno  $t$ , attribuibili all'alternativa di progetto;  
 $\Delta I_0$  = costi di investimento iniziali associati all'alternativa di progetto;  
 $I_t$  = costi di investimento addizionali riferiti all'anno  $t$ , oltre ai costi di investimento iniziale;  
 $d$  = tasso di sconto.

Nel caso il tasso di sconto  $d$  sia 0 allora  $y$  è il *SPB*, mentre se il tasso di sconto è diverso da 0  $y$  è il *DPB*.

Può a questo punto essere opportuno effettuare un riepilogo delle misure economiche considerate in una *LCCA* (compreso il *LCC*), esprimendo un giudizio riguardo alla loro influenza sulle decisioni che devono essere prese (Tabella 6.4).

**Tabella 6.4** Impiego delle misure economiche della *LCCA* rispetto alle decisioni (Fonte: NIST Handbook 135).

Tipo di decisione	Misure economiche (criteri di valutazione)				
	<i>LCC</i>	<i>NS</i>	<i>SIR</i>	<i>AIRR</i>	<i>Payback</i>
Accettare/ rifiutare	Sì (minimo)	Sì (> 0)	Sì (> 1, 0)	Sì (> tasso di sconto)	No
Livello di efficienza	Sì (minimo)	Sì (massimo)	No	No	No
Selezione del sistema	Sì (minimo)	Sì (massimo)	No	No	No
Combinazione di sistemi indipendenti	Sì (minimo - <i>LCC</i> combinato)	Sì (massimo - <i>NS</i> combinato)	No	No	No
Priorità del progetto (progetti indipendenti)	No	No	Sì (ordine decrescente)	Sì (ordine decrescente)	No

#### Riferimenti bibliografici

- [1] MIL-HDBK-276-1/2, United States Department of Defense, 1984.
- [2] DOE G 430.1 - 1, 1997.
- [3] NIST Handbook 135, *Life Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program*, 1995.
- [4] H.P. Barringer, D.P. Weber, *Life Cycle Cost Tutorial*, Fifth International Conference on Process Plant Reliability, New York 1996.
- [5] L. Fedele, M. Tronci, *Analisi del costo del ciclo di vita di un impianto industriale per la definizione della politica di manutenzione ottimale*, ANIMP, Roma 2003.

## 7

## Simulazione ingegneristica

La definizione di simulazione ingegneristica, non può prescindere da altre tre definizioni fondamentali: *sistema*, *modello* ed *esperimento*.

Come è già stato ampiamente trattato, un sistema è definito come un insieme di processi o componenti per ciascuno dei quali si possono individuare alcune possibili interdipendenze/interconnessioni con gli altri.

Sarà dunque definito *componente* un oggetto che possiede le seguenti proprietà:

- ha un numero finito di stati conosciuti e discreti;
- il meccanismo di trasferimento della entità fra i suoi stati è noto.

A questo punto è necessario fare una precisazione: l'associazione di un componente ai suoi stati possibili è essenzialmente arbitraria (infatti ci aspettiamo che per un componente siano considerati soltanto quegli stati che sono effettivamente rilevanti rispetto alla rappresentatività del modello nel quale il componente è inserito).

La vita del componente può dunque essere descritta attraverso una sequenza di passaggi fra stati possibili, tali passaggi possono essere divisi in due categorie.

- *Processi stocastici inerenti*: sono processi di natura probabilistica che possono essere visti come proprietà interne di un componente; i processi di guasto e riparazione rientrano in questa categoria.
- *Interazioni*: si tratta di trasferimenti di stato, risultanti da eventi che possono accadere sia all'interno sia all'esterno del sistema. Alcuni di questi stati non sono di natura probabilistica ma deterministica come, per esempio, nel caso della manutenzione programmata.

Diamo adesso una definizione più analitica di sistema; esso può essere visto come una raccolta di componenti su cui è definibile almeno una funzione a valore reale. Per esempio nel caso di una macchina o anche di una organizzazione, queste diventano sistemi soltanto se gli elementi contenuti al loro interno sono componenti e si può definire una *misura delle prestazioni*, la quale è esprimibile attraverso una funzione a valori reali.

Se allora indichiamo [1] con  $b_i$  un indicatore di stato del componente- $i$  appartenente a un sistema costituito da  $m$  componenti, il vettore  $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$  sarà il *vetto-re di stato* del sistema. Lo spazio di tutti i possibili vettori di stato è detto *spazio di stato* del sistema.

Un modello può essere definito come rappresentazione di un sistema reale, ricavabile a partire da leggi teoriche o da analisi dei dati empirici.

La definizione del modello richiede la individuazione dei confini del sistema (interfacce), dei parametri di input, delle misure degli output e della configurazione con cui si mettono in relazione i parametri di ingresso con la architettura e con gli output del modello.

Un esperimento, dunque, può essere visto come un processo legato all'osservazione sia del sistema analizzato sia del modello che lo rappresenta.

A partire dal concetto di esperimento si arriva alla definizione di *simulazione*, ovvero di quel processo che permette proprio di effettuare esperimenti sul modello realizzato anziché sul sistema reale.

L'incertezza e la casualità intrinseche agli elementi costituenti il modello devono essere considerate e valutate e anche gli esperimenti devono essere progettati in modo da valutare tali aspetti.

Nei diversi ambiti della ingegneria, sono ampiamente utilizzate diverse tipologie di simulazione (si pensi per esempio ai simulatori di volo) le quali costituiscono uno strumento molto importante all'interno di processi decisionali caratterizzati da un elevato grado di complessità.

Alla simulazione sono riconducibili enormi benefici legati soprattutto alla possibilità di ipotizzare e valutare scenari alternativi di sistema, agendo sul modello costruito, soprattutto nei casi in cui sia tecnicamente difficile ed economicamente poco conveniente agire direttamente sul sistema reale.

L'uso della simulazione consente infatti di poter disporre di una rappresentazione dinamica e modificabile e favorisce una maggiore comprensione del sistema reale; la simulazione permette a un analista di controllare e verificare in modo puntuale i singoli parametri, le variabili e le condizioni iniziali e al contorno, considerati nel modello di sistema, cosa che non risulta realizzabile con i sistemi reali. Per fare tutto questo, però, è fondamentale che il modello di sistema sia veramente rappresentativo del sistema reale, il che richiede necessariamente una fase di *validazione*, ovvero una verifica della affinità del modello costruito con il sistema reale; tale attività può essere svolta sulla base di una verifica dei dati storici. Successivamente a questa fase, la simulazione è utilizzata per valutare la risposta del sistema nei confronti di condizioni che non si sono mai verificate in passato ma che possono potenzialmente accadere.

Ci sono, però, almeno due considerazioni da fare circa l'impiego della simulazione: è abbastanza frequente che si possano sviluppare molti differenti, ma al tempo stesso realistici, modelli di sistema, i quali possono indirizzare anche verso decisioni alternative. Un secondo aspetto da sottolineare è quello relativo alla dipendenza della rappresentatività del modello dai dati utilizzati nella fase di messa a punto del modello stesso; spesso i dati risultano essere poco numerosi e, conseguentemente, possono condurre a estrapolazioni scarsamente accurate.

Il *metodo Monte Carlo* è un valido strumento per ridurre la "distanza" esistente

fra la realtà e il modello usato per rappresentarla perché è in grado di compensare alcune carenze informative.

## 7.1 Il metodo Monte Carlo

Questo metodo trae il suo nome dalla città del Principato di Monaco, luogo ad alta concentrazione di generatori di numeri casuali: le roulette.

Il metodo Monte Carlo può essere interpretato come una procedura numerica, basata sull'uso di numeri random e finalizzata alla valutazione delle stime statistiche delle grandezze di interesse.

Il Capitano Fox avrebbe desunto il valore del pi-greco tirando un ago su un tavolo con due linee tracciate e contando il numero di volte in cui l'ago intersecava le linee (cfr.: A. Hall, *On an experimental determination of PI*, 1873). Altri esempi di impiego della metodologia, ora nota come Monte Carlo, sono da ricondurre a scritti di Lord Rayleigh del 1899 e di A. Kolmogorov del 1931; il metodo però si è affermato nell'ambito della ricerca tecnologica nucleare negli anni '40 del secolo scorso; infatti la sua prima applicazione in ambito ingegneristico avvenne durante la Seconda guerra mondiale all'interno del progetto Manhattan a Los Alamos a cui fra gli altri parteciparono Von Neumann e Ulam i quali, nella progettazione della bomba atomica, utilizzarono questa modalità di calcolo per l'integrazione di alcune funzioni non risolvibili analiticamente.

Di fatto questo metodo è il solo in grado di fornire soluzioni a complessi problemi multi-dimensionali. Per molto tempo esso ha continuato a essere utilizzato unicamente nel settore nucleare, il solo a poter disporre di potenzialità di calcolo adeguate.

Oggi giorno i principali ambiti di applicazione all'interno dei quali il metodo Monte Carlo è utilizzato in modo sistematico sono:

- progettazione dei reattori nucleari;
- radioterapia;
- flussi di traffico;
- astrofisica e analisi dell'evoluzione stellare;
- econometria;
- previsioni degli indici di Borsa;
- esplorazioni petrolifere;
- integrazione di sistemi altamente complessi.

Il metodo presenta molti vantaggi ma anche alcuni aspetti negativi.

I vantaggi sono riconducibili ad alcune considerazioni:

- permette la risoluzione di sistemi molto complessi con approssimazione sufficientemente accurata per i casi pratici;
- consente di determinare qualunque grandezza di tipo affidabilistico, che di fatto risulterebbe indeterminabile per via teorica e analitica;
- presenta una applicabilità generale anche verso sistemi non caratterizzati da distribuzioni di probabilità esponenziali, le quali sarebbero matematicamente non risolvibili;
- consente di fare valutazioni nel tempo del comportamento dei sistemi.

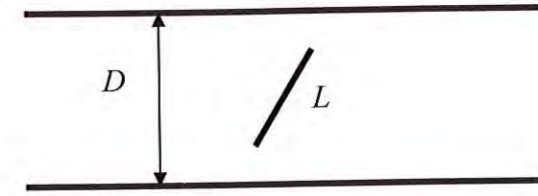


Figura 7.1 Esperienza di Buffon.

Nel corso degli anni, gran parte degli aspetti negativi di questo metodo sono stati ridimensionati grazie ai progressi realizzati nell'ambito informatico.

Come sarà dimostrato in seguito l'accuratezza delle stime determinate dipende dal numero di cicli di simulazione effettuati: minore è la deviazione standard richiesta (associabile a un maggiore numero di cicli di simulazione), maggiori saranno i tempi di simulazione. Per applicazioni reali i codici di calcolo possono risultare notevolmente complessi.

Vediamo di seguito due esempi tradizionalmente utilizzati per la comprensione del metodo.

**Esempio 7.1** L'esperienza di Buffon (1707-1788) consiste nel gettare un ago di lunghezza  $L$  su una griglia di linee parallele distanti  $D$  (Figura 7.1).

Se  $L$  è minore o uguale a  $D$ , la probabilità che l'ago intersechi la griglia è uguale a:

$$P = 2 \cdot \frac{L}{\pi \cdot D}$$

Se lanciamo l'ago  $N$  volte e contiamo le  $R$  intersezioni con la griglia, si ha una stima sperimentale della probabilità:

$$P^* = \frac{R}{N}$$

Uguagliando le due espressioni otteniamo:

$$\pi = 2 \cdot \frac{L \cdot N}{R \cdot D}$$

**Esempio 7.2** Supponiamo [8] di voler calcolare la stima di un volume  $V$   $n$ -dimensionale avente forma comunque complessa.

Il problema può essere risolto ipotizzando di introdurre il volume  $V$  all'interno di un volume  $W$  noto. Campionando un numero  $N$  elevato di punti all'interno di  $W$ , di questi  $n$  risulteranno interni a  $V$  mentre i rimanenti ( $N - n$ ) saranno esterni a  $V$ , ma interni a  $W$ . Il numero di punti  $n$  che cade all'interno di  $V$  è casuale e segue una distribuzione binomiale, la probabilità di successo per ogni singolo caso è  $p$ . Tale probabilità è data dal rapporto  $V/W$ .

Se dunque  $n$  è una stima del numero medio di successi si ha:

$$n \approx Np = N \frac{V}{W}$$

e dunque

$$\hat{V} = \frac{n}{N} W$$

$\hat{V}$  è la stima di  $V$ .

Tenendo conto delle proprietà della distribuzione binomiale, è possibile determinare l'errore relativo statistico associato a  $\hat{V}$ . Tale errore risulterà tanto minore quanto maggiore è il numero di punti campionati  $N$ , infatti se  $\sigma_{\hat{V}}$  è la deviazione standard di  $\hat{V}$  si ha:

$$\frac{\sigma_{\hat{V}}}{\hat{V}} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N-n}{n}}$$

Il metodo Monte Carlo consiste dunque nella riproduzione di una serie di valori casuali, disposti secondo una distribuzione statistica assegnata nota o ricavata per esempio con una analisi della varianza di un set di dati empirici.

Se ora  $f(x)$  è la densità di probabilità relativa alla variabile random  $x$  allora:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

è la sua cumulata.

Se  $r$  è un numero random estratto da una uniforme compresa tra 0 e 1, come noto  $F^{-1}(r)$  appartiene a una distribuzione di frequenza uguale a  $f(x)$ .

La Figura 7.2 mostra il principio di funzionamento del metodo Monte Carlo.

Dal momento che la simulazione Monte Carlo utilizza numeri casuali per la generazione dei valori desiderati, può essere assimilata a un processo di campionamento casuale e pertanto i risultati ottenuti saranno caratterizzati da una incertezza statistica e quindi da una *banda di confidenza*. All'aumentare del numero delle prove effettuate, la larghezza di tale banda si riduce [3], se infatti consideriamo la seguente formula:

$$n = \left[ \frac{z_{1-\alpha/2} \sigma'}{E} \right]^2$$

dove:

- $\sigma'$  = deviazione standard del campione ottenuto con simulazione Monte Carlo;
- $E$  = errore massimo ammesso;
- $1 - \alpha$  = il livello di confidenza nell'ipotesi di distribuzione normale  $z$  (valida se  $n$  è sufficientemente elevato);
- $n$  = il numero di esperimenti che dobbiamo effettuare.

la relazione precedente esprime quanto detto in precedenza e cioè che all'aumentare del numero di esperimenti aumenta la precisione dell'output finale.

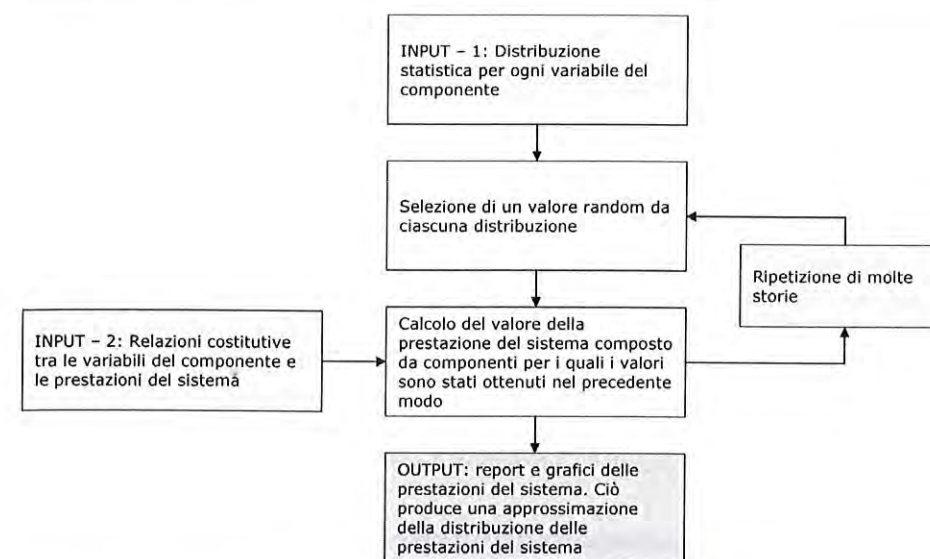


Figura 7.2 Il principio del metodo Monte Carlo.

Un aspetto fondamentale da considerare nell'applicazione di un *simulatore stocastico*, è quello di valutare la bontà dei valori che sono stati prodotti da esso. Il test più usato a questo scopo è quello di Mann e Whitney, il quale applicato a due campioni distinti permette di stabilire se provengano o meno dalla stessa popolazione. La sola ipotesi da rispettare è che la popolazione sia caratterizzata da una distribuzione continua, qualunque essa sia. Vedremo più avanti la modalità per trasformare *distribuzioni discrete* in *distribuzioni continue*. Quello che interesserà, sarà dunque verificare che il campione reale rilevato da campo e quello ottenuto attraverso la simulazione, appartengono alla stessa popolazione, e quindi che il simulatore è ben rappresentativo della realtà.

Ciascuna entità presente nel modello costruito sarà caratterizzata da una propria distribuzione di probabilità pdf ( $x$ ) e per questo nella Tabella 7.1 vogliamo indicare la corrispondenza fra alcune delle pdf ( $x$ ) più note con le procedure usate per ottenere un valore random della variabile  $x'$ , dati i valori random  $R_U$  estratti a partire dalla uniforme  $U$  (uniforme(0,1)). Per fare questo sarà utilizzato il metodo della *trasformata inversa*. Esso è ampiamente impiegato con distribuzioni sia di tipo continuo sia di tipo discreto.

Partiamo a tale proposito con il considerare una variabile casuale  $X$  appartenente all'intervallo  $(-\infty, \infty)$  avente distribuzione cumulata di probabilità  $F_X(x)$  e funzione di densità della probabilità  $f_X(x)$ , tale che

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(x) dx = Prob\{X \leq x\}$$

**Tabella 7.1** Campionamento casuale dalle distribuzioni più frequenti

Distribuzione	pdf (x)	Valore random associato x'
Esponenziale	$\gamma e^{-\lambda(x-\mu)}, \mu \leq x < \infty$	$-\frac{1}{\lambda} \ln(1 - R_U) + \mu$
Gamma	$\frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} e^{-\lambda x} x^{\eta-1}, 0 \leq x < \infty$	$-\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{\eta} \ln(1 - R_{U_i})$
Log-normale	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right]^2\right\}, 0 \leq x < \infty$	$e^{\sigma R_N + \mu}$
Weibull	$\frac{\eta}{\sigma^\eta} x^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^\eta\right], 0 \leq x < \infty$	$-\sigma [\ln(1 - R_U)]^{1/\eta}$
Poisson	$\frac{e^{-\lambda}}{x!} \lambda^x, x = 0, 1, 2, \dots$	$x' = k, k \text{ è il più piccolo intero t.c. } \sum_{i=1}^{k+1} -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - R_{U_i}) > 1$

Se  $F_X(x)$  è una funzione non decrescente, per qualsiasi valore di  $y$  compreso nell'intervallo  $[0,1)$  la sua funzione inversa può essere definita come:

$$F_X^{-1}(y) = \inf\{x : F_X(x) = y\}$$

In base a questa definizione si può ipotizzare la possibilità che in un qualche intervallo  $[x_s, x_d] F_X(x)$  sia costante (e  $f_X(x)$  sia nullo) in altri termini:

$$F_X(x) = \gamma \quad \text{per } x_s \leq x \leq x_d$$

Adesso possiamo anche ipotizzare che la funzione  $F_X(x)$  sia sempre crescente.

In queste condizioni è possibile dimostrare che si possono ottenere valori  $X$  da  $F_X(x)$ , a partire da valori  $R$  campionati da una distribuzione uniforme  $U_R[0,1)$ . Infatti se  $R$  è uniformemente distribuito in  $[0,1)$  si ha che:

$$\text{Prob}\{R \leq r\} = U_R(r) = r$$

In corrispondenza di un numero  $R$  estratto da una distribuzione  $U_R(r)$ , si determina il numero  $X = F_X^{-1}(R)$ . Infatti:

$$\text{Prob}\{X \leq x\} = \text{Prob}\{F_X^{-1}(R) \leq x\}$$

Dato che  $F_X(x)$  è una funzione crescente, applicando  $F_X(x)$ , la disuguaglianza è conservata e si ottiene:

$$\text{Prob}\{X \leq x\} = \text{Prob}\{R \leq F_X(x)\} = F_X(x)$$

Da quanto detto segue che  $X = F_X^{-1}(R)$  è estratto da  $F_X(x)$ . Dal momento che  $F_X(x) = r$  si ha

$$\text{Prob}\{X \leq x\} = \text{Prob}\{R \leq r\}$$

In termini di distribuzione cumulata di probabilità si ottiene che:

$$U_R(R) = F_X(x) \quad \text{e} \quad R = \int_{-\infty}^x f_X(x') dx'$$

Questa è la relazione fondamentale del metodo della trasformata inversa in quanto essa consente di determinare il valore  $X$  campionato da una qualunque distribuzione  $F_X(x)$  a partire dalla distribuzione uniforme  $U_R[0,1)$ .

Nel caso in cui la funzione  $F_X(x)$  risulti non invertibile analiticamente, e quindi questo metodo non possa essere applicato a essa, si ricorre a una procedura approssimata che consiste nell'effettuare una interpolazione della  $F_X(x)$  con una funzione poligonale e nell'effettuare l'inversione dell'equazione risultante dalla interpolazione.

La precisione di questa procedura aumenta all'aumentare dei punti di  $F_X(x)$  per i quali passa la poligonale.

Nel caso di distribuzioni discrete il percorso è analogo.

## 7.2 Distribuzioni di probabilità discrete equivalenti a distribuzioni continue

È possibile trovare una espressione continua anche per distribuzioni di probabilità discrete. Questo risulta molto utile in quanto permette di usufruire delle proprietà associate alle distribuzioni continue.

Se consideriamo una distribuzione discreta  $\{p_i\}$ , possiamo associare l'evento  $i$ -esimo alla variabile random discreta  $x_i$  e definire una funzione equivalente nel seguente modo:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N p_i \delta(x - x_i)$$

dove la funzione  $\delta(x - x_i)$  è denominata *delta di Dirac* e gode di alcune proprietà.

La funzione  $\delta$  è anche detta *impulso* ed è caratterizzata dall'avere altezza illimitata e area unitaria.

Essa è tale che:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_i) dx = 1$$

e

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_i) dx = f(x_i)$$

Utilizzando queste proprietà, si può dimostrare che media e varianza della distribuzione di probabilità continua equivalente risultano uguali a media e varianza della distribuzione di probabilità discreta originale.

Infatti:

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} x \left[ \sum_{i=1}^N p_i \delta(x - x_i) \right] dx$$

Adesso portando il simbolo di sommatoria al di fuori dell'integrale e applicando la seconda proprietà della funzione  $\delta$  si ottiene

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} xp_i \delta(x - x_i) dx = \sum_{i=1}^N x_i p_i$$

che è la vera media della distribuzione discreta.

La stessa impostazione può essere utilizzata anche per il calcolo della varianza.

### 7.3 Concetti fondamentali di un algoritmo Monte Carlo

Nel corso degli anni sono stati sviluppati alcuni algoritmi, ciascuno dei quali presenta peculiarità distintive, originate dalla esigenza di risolvere specifiche problematiche. Tutti questi algoritmi hanno comunque alcuni elementi essenziali di connotazione del metodo, dai quali non è possibile prescindere. Gli elementi principali comuni a tutti i metodi Monte Carlo sono i seguenti:

1. *Funzioni di distribuzione della probabilità*: il sistema fisico o matematico, deve essere descritto con un insieme di distribuzioni di probabilità.
2. *Generatore di numeri random*: una sorgente di numeri random, uniformemente distribuiti nell'intervallo unitario, deve essere disponibile.
3. *Regola di campionamento*: deve essere stabilita una regola per effettuare il campionamento da una distribuzione di probabilità specificata, assumendo che vi sia disponibilità di numeri casuali nell'intervallo unitario.
4. *Stima delle grandezze*: i risultati devono essere accumulati all'interno dei punteggi generali per le grandezze di interesse.
5. *Stima dell'errore*: deve essere determinata la stima di un errore statistico (varianza) anche come funzione del numero di estrazioni (oltre che di altre quantità).
6. *Tecniche di riduzione della varianza*: sono i metodi per la riduzione della varianza nella soluzione stimata, usati per aumentare l'efficienza della simulazione Monte Carlo.
7. *Parallelizzazione e vettorizzazione*: algoritmi che permettono al metodo Monte Carlo di essere implementato in modo efficiente su elaboratori elettronici.

#### 7.3.1 I numeri random

Esistono tre principali tipologie di numeri random:

- *numeri random veri e propri*: ciascun elemento ha la stessa probabilità di essere estratto, non vi è alcuna periodicità e correlazione fra gli elementi;

- *numeri pseudo-random*: presentano molte delle proprietà dei numeri random veri e propri, ma i test possono evidenziare che essi sono stati determinati a partire da un modello; infatti risultano in parte prevedibili. I numeri di questo tipo richiedono un numero (*seed*) per iniziare, il quale viene inserito all'interno delle equazioni. Per la generazione dei numeri successivi, vengono di seguito utilizzate parti dei risultati per le iterazioni;
- *numeri quasi-random*: presentano alcune differenze rispetto ai numeri random veri e propri, ma sono utilizzati ampiamente nel metodo Monte Carlo.

In un primo momento furono utilizzati generatori di numeri random di tipo meccanico (lancio dei dadi, biglie numerate e colorate).

In seguito furono sviluppati generatori aritmetici di numeri random, basati sull'uso degli elaboratori, i quali utilizzavano alcuni modelli analitici. Con questo tipo di generatori, un numero casuale è ottenuto a partire da uno o più valori precedentemente determinati e da equazioni matematiche predefinite.

I principali vantaggi legati all'uso di questo tipo di generatori sta nella loro maggiore velocità (rispetto a quelli meccanici) e nella loro ripetitività.

I generatori a cui oggi si fa più ampiamente ricorso nella generazione di numeri random sono:

- Linear Congruential Generator;
- Lagged Fibonacci Generator;
- Shift Register Generator;
- Combined Generator.

La trattazione di tali strumenti esula dal presente contesto.

Un insieme di numeri random dovrebbe soddisfare la condizione di non correlazione.

L'importanza dei numeri random uniformi (estratti da una distribuzione  $U(0,1)$ ) sta nella loro possibilità di essere trasformati in valori reali che seguono una qualunque distribuzione, e per questo motivo essi sono alla base di molte simulazioni ingegneristiche.

#### 7.3.2 Il campionamento di numeri random a partire da una qualunque distribuzione di probabilità

Sia  $X$  una variabile random avente la seguente funzione di distribuzione cumulata di probabilità:

$$\text{Prob}\{X \leq x\} = F_X(x) \quad \text{con} \quad F_X(-\infty) = 0 \quad \text{e} \quad F_X(\infty) = 1$$

$F_X(x)$  è dunque una funzione non decrescente e supponiamo che sia continua e differenziabile.

La corrispondente funzione di densità di probabilità è dunque:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx}; \quad f_X(x) \geq 0; \quad \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1$$

Esistono varie modalità per effettuare un campionamento di valori dalla distribuzione cumulata di probabilità  $F_X(x)$ . Una sequenza di  $N \gg 1$  valori  $\{X\} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ , campionati da  $F_X(x)$  deve avere le seguenti proprietà:

1. il numero dei punti campionati  $n$  che cadono all'interno dell'intervallo  $\Delta x \ll X_{\max} - X_{\min}$  (con  $X_{\max}$  e  $X_{\min}$  rispettivamente il valore massimo e minimo di  $X$ ) dovrebbe essere tale che:

$$\frac{n}{N} \approx \int_{\Delta x} f_X(x) dx$$

2. non vi deve essere correlazione fra i valori di  $X_i$ ;
3. se la sequenza di  $\{X\}$  è periodica, il periodo della ripetitività dei valori deve essere il più esteso possibile.

All'interno di questo processo di campionamento, la distribuzione uniforme  $U(0, 1)$  come detto, è assolutamente fondamentale.

### 7.3.3 Integrazione Monte Carlo

La conoscenza del metodo Monte Carlo è essenziale in quei casi in cui sia richiesto di determinare una stima di integrali complessi. Nell'Esempio 7.2 abbiamo visto un modo per determinare un volume  $V$ .

Supponiamo ora di volere valutare il seguente integrale definito (Figura 7.3):

$$I = \int_a^b g(x) dx$$

dove si assume che  $g(x)$  sia a valori reali fra  $(-\infty, \infty)$ .

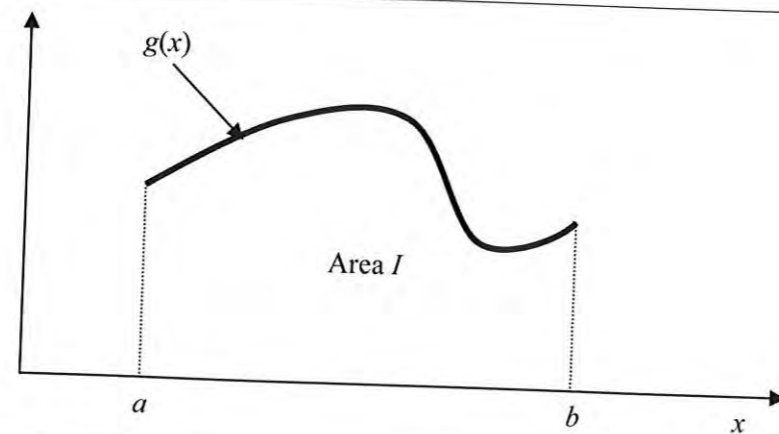


Figura 7.3 Rappresentazione dell'integrale  $I$ .

L'idea che consente di determinare l'integrale con il metodo Monte Carlo è quella di manipolare l'integrale definito in una forma che può essere risolta e a tale scopo definiamo la seguente funzione sull'intervallo  $[a, b]$

$$f(x) = \begin{cases} 1/(b-a), & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{altrove} \end{cases}$$

Inserendo nella equazione di  $I$  si ottiene:

$$I = (b-a) \int_a^b g(x) f(x) dx$$

Si noti che  $f(x)$  può essere vista come una funzione di densità della probabilità uniforme nell'intervallo  $[a, b]$ .

Essendo dunque  $f(x)$  una funzione di densità della probabilità, allora risulta che l'integrale è semplicemente il valore atteso di  $g(x)$ :

$$I = (b-a) \int_a^b g(x) f(x) dx = (b-a) \bar{g}$$

Effettuando adesso alcuni campionamenti  $x_i$  dalla distribuzione di probabilità  $f(x)$ , e valutando  $g(x_i)$  per ogni  $x_i$ , si determina la media  $G$  di  $N$  valori campionati:

$$G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i)$$

Il valore atteso di  $G$ ,  $\bar{G}$  è così definito:

$$\bar{G} = \frac{1}{N} E \left[ \sum_{i=1}^N g(x_i) \right] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{g} = \bar{g}$$

Essendo dunque  $\bar{G} = \bar{g}$  si ha:

$$I = (b-a) \bar{G} \approx (b-a) G = (b-a) \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i) \right)$$

Dunque possiamo stimare il vero valore dell'integrale  $I$  su  $[a, b]$ , prendendo la media di  $N$  osservazioni della funzione integranda [8], con la variabile random campionata uniformemente sull'intervallo  $[a, b]$ . Questo implica che l'intervallo  $[a, b]$  sia finito, poiché un intervallo infinito non potrebbe avere una distribuzione uniforme di probabilità.

Si può anche dimostrare che:

$$\text{Var}(G) = \frac{1}{N} \text{Var}(g)$$



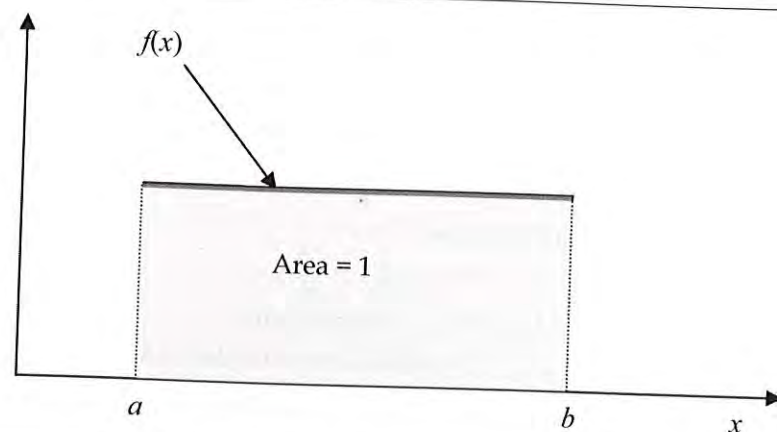


Figura 7.4 Integrale della funzione uniforme.

Se si associa dunque l'errore nella stima dell'integrale  $I$  con la deviazione standard, allora ci possiamo aspettare che l'errore nella stima di  $I$  diminuisca di un fattore  $\sqrt{N}$ .

Possiamo adesso applicare i concetti appena esposti a un esempio: consideriamo a questo scopo il gioco del lancio del giavellotto in cui la probabilità di colpire un punto  $x \in dx$  è  $f(x)dx$ .

Ipotizziamo che i lanci siano indipendenti fra loro e che  $f(x)$  non cambi.

Quando un giocatore colpisce un punto  $x$ , riceve un premio  $g(x)$ .

In una serie di  $N$  lanci, in cui i punti  $x_1, x_2, \dots, x_N$  sono colpiti, i premi assegnati sono  $g(x_1), g(x_2), \dots, g(x_N)$ . Il premio medio per lancio è dunque:

$$G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i)$$

Dato che  $g(x_i)$  è una variabile random, anche  $G$  è una variabile random che ha come valore atteso e varianza rispettivamente:

$$\bar{G} = E[G] = \frac{1}{N} E \left[ \sum_{i=1}^N g(x_i) \right]$$

e

$$Var[G] = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N Var[g(x_i)]$$

$E[g(x_i)]$  e  $Var[g(x_i)]$  sono il valore atteso e la varianza di  $g(x)$  calcolati nel punto  $i$ -esimo.

Ognuno di questi valori attesi è determinato su un numero di  $M$  giocatori ciascuno dei quali colpisce i punti  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}$  al lancio  $i$ -esimo.

Dal momento che la distribuzione di probabilità di questi valori non dipende dal considerare in particolare l' $i$ -esimo lancio (il che implica che  $f(x)$  è indipendente da  $i$ ), il processo è stazionario e

$$E[g(x_i)] = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M g(x_{ij}) = E[g(x)] = \bar{G}$$

In modo analogo si determina

$$Var[g(x_i)] = Var[g(x)] = E[g^2(x)] - \bar{G}^2$$

E dunque

$$E[G] = E[g(x)] = \bar{G}$$

$$Var[G] = \frac{1}{N} Var[g(x)] = \frac{1}{N} E[g^2(x)] - \bar{G}^2$$

In realtà però sia  $E[g^2]$  sia  $\bar{G}$  sono incogniti e al loro posto possiamo utilizzare stime associate a campioni con elevata numerosità.

Se ora supponiamo che

$$E[g(x)] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i) = \bar{g}$$

$$E[g^2(x)] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g^2(x_i) = \bar{g}^2$$

Per  $N \gg 1$  allora segue che  $\bar{G} \approx G$  e

$$E[G] \cong G = \bar{g}$$

$$Var[G] \approx s_G^2 = \frac{1}{N} (\bar{g}^2 - \bar{g}^2)$$

In realtà sarebbe opportuno porre  $N - 1$  al denominatore anziché  $N$ , in modo da tenere conto dei gradi di libertà nel calcolo di  $\bar{g}$ . Avendo però ipotizzato un campione a elevata numerosità, tale approssimazione risulta trascurabile.

Nei casi in cui le funzioni  $f(x)$  e  $g(x)$  risultano avere l'una valori elevati e l'altra valori ridotti, si ha la conseguenza che per la maggior parte dei valori  $x_i$  campionati si avranno valori di  $g(x_i)$  ridotti che danno quindi uno scarso contributo alla determinazione di  $G$ .

In questi casi è allora opportuno utilizzare una variante del metodo qui indicato che prende il nome di *simulazione forzata*; tale argomento non sarà trattato in questo contesto.

## 7.4 Una definizione di affidabilità strutturale

Riprendiamo ora la definizione di affidabilità: per un componente essa può essere definita come la probabilità che quel componente sia in grado di svolgere le funzioni

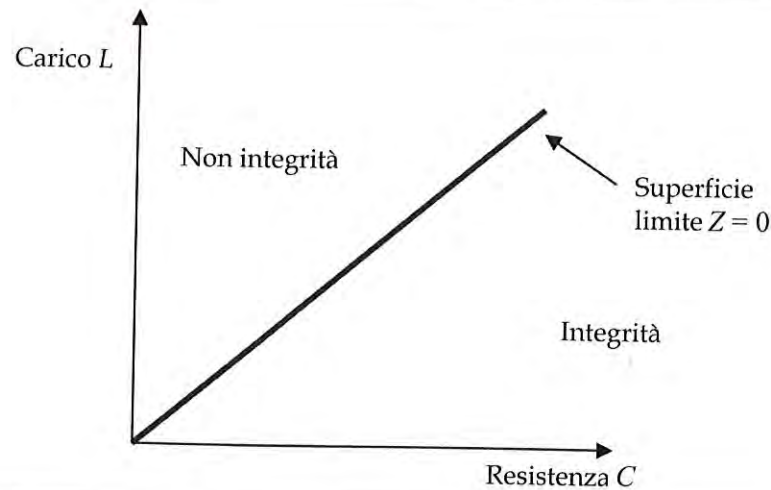


Figura 7.5 Rappresentazione dell'affidabilità strutturale.

per le quali è stato progettato per un determinato periodo di tempo e in condizioni di esercizio definite. Riferendosi ora a un elemento strutturale [11], per esempio una trave, la sua affidabilità può essere vista come la probabilità che la sua capacità di carico  $C$  sia superiore ai carichi applicati  $L$ .

L'affidabilità  $R_e$  è dunque data da:

$$R_e = P(C > L)$$

$C$  e  $L$  sono funzioni di molte variabili random di base ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) (area della sezione della trave, tensione di snervamento ecc.).

Possiamo pertanto definire una funzione  $Z$  tale che:

$$Z = C - L$$

Allora  $Z$  è esprimibile come funzione delle variabili random di base di  $C$  e  $L$

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$g$  è la funzione che descrive le relazioni fra  $C$ ,  $L$  e le variabili random.

La performance  $Z$  è definita in modo tale che avviene un guasto della trave quando  $Z$  assume valori negativi, la trave è integra quando  $Z$  assume valori positivi.  $Z$  assume valore nullo in corrispondenza dello stato limite (Figura 7.5).

La probabilità di guasto  $P_f$  è complemento a 1 della affidabilità  $R_e$ .

In altri termini:

$$P_f = P(Z < 0) = P[g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0]$$

Nel caso generale, le variabili random di base possono anche essere correlate; in tale caso la probabilità di guasto può essere determinata risolvendo il seguente integrale:

$$P_f = \int \dots \int_{f_{\underline{X}}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n} \text{integrando su } Z \leq 0$$

dove  $f_{\underline{X}}$  è detta funzione di densità della probabilità congiunta del vettore  $\underline{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ .

La risoluzione dell'integrale sopra riportato nella maggior parte dei casi può risultare difficoltosa e a tale proposito, citiamo due metodi utilizzati per la sua risoluzione:

1. FOR – First Order Reliability Method
2. ASM – Advanced Second Moment Method.

Tali procedimenti non vengono trattati.

## 7.5 Incremento della efficienza della simulazione

L'efficienza della simulazione, può essere migliorata in modo sensibile, attraverso l'uso di tecniche di riduzione della varianza.

Le due principali tecniche usate a tale scopo sono:

1. metodo di *importance sampling*;
2. metodo della *conditional expectation*.

Questi due metodi sono stati sviluppati per ottenere una rapida convergenza al valore corretto di probabilità dei guasti, con un ridotto numero di simulazioni.

**Metodo di importance sampling** Riprendendo la definizione di affidabilità strutturale, la probabilità del guasto della trave era data da:

$$P_f = \int \dots \int_{f_{\underline{X}}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n} \text{integrando su } Z \leq 0$$

Nella determinazione dell'integrale con la simulazione diretta, l'efficienza delle simulazione (espressa dunque dalla rapidità di convergenza) dipende dal valore della probabilità di guasto e a valori più bassi delle probabilità di guasto corrisponde un maggiore numero di cicli di simulazione.

Questo comportamento può essere eliminato attraverso l'adozione dell'*importance sampling*. In questo metodo, le variabili random di base sono generate secondo alcune distribuzioni di probabilità attentamente selezionate con valori medi che sono più vicini al punto di progetto delle loro originali distribuzioni di probabilità.

Si noti però che il punto di progetto non è noto a priori, l'analista può soltanto ipotizzarlo. In questo modo, riferendosi all'esempio della trave visto nel paragrafo precedente, i punti nell'area di rottura della trave sono estratti più frequentemente e l'efficienza della simulazione è incrementata. Per compensare il cambiamento nella distribuzione di probabilità, i risultati dei cicli di simulazione dovrebbero essere corretti. L'equazione fondamentale per questo metodo è data allora da:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_f \frac{f_{\underline{X}}(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})}{h_{\underline{X}}(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})}$$

$N$  è il numero dei cicli di simulazione,  $f_{\underline{X}}(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$  è la funzione di densità di probabilità congiunta *originale* delle variabili random di base, valutata in corrispon-

denza del valore  $i$ -esimo generato delle variabili random di base,  $h_X(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$  è la funzione densità di probabilità congiunta *selezionata* delle variabili random di base, valutata in corrispondenza del valore  $i$ -esimo generato delle variabili random di base e  $I_f$  è una funzione indicatore del guasto che assume il valore 1 per i punti di non-integrità e 0 per i punti di integrità.  $h_X(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$  è chiamata funzione di densità del campionamento o funzione *importanza*.

L'efficienza della simulazione, e dunque il numero di cicli richiesti, dipende dalla scelta della funzione importanza.

**Metodo della conditional expectation** Riprendiamo ancora una volta la definizione di probabilità di guasto strutturale (compreso il caso limite  $C = L$ ):

$$P_f = P(Z \leq 0) = P(C \leq L)$$

Per un valore generato casualmente di  $L$  (o  $C$ ),  $l_i$  (o  $c_i$ ) la probabilità di guasto è data da:

$$P_{fi} = \text{Prob}(C \leq l_i) = F_C(l_i)$$

o anche

$$P_{fi} = \text{Prob}(L \geq c_i) = 1 - F_L(c_i)$$

dove  $F_C$  e  $F_L$  sono le funzioni di distribuzione cumulate di  $C$  e  $L$  rispettivamente. In questa formulazione  $C$  e  $L$  sono assunte come due variabili random statisticamente non correlate.

Dunque per  $N$  cicli di simulazione, il valore medio della probabilità di guasto è dato dalla seguente equazione:

$$\bar{P}_f = \frac{\sum_{i=1}^N P_{fi}}{N}$$

La varianza ( $Var$ ) e il coefficiente di varianza ( $COV$ ) della probabilità stimata (da campione) di guasto sono date rispettivamente da:

$$Var(\bar{P}_f) = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{fi} - \bar{P}_f)^2}{N(N-1)}$$

e

$$COV(\bar{P}_f) = \frac{\sqrt{Var(\bar{P}_f)}}{(\bar{P}_f)}$$

Per la funzione generale di prestazione  $Z$ , il metodo della *conditional expectation*, può essere utilizzato nella generazione di tutte le variabili random di base, a eccezione di una, chiamata *variabile di controllo*  $X_k$ .

Le variabili generate casualmente dovrebbero essere selezionate come quelle aventi variabilità minima e la media condizionata risultante (*conditional expecta-*

*tion*) può essere valutata con alcune espressioni note, ovvero la funzione di distribuzione cumulata della variabile casuale di controllo  $X_k$ , non generata casualmente.

Questo metodo può essere utilizzato per qualsiasi funzione di prestazione  $Z$  con qualsiasi distribuzione di probabilità associata alle variabili casuali.

La sola limitazione è data dalla condizione di non correlazione statistica fra la variabile di controllo  $X_k$  e la funzione  $g_k$ , nella definizione della funzione prestazione  $Z$ .

In base a questo metodo, la varianza della quantità stimata è ridotta rimuovendo dal processo di simulazione, la variabilità associata alla variabile di controllo.

Inoltre il metodo converge alla corretta probabilità di guasto con un ridotto numero di cicli di simulazione.

## 7.6 Un semplice esempio di applicazione del metodo Monte Carlo

Sia dato ora un gruppo di pompaggio [6] costituito da due rami funzionalmente in parallelo e siano note le caratteristiche di affidabilità dei componenti (Figura 7.6).

Dalla teoria dell'affidabilità sappiamo che, indicando con  $R_A$  e  $R_B$  le affidabilità dei due rami:

$$R_A = \sum_{i=1}^5 R_{Ai} = R_{VA1} + R_{PA} + R_{FA} + R_{VRA} + R_{VA2} \quad \text{e ipotizziamo che } R_A = R_B$$

Inoltre l'affidabilità di due rami in parallelo ( $R_S$ ) è:

$$1 - R_S = (1 - R_A)(1 - R_B)$$

Il valore del *rateo di guasto* (nella ipotesi di *tasso di guasto* costante) è dato da:

$$\lambda_A = \sum_{i=1}^5 \lambda_{Ai} = \lambda_{VA1} + \lambda_{PA} + \lambda_{FA} + \lambda_{VRA} + \lambda_{VA2} \quad \text{e ipotizziamo che } \lambda_A = \lambda_B$$

Dalla relazione che lega il tasso di guasto e il *MTBF* (nel caso di componenti/sistemi riparabili), si ha che:

$$MTBF_S = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{\lambda_A} + \frac{1}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B}$$

Il valore del *rateo di guasto* del sistema è dunque nella ipotesi che sia  $\lambda_A = \lambda_B$ :

$$\lambda_S = \frac{2}{3} \lambda_A = \frac{2}{3} \lambda_B$$

Nel caso in cui i valori dei tassi di guasto dei componenti siano deterministicamente noti, possiamo impiegare le semplici formule indicate.

Se i valori (non aleatori) di Tabella 7.2 sono quelli considerati, otteniamo i seguenti risultati:

$$\lambda_A = \lambda_B = 32 \frac{\text{guasti}}{10^6 \text{ ore}} \quad \text{e} \quad \lambda_S = \frac{2}{3} \lambda_A = 21.3 \frac{\text{guasti}}{10^6 \text{ ore}}$$

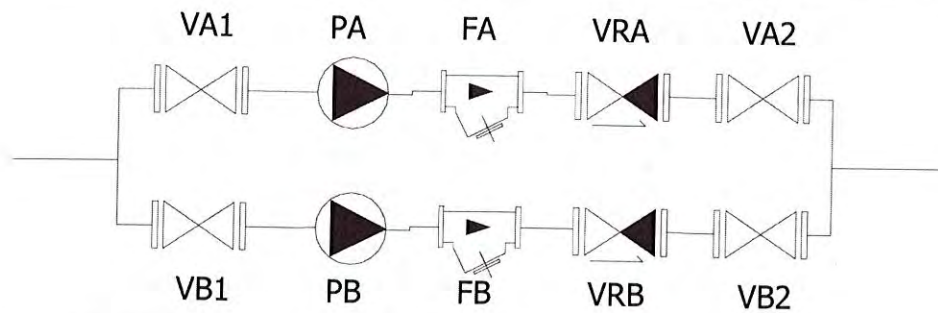


Figura 7.6 Schema di un gruppo di pompaggio.

Tabella 7.2 Tassi di guasto [guasti/10<sup>6</sup>ore]

Ramo A	$\lambda$	Ramo B	$\lambda$
VA1	3	VB1	3
PA	16	PB	16
VRA	2	VRB	2
FA	8	FB	8
VA2	3	VB2	3

Vediamo ora un semplice esempio di risoluzione dello stesso problema: nel caso per i ratei di guasto  $\lambda_i$  siano note le curve di densità di probabilità, possiamo impiegare il metodo Monte Carlo per avere una stima della curva di densità di probabilità del rateo di guasto dell'intero sistema.

Supponiamo ora di avere le curve di densità di probabilità dei ratei di guasto di ciascun componente (Tabella 7.3).

Le curve di distribuzione dei tassi di guasto sono visibili nelle figure seguenti (Figure 7.7-7.10).

Tabella 7.3 Densità di probabilità di guasto

Ramo A	$\lambda$	Distribuzione	Ramo B	$\lambda$	Distribuzione
VA1	3	uniforme	VB1	3	uniforme
PA	16	normale	PB	16	normale
VRA	2	triangolare	VRB	2	triangolare
FA	8	Weibull	FB	8	Weibull
VA2	3	uniforme	VB2	3	uniforme

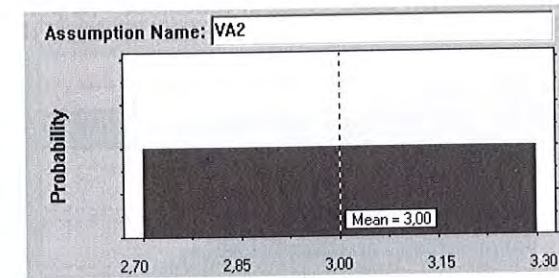


Figura 7.7 Distribuzione uniforme VA-1/2 e VB-1/2.

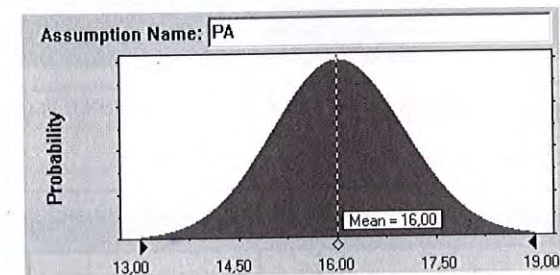


Figura 7.8 Distribuzione normale PA e PB.

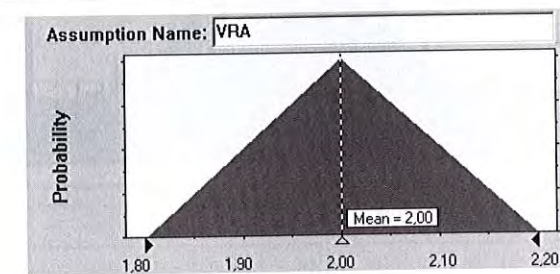


Figura 7.9 Distribuzione triangolare VRA e VRB.

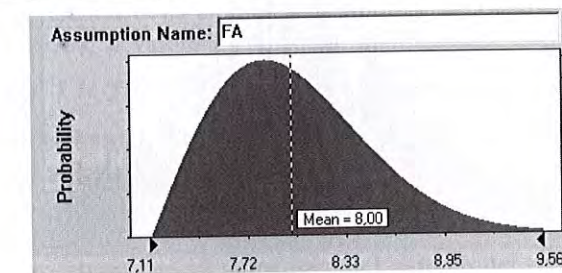


Figura 7.10 Distribuzione di Weibull FA e FB.

Una sessione di simulazione con 1000 "cicli di estrazione" ha portato ai risultati dei grafici seguenti (Figura 7.11-7.14).

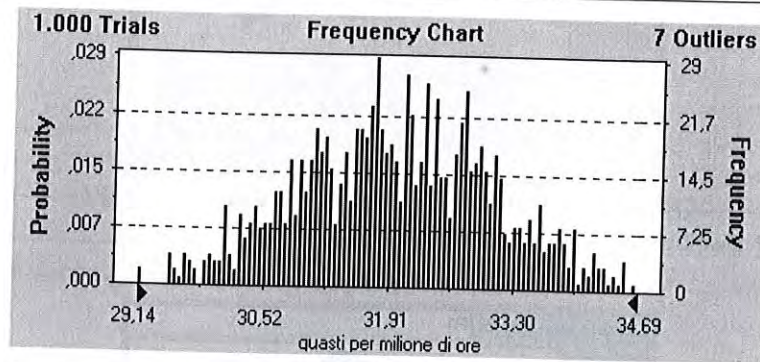


Figura 7.11 Tasso di guasto del ramo A.

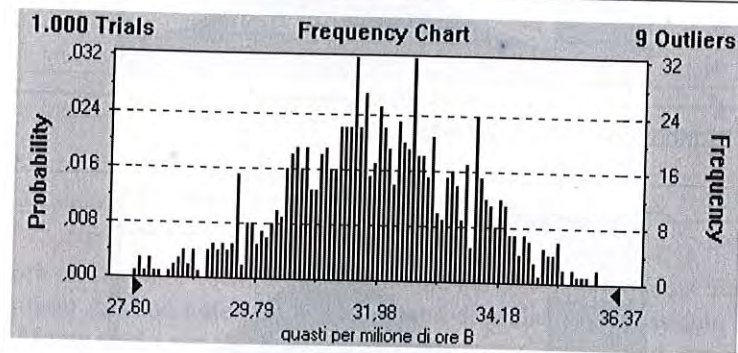


Figura 7.12 Tasso di guasto del ramo B.

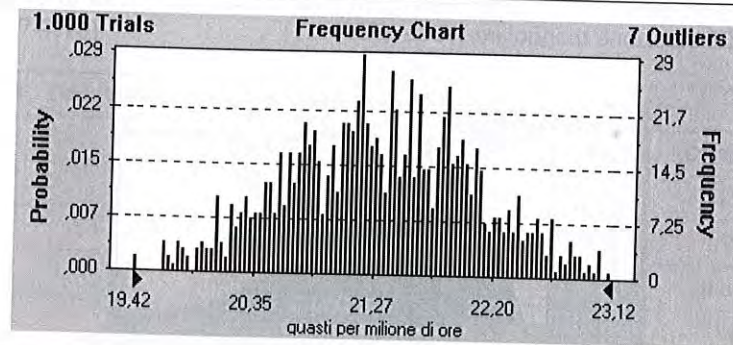


Figura 7.13 Tasso di guasto del sistema completo.

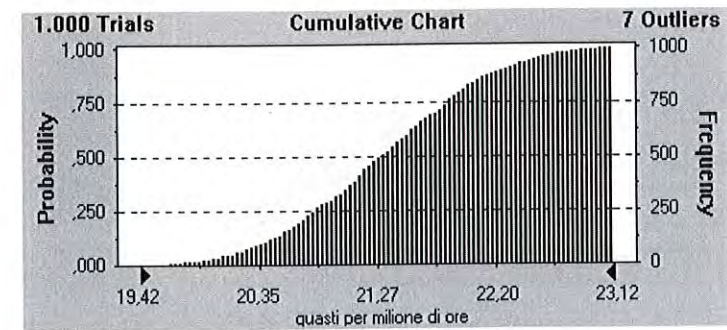


Figura 7.14 Cumulata della densità di probabilità del tasso di guasto del sistema.

Tabella 7.4 Principali statistiche del tasso di guasto del sistema

Statistic	Value
Trials	1.000
Mean	21,34
Median	21,32
Mode	...
Standard Deviation	0,73
Variance	0,53
Skewness	0,00
Kurtosis	2,75
Coeff. of Variability	0,03
Range Minimum	18,80
Range Maximum	23,51
Range Width	4,70
Mean Std. Error	0,02

Come si nota dai risultati della simulazione riportati in Tabella 7.4 e rappresentati nelle Figure 7.11-7.14, il valore medio della distribuzione ottenuta è 21,34 molto prossimo al valore  $\lambda = 21,3 \frac{\text{guasti}}{10^6 \text{ ore}}$ , ottenuto precedentemente in modo analitico.

Attraverso la simulazione, però, abbiamo informazioni sulla distribuzione delle frequenze attorno al valore atteso. Con le distribuzioni di partenza otteniamo per esempio che il rateo di guasto del sistema si trova tra 19,81 e 22,67 con il 95% di probabilità (Figura 7.15).

Si potrebbe dimostrare che all'aumentare del numero dei cicli di simulazione, il valore della affidabilità calcolato con Monte Carlo si avvicina sempre di più a quello calcolato analiticamente.

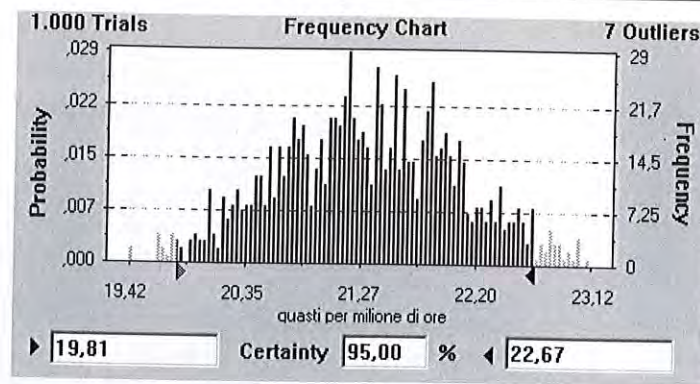


Figura 7.15 Si ha il 95% di probabilità che il tasso di guasto sia nell'intervallo indicato.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] A. Dubi, *Modeling of realistic systems with the Monte Carlo Method – A unified system engineering approach*, Annual Reliability and Maintainability Symposium – 2001 Tutorial Notes, ISSN 0897-5000.
- [2] R. Rinaldi, *Valutazione di alternative di impianto nel settore energetico: progetto di un DSS in regime stocastico*, Tesi di Dottorato, Firenze, 1995.
- [3] G.J. Hahn e S.S. Shapiro, *Statistical Models in Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [4] D. Kececioglu, *Reliability Engineering Handbook*, Prentice Hall, New Jersey, PTR, 1998.
- [5] *Crystal Ball Tutorials*, professional evaluation realise, ed. 2000.
- [6] D. Saccardi, G. Ceschini, F. De Carlo, "Il metodo Monte Carlo", *Manutenzione – Tecnica e Management*, n. 10, 2001.
- [7] T. D'Alessio, G. Meucci, R. Somma, *I metodi dell'affidabilità*, Franco Angeli Milano, 1987.
- [8] M. Marseguerra, E. Zio, *Basics of the Monte Carlo method with application to System Reliability*, LiLoLe-Verlag, Hagen 2002.
- [9] M. Evans, T. Swartz, *Approximating Integrals via Monte Carlo and Deterministic Methods*, Oxford University Press, 2000.
- [10] W.G. Schneeweiss, *Reliability Modeling*, LiLoLe-Verlag, Hagen 2001.
- [11] B.M. Ayyub, R.H. McCuen, *Probability, statistics, & reliability for engineers*, CRC Press, New York 1997.
- [12] A. Dubi, *Monte Carlo applications in system engineering*, John Wiley & Sons, New York, 2000.

L'acronimo FMEA sta per *Failure Mode Effect Analysis*, ovvero analisi dei modi di guasto e degli effetti.

Si tratta probabilmente della tecnica più conosciuta e diffusa nell'ambito industriale e, anche se nel corso degli anni sono stati sviluppati approcci analitici più quantitativi, la sua applicabilità generale ne fa ancora uno strumento di notevole interesse.

La metodologia FMEA procede infatti all'analisi dell'affidabilità di un sistema, in modo per lo più qualitativo; va comunque precisato fin dall'inizio che essa consente di valutare anche altre caratteristiche di un sistema quali la sua manutenibilità, sicurezza, logistica e diagnostica.

Si possono menzionare tre principali obiettivi per una FMEA:

1. individuare e analizzare tutti i guasti potenziali associati a un certo sistema, valutandone anche gli effetti;
2. identificare le azioni volte a eliminare o ridurre in modo sensibile i guasti del sistema e le conseguenze indesiderate associate;
3. documentare il sistema da un punto di vista funzionale, in fase sia progettuale sia di esercizio.

L'analisi FMEA nacque intorno al 1950 presso la NASA, dove prese grande impulso all'interno del programma lunare Apollo nel quale il riconoscimento e la classificazione dei guasti e degli effetti associati, risultava essere estremamente importante ai fini della missione spaziale.

In seguito la metodologia si diffuse anche nell'ambito manifatturiero e in particolare nel contesto automobilistico dove fu finalizzata all'aumento della affidabilità dei prodotti.

Questa tecnica, oggi presente in tutti i contesti industriali, ha iniziato da qualche tempo a essere impiegata anche nell'analisi dei processi organizzativi. Nel corso degli anni è stata sottoposta a una forte attività di standardizzazione e per questo si

possono reperire varie normative tecniche di riferimento, ciascuna delle quali presenta affinità particolari con il settore all'interno del quale è stata sviluppata.

Le due normative maggiormente conosciute restano comunque la MIL-STD-1629(A) del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America (US DoD) e la SAE J1739 della Society of Automotive Engineers.

L'impostazione della FMEA prevede di tracciare un quadro completo relativo al comportamento di un sistema, in tutte le possibili situazioni di impiego, e di definire tutte le modalità di guasto, da quelle di secondaria importanza a quelle che portano alla crisi di un componente o dell'intero sistema.

A partire da una conoscenza della struttura gerarchica di un sistema, ovvero della sua scomposizione in livelli successivi e ordinati di dettaglio, si indicano le modalità di guasto e le conseguenze associate.

Generalmente questa analisi viene condotta con una logica induttiva di propagazione delle informazioni di tipo *bottom-up*, cioè partendo dal livello di dettaglio più particolare (per esempio il cuscinetto di un gruppo di trasmissione di una macchina utensile) e andando verso livelli più alti (macchina utensile); in alcuni casi però la logica può essere ribaltata adottando un approccio *top-down*.

Nell'esecuzione di una FMEA è necessario tenere presente che i modi di guasto di un singolo componente dipendono dalla sua natura, dalla funzione a cui esso è stato destinato e, infine, dalle condizioni ambientali in cui si trova a operare.

Si possono distinguere tre casi principali in cui poter applicare la metodologia FMEA.

1. *Nuovi progetti, nuove tecnologie, nuovi processi*: in tale caso l'obiettivo della FMEA è quello di dare una visione completa del progetto.
2. *Modifiche a progetti o processi esistenti*: in questo caso l'obiettivo della FMEA è quello di focalizzarsi sulle modifiche al progetto o al processo e sulle possibili interazioni attribuibili a tali modifiche.
3. *Impiego di un progetto o processo esistente in un nuovo ambiente, contesto operativo o applicazione*: in questo caso l'obiettivo della FMEA è quello di prevedere l'impatto di nuove condizioni operative su un sistema esistente.

L'approccio sistematico e strutturato, unitamente a una documentazione adeguata, consente nella maggior parte dei casi di conseguire consistenti miglioramenti.

La fase di definizione del problema oggetto della FMEA risulta chiaramente fondamentale e consiste essenzialmente nello stabilire un appropriato livello di risoluzione per l'analisi e per la descrizione delle condizioni al contorno.

Il primo punto è legato alle caratteristiche del sistema analizzato, ma anche al livello di precisione richiesto dal progetto; le condizioni al contorno sono, invece, costituite dalle interfacce del sistema con i processi e i sistemi esterni.

Un aspetto della FMEA che va sottolineato è dato dall'analisi funzionale che deve essere eseguita sugli oggetti costituenti un sistema, la quale implica anche una fase di schematizzazione delle relazioni funzionali presenti.

Si può affermare che l'analisi FMEA, porta alla costruzione di un albero di sistema (Figura 8.1), all'interno del quale i rami sono rappresentati da funzioni, modi di guasto ed effetti di guasto, opportunamente strutturati e articolati, in modo da elimi-

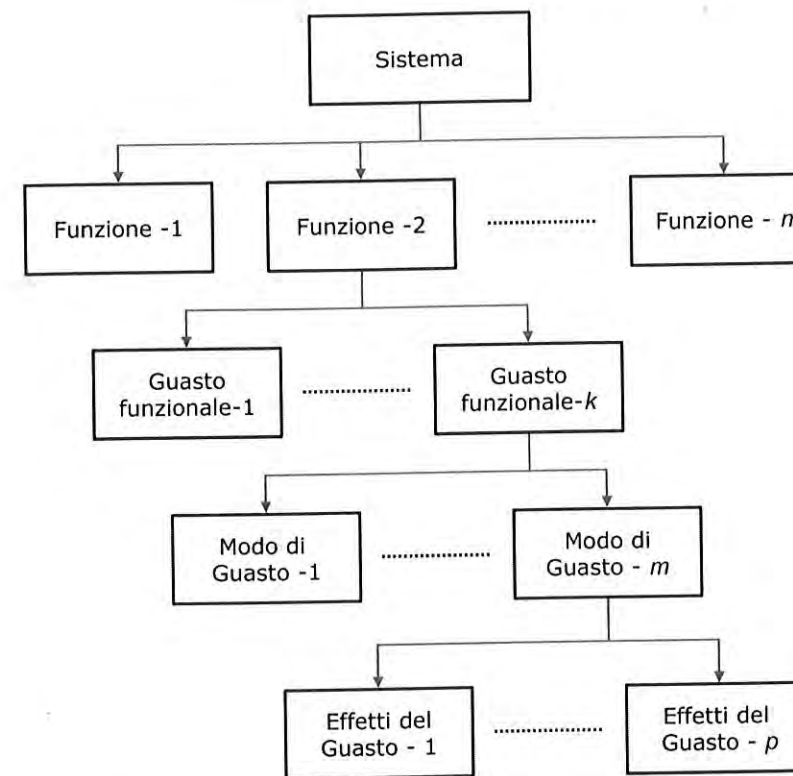


Figura 8.1 Rappresentazione della arborescenza della FMEA.

nare o ridurre le possibili omissioni, soprattutto in quei casi in cui le dimensioni del sistema siano molto rilevanti.

È opportuno sottolineare che la Figura 8.1 rappresenta la configurazione di un sistema caratterizzato da relazioni del tipo "uno a molti" in cui cioè, scendendo verso i livelli più bassi dell'albero FMEA, si possono trovare per esempio molti effetti di guasto associati a un solo modo di guasto.

Allo scopo di avere una visione sistematica e completa, ogni "foglia" dell'albero dovrà essere analizzata e non esclusa a priori.

Si possono individuare 4 fasi successive.

- *Definizione del problema oggetto di studio*: prima di tutto dovrà essere individuato l'ambito all'interno del quale lo studio viene effettuato. Successivamente sarà fondamentale definire, nel modo più rigoroso possibile, i confini del problema in modo da poter determinare anche le eventuali interfacce presenti che devono essere considerate, per giungere a conclusioni corrette e realmente utilizzabili.
- *Istituzione di un gruppo di lavoro eterogeneo*: il gruppo deve essere composto da personale di manutenzione e di produzione e deve comprendere alcune figure

come il facilitatore del metodo, il personale di programmazione e schedulazione delle risorse e, se possibile, il progettista.

- *Esecuzione dell'analisi*: sarà il facilitatore del metodo a sviluppare l'analisi, la quale sarà caratterizzata in parte da una vera e propria analisi dei dati, se disponibili, in parte da una attività di brain-storming, in modo da poter recuperare anche le esperienze individuali del gruppo.
- *Documentazione dei risultati*: la preparazione di una documentazione contenente i risultati dell'analisi eseguita rappresenta sia una attestazione del lavoro che è stato effettivamente svolto, sia una base su cui poter misurare i miglioramenti conseguibili con l'applicazione delle risultanze dell'analisi svolta.

Allo scopo di strutturare le varie fasi di analisi sono state sviluppate tabelle di tipo standard contenenti varie voci, da compilare in modo più esaustivo possibile; sarà buona norma di volta in volta procedere alla contestualizzazione delle tabelle e quindi del modello di indagine, a partire però da un modello di riferimento generale.

Al termine di una analisi FMEA la documentazione finale sarà composta da schede di analisi dei singoli oggetti costituenti il sistema, ed è buona norma che queste siano precedute da una descrizione generale del sistema analizzato.

L'analisi FMECA può essere vista come una evoluzione della FMEA, infatti per valutare l'affidabilità di un sistema occorre esprimere una misura della probabilità di accadimento di un evento critico e questo obbliga a porre in cascata alla FMEA una procedura di tipo pseudo-quantitativo di Criticality Analysis (CA) arrivando così alla definizione della FMECA.

L'acronimo FMECA sta a indicare analisi dei modi di guasto, degli effetti e delle criticità. La FMECA consente dunque di individuare in modo puntuale le parti del sistema che sono più deboli dal punto di vista affidabilistico e di comprendere la natura e l'entità degli effetti associati al malfunzionamento di tali parti, anche a livello di processo all'interno del quale il sistema è inserito.

A partire dagli USA la metodologia si è poi diffusa in tutto il mondo, assumendo nomi e peculiarità differenti: in Francia AMDEC (*Analyse de Mode, de Défaillance, de leur Effects e de leur Criticité*) o in Italia MAGEC (*Modi e Analisi dei Guasti e delle loro Criticità*).

Una FMECA consente inoltre di stabilire una priorità o meglio una gerarchia negli interventi di manutenzione, essendo finalizzata a un incremento della disponibilità del bene.

Si possono classificare due tipologie di FMECA.

- *FMECA di progetto*: è utilizzata per analizzare le debolezze intrinseche al progetto.
- *FMECA di processo*: è utilizzata per analizzare l'attività produttiva ed è rivolta a una diminuzione dei fattori negativi presenti nel processo i quali possono comportare anche una riduzione della affidabilità del prodotto.

Una ulteriore classificazione che può essere fatta per le diverse tipologie di FMECA è quella della Figura 8.2.

La metodologia presenta comunque anche alcuni limiti nella realtà difficilmente superabili, come per esempio la impossibilità di poter esaminare gli errori umani commessi in campo dagli operatori, perché essa considera soltanto gli effetti sul sistema dovuti a errori umani.

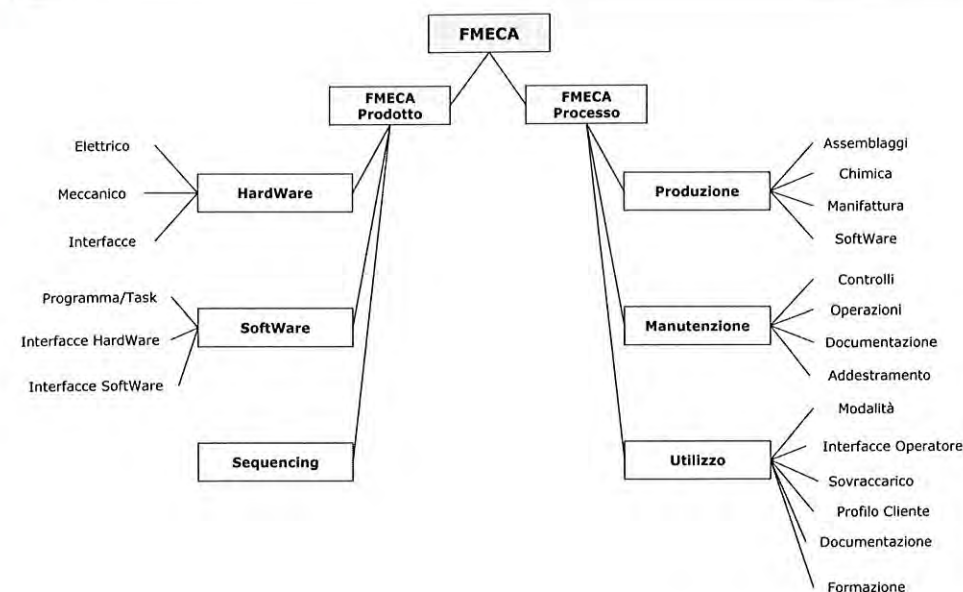


Figura 8.2 Classificazione delle tipologie di FMECA.

Altro aspetto debole della metodologia è legato al fatto di considerare un solo guasto per volta e questo può rendere talvolta difficile l'identificazione di una lista esaustiva di combinazioni di guasti funzionali che producono incidenti.

In particolare la FMECA associabile a un processo manutentivo può essere articolata nei seguenti punti (è evidente l'evoluzione dalla FMEA):

- scomporre l'impianto o la macchina nei suoi sottoassiemi o, in caso di sottoassiemi complessi, nei principali componenti;
- compilare una lista dei modi di guasto;
- analizzare per ogni modo di guasto, la possibile causa di guasto e il sintomo del guasto;
- stimare gli effetti di ciascun modo di guasto sul funzionamento;
- stimare la criticità associabile a ciascun effetto;
- definire la più appropriata manutenzione da applicare e le attività/procedure manutentive da eseguire.

La FMECA permette quindi di definire una serie di operazioni e istruzioni di manutenzione, primariamente basate su prevenzione e riduzione dei guasti sugli impianti/macchine/componenti e di raggruppare operazioni e attività, in piani di manutenzione suddivisi per politica.

Un'osservazione da sottolineare è che la FMECA è un processo di analisi dinamico e iterativo, il quale deve essere sottoposto anche a una attività di aggiornamento continuo e di verifica dell'adeguatezza delle soluzioni ipotizzate in fase di studio.



La filosofia su cui si basa la metodologia è connaturata alla sua visione globale del sistema e consiste nel prevenire ogni possibile evento negativo a esso associabile per cause intrinseche o provenienti dal contesto; proprio per questo motivo sarebbe opportuno per esempio eseguire una FMEA (con o senza una analisi delle criticità) prima dell'inserimento di una certa apparecchiatura (e quindi dei suoi modi di guasto) all'interno di una linea produttiva o di un processo.

## 8.1 MAGEC

Il MAGEC deriva dalla FMECA ed è un metodo che consente di classificare ed elaborare le informazioni sui componenti critici e di pianificare gli interventi a essi associati; esso si fonda in gran parte sul recupero delle esperienze individuali dei partecipanti al gruppo di lavoro in merito all'argomento oggetto dello studio. Per questo motivo esso si è dimostrato, e continua a dimostrarsi, particolarmente utile laddove non vi sia altra possibilità di strutturare e razionalizzare il comportamento di un sistema complesso, se non quella di raccogliere la "memoria storica".

Questa analisi si compone di 4 macroattività principali [3]:

1. selezione delle macchine critiche;
2. scomposizione delle macchine critiche;
3. individuazione delle modalità di guasto e analisi delle criticità;
4. analisi delle cause del guasto e individuazione dei componenti critici.

Il MAGEC è uno studio elaborato da team multidisciplinari che presentano una elevata conoscenza del sistema e delle sue anomalie.

Tipicamente si possono distinguere temporalmente due principali momenti nella realizzazione di un MAGEC. Vi è una prima fase in cui i gruppi vengono creati coinvolgendo operatori e manutentori in possesso di una specifica cognizione dell'argomento, tecnologi del processo e responsabili del controllo di qualità. Segue una fase successiva nella quale il gruppo interfunzionale estende la propria conoscenza maturata sul sistema e sulle sue criticità a tutti gli operatori di produzione che sono interessati.

L'approccio operativo su cui il MAGEC si fonda parte dalla constatazione che una macchina o un sistema comunque complesso, durante il suo esercizio, è soggetto a guasti che avvengono su un numero molto ridotto di componenti (studi ormai ampiamente validati hanno dimostrato che la percentuale di componenti davvero critici si aggira attorno al 5%); il MAGEC è un metodo che guida alla loro individuazione con un approccio razionale e selettivo nella definizione delle politiche manutentive più opportune.

L'impostazione e formalizzazione di un modello MAGEC sono in generale comunque più rapide e meno onerose rispetto a una FMECA, la quale richiede un dettaglio e una profondità di analisi non sempre necessari per scopi manutentivi.

Il MAGEC permette in sostanza di individuare le aree a maggiore margine di miglioramento potenziale sia tecnico sia economico, associando a ciascuna criticità riscontrata anche le modalità di eliminazione o comunque di riduzione del problema a configurazioni accettabili.

## 8.2 Glossario della FMEA

L'analisi si sviluppa attraverso il supporto di alcune tabelle standard da compilare (alcune delle quali sono riportate anche nei prossimi paragrafi), contenuti campi il cui significato richiede di essere precisato; infatti è importante che la terminologia sia condivisa e consolidata fra tutti i partecipanti a una analisi FMEA/FMECA.

Risulta dunque opportuno dare univocità alla definizione di tali termini, in modo da poter esprimere correttamente i concetti durante la fase di analisi.

Sarà compito del facilitatore del gruppo di lavoro costituito, in qualità di esperto di questa metodologia, fare in modo che tutti i componenti di tale gruppo condividano i concetti e ne comprendano il significato per rendere l'analisi più efficace e puntuale nelle indicazioni; una mancanza di comprensione di alcuni aspetti può riflettersi in una errata esecuzione dello studio e condurre a soluzioni fuorvianti.

Le definizioni [1] presentate di seguito (Tabella 8.1) sono state tratte dalla normativa MIL-STD-1629(A).

**Tabella 8.1** Terminologia utilizzata nelle analisi FMEA/FMECA (Fonte: MIL-STD-1692(A))

Termine	Significato
Azione correttiva	Modifica documentata del progetto, del processo, di una procedura, dei materiali utilizzati, implementata e validata allo scopo di correggere la causa di guasto o un difetto progettuale.
Causa di guasto	Insieme dei processi chimici, fisici, dei difetti di progetto, dei difetti di qualità, delle manomissioni o altri processi che costituiscono il motivo di base per l'accadimento di un guasto o che iniziano il processo di evoluzione dal degrado al guasto.
Codice identificativo	Codice che consente di individuare in modo non ambiguo sia nella fase di elaborazione dell'analisi sia nella fase di documentazione dei risultati. La norma di riferimento per la codifica dell'HBS (Hardware Breakdown Structure), è la MIL-STD-780.
Criticità	Misura relativa delle conseguenze di un modo di guasto e della sua frequenza di accadimento.
Definizione del guasto	Caratterizzazione del guasto attraverso una definizione delle prestazioni e degli output attesi. Il guasto può essere definito come ciò che non consente il raggiungimento di tali prestazioni.
Diagrammi a blocchi funzionali	Diagramma a blocchi che mostra le operazioni e interrelazioni presenti fra entità funzionali di un sistema così come sono definite nei dati e negli schematici. Tale diagramma fornisce un flusso della sequenza funzionale del sistema e di ogni livello di scomposizione del sistema.
Effetto di guasto	Conseguenze che un modo di guasto ha sulle operazioni, funzione o stato di un apparecchio. Gli effetti di un guasto sono classificati per vari livelli come locale, superiore e finale.
Effetto finale	Conseguenze che un modo di guasto ha sulle operazioni, funzioni o stato corrispondente al livello di scomposizione più alto (il sistema).
Effetto locale	Conseguenze che un modo di guasto ha sulle operazioni, funzioni o stato di uno specifico oggetto analizzato, corrispondente al livello di dettaglio più preciso.

(segue)

(continua)

Effetto superiore	Conseguenze che un modo di guasto ha sulle operazioni, stato o funzioni corrispondenti al livello di scomposizione superiore a quello dell'effetto locale.
Guasto non rilevabile	Modo di guasto per il quale non esiste un mezzo o uno strumento di rilevazione attraverso il quale un operatore può accorgersi di tale guasto.
Livello di scomposizione iniziale	Livello del sistema nella sua completezza e totalità.
Meccanismo di rilevazione	Mezzi o metodi con cui un guasto può essere scoperto da un operatore in normali condizioni di funzionamento operativo del sistema, o può essere rilevato dal personale di manutenzione attraverso alcune attività diagnostiche.
Modo di guasto	Modalità con cui un guasto si manifesta e viene osservato. In genere descrive il modo in cui il guasto avviene e il suo impatto sulle operazioni della apparecchiatura.
Punto di guasto singolare	Guasto a una apparecchiatura che potrebbe risultare nel guasto di un sistema e che non è compensato da ridondanze o altre procedure operative alternative.
Severità	Conseguenze di un modo di guasto; la severità considera le peggiori conseguenze potenziali di un guasto ed è determinata dal livello di infortuni al personale, dal danno a un asset o a un processo.

In particolare la costruzione dei diagrammi a blocchi funzionali (*Functional Block Diagram - FBD*) (Figura 8.3) rappresenta una fase fondamentale dalla cui correttezza

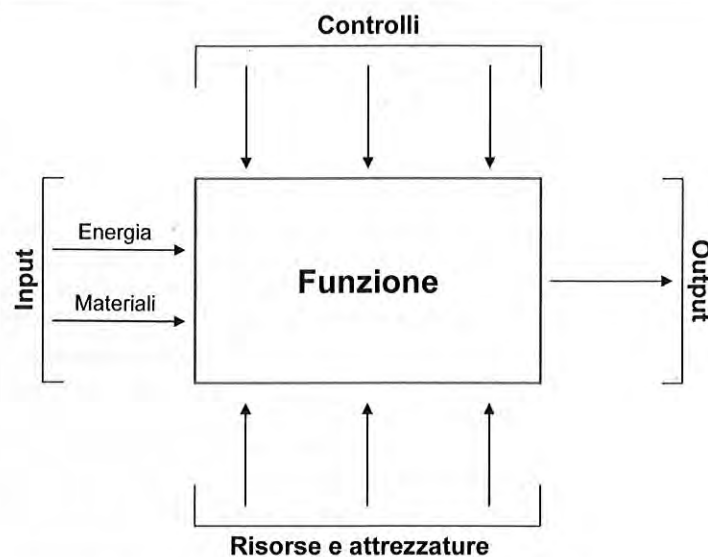


Figura 8.3 Un esempio di FBD elementare.

za può dipendere tutto lo studio; infatti una rappresentazione delle caratteristiche funzionali di un sistema, soprattutto nei casi in cui esso sia caratterizzato da una elevata complessità, è utile per fare chiarezza; inoltre la documentazione associata a questa fase dello studio potrà essere impiegata come schema di riferimento anche in applicazioni differenti.

### 8.3 Diagramma di flusso della FMEA

L'analisi FMEA, può essere rappresentata con un diagramma di flusso, costituito da una sequenza ordinata di fasi successive (Figura 8.4).

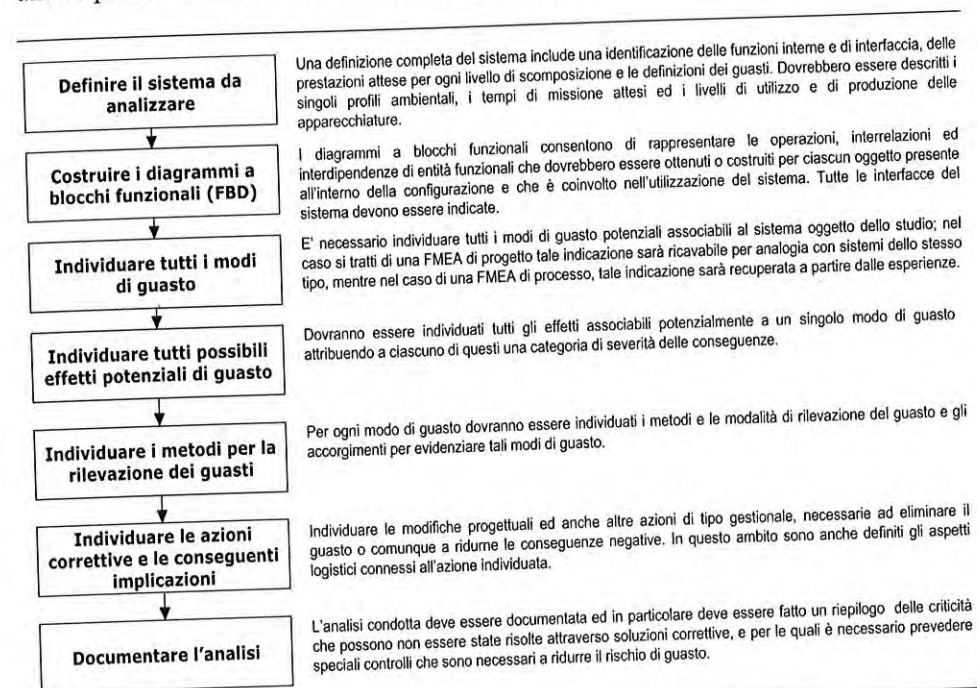


Figura 8.4 Diagramma di flusso della FMEA.

Un punto molto delicato è quello legato all'assegnazione della categoria di severità alle conseguenze che sono state considerate.

La classificazione della severità è assegnata per fornire una "misura qualitativa" della peggiore conseguenza potenzialmente associabile a un guasto (o anche a un errore di progetto). Una classificazione della severità è riportata nella Tabella 8.2).

Tale classificazione ha chiaramente lo scopo di stabilire una priorità nella definizione delle azioni correttive individuate nel corso dell'analisi. Altro fattore che deve essere considerato nella stesura di tale ordine è legato alla modalità di propagazione del guasto, in altri termini dovranno essere eliminati per primi quei guasti (o ridotti gli effetti) aventi come effetto finale quello del danneggiamento fisico del sistema complessivo e delle sue prestazioni.

**Tabella 8.2** Classificazione delle severità MIL-STD-1629(A)

Categoria	Significato
Catastrofico	Un guasto che può causare morte o distruzione del sistema.
Critico	Un guasto che può causare ferite gravi, danneggiamento molto esteso del sistema, che comporterà una mancata missione da parte del sistema.
Marginale	Un guasto che può causare ferite non gravi, danneggiamento parziale del sistema, che comporterà una perdita di disponibilità del sistema o un degrado della missione.
Minore	Un guasto non abbastanza grave da causare ferite, danneggiamenti del sistema, e che però comporterà un intervento di manutenzione accidentale.

#### 8.4 Analisi delle criticità - Criticality Analysis

L'obiettivo della *analisi delle criticità* (CA), la quale può essere associata alla FMEA in modo da attribuire una connotazione più quantitativa all'analisi, è quello di valutare ogni modo di guasto potenziale identificato nella FMEA considerando un indice che deriva da una combinazione di severità e probabilità di accadimento, ottenuta a partire da dati disponibili.

Nella sezione 102 della normativa MIL-STD-1629(A), in cui viene descritta l'analisi di criticità, si forniscono alcuni criteri per la caratterizzazione della frequenza di guasto, il primo legato a un approccio qualitativo (Tabella 8.3) e il secondo legato a un approccio più quantitativo (Tabella 8.4).

**Tabella 8.3** Classificazione della frequenza di guasto

Livello	Significato
Livello - A: Frequente	Si ha una elevata probabilità di accadimento del modo di guasto durante il periodo operativo dell'apparecchio. In tali casi si ha almeno il 20 % di probabilità che il modo di guasto si verifichi una volta durante il periodo operativo dell'apparecchio.
Livello - B: Ragionevolmente probabile	Si ha una moderata probabilità di accadimento durante il periodo operativo dell'apparecchio. In tali casi si ha una probabilità compresa fra il 10 e il 20% che il modo di guasto si verifichi una volta durante il periodo operativo dell'apparecchio.
Livello - C: Occasionale	Si ha una probabilità compresa fra l'1 e il 10% che il modo di guasto si verifichi una volta durante il periodo operativo dell'apparecchio.
Livello - D: Remota	Si ha una probabilità compresa fra lo 0,1 e l'1% che il guasto si verifichi una volta durante il periodo operativo dell'apparecchio.
Livello - E: Estremamente improbabile	Si ha una probabilità inferiore allo 0,1% che il guasto si verifichi una volta durante il periodo operativo dell'apparecchio.

Per quanto riguarda i dati quantitativi di accadimento dei guasti, si dovranno utilizzare dati da campo o in alternativa librerie di valori opportunamente adattati al particolare contesto, attraverso l'adozione e la determinazione di fattori correttivi, che tengano conto delle particolari condizioni operative all'interno delle quali è collocato il sistema.

*Fattori correttivi* che vengono considerati sono:

- $\beta$ : indica la probabilità condizionata che l'effetto di guasto risulterà nella classificazione della criticità identificata, dato l'accadimento del modo di guasto; in altre parole questo fattore rappresenta il giudizio dell'analista;
- $\alpha$ : indica la frazione del tasso di guasto ( $\lambda_p$ ) di un componente del sistema, corrispondente al livello di scomposizione più dettagliato, relativo a uno specifico modo di guasto che dovrà essere valutato dall'analista e registrato. Se tutti i modi di guasto potenziali di un componente sono considerati, allora la somma delle frazioni  $\alpha$  associate a ciascuno di essi sarà uguale al 100% del tasso di guasto. Nel caso non siano disponibili valori determinati a partire da dati storici, tali fattori saranno esprimibili dal giudizio dell'analista;
- $t$ : indica il tempo operativo espresso in ore o in numero di cicli operativi di un'apparecchiatura per singola missione, dovrà essere derivato dalla definizione del sistema e riportato sui tabulati.

A partire da una definizione dei fattori sopra riportati, si possono determinare due ulteriori parametri che sono i seguenti.

- *Numero di criticità per modo di guasto  $C_m$* : indica la frazione del numero di criticità di un apparecchio o di un componente dovuto a uno dei suoi modi di guasto, tenendo conto di una particolare classificazione della criticità

$$C_m = \beta\alpha\lambda_p t$$

- *Numero di criticità della parte o della apparecchiatura  $C_r$* : indica il numero di guasti del sistema di uno specifico tipo dovuti ai modi di guasto dell'unità considerata. Lo specifico tipo di guasto del sistema è espresso da una classificazione della severità per i modi di guasto di una unità. Per una singola missione e per una particolare classificazione della severità, il  $C_r$  di una unità è la somma dei valori  $C_m$  per una certa classificazione di severità e può essere calcolato nel seguente modo:

$$C_r = \sum_{n=1}^j (\beta\alpha\lambda_p t)$$

Essendo  $n$  il numero di modi di guasto di una apparecchiatura che sono compresi all'interno di una particolare classificazione di criticità.

La *matrice di criticità* (Figura 8.5) fornisce infine un quadro d'insieme dei modi di guasto che sono stati analizzati e permette di avere una mappatura dei valori  $C_m$  e  $C_r$ , facilitando anche la definizione della priorità di un intervento. Nella normativa MIL-STD-1629(A), la matrice delle criticità è stata costruita tenendo conto sia della classificazione di severità (Tabella 8.2 - categorie severità) sia della probabilità di accadimento dei modi di guasto (Tabella 8.3 - livelli A-E di probabilità).

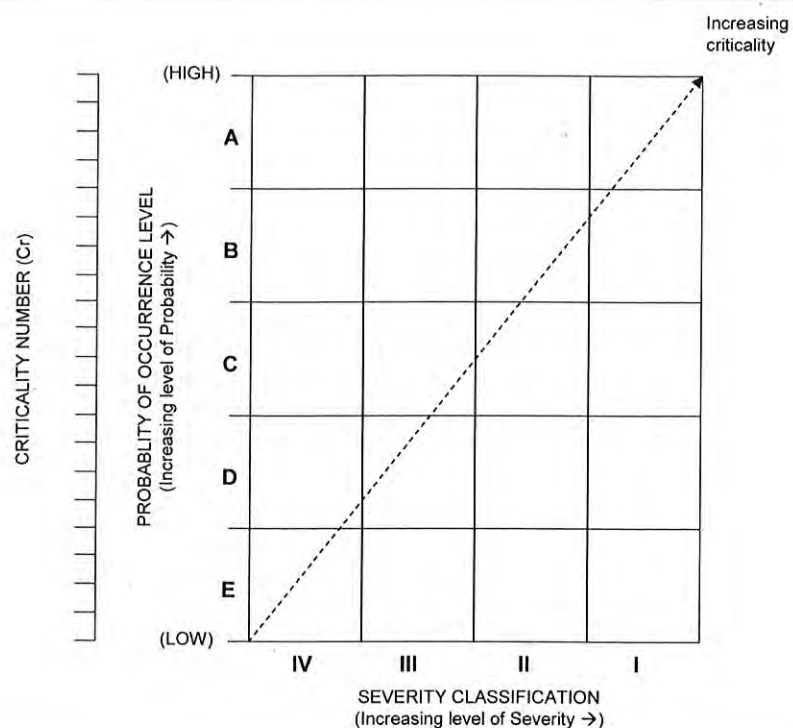


Figura 8.5 La matrice delle criticità (Fonte: MIL-STD-1629(A)).

## 8.5 Risk Priority Number - RPN

La definizione del *Risk Priority Number (RPN)* permette di stabilire una priorità nell'analisi delle criticità riscontrate e quindi delle azioni previste per una loro eliminazione o comunque riduzione.

Il *RPN* indica il livello di importanza di una criticità riscontrata all'interno del sistema, a partire da una valutazione di alcuni parametri caratteristici che descrivono tale criticità.

Questo numero è quindi esprimibile come prodotto di tre fattori, dei quali due sono già stati definiti in precedenza (severità e frequenza del guasto), il terzo è rappresentato dalla *rilevabilità del guasto (detectability)*:

- *occorrenza (Occurrence - O)*: indica una stima della frequenza con cui una specifica causa di guasto si manifesterà durante la vita del sistema; è una misura relativa e non una frequenza assoluta;
- *severità (Severity - S)*: indica una stima della gravità della peggiore conseguenza potenziale;
- *rilevabilità (Detectability - D)*: indica una stima della facilità con cui un guasto può essere riscontrato in modo diretto:

$$\text{Risk Priority Number} = O \times S \times D$$

Tale indice deve essere determinato per ognuno dei componenti in cui il sistema è stato composto e per il quale sono stati elencati modi ed effetti di guasto.

Tanto maggiore sarà il *RPN* tanto maggiore sarà anche la criticità a cui esso è riferito e quindi a esso sarà associata una maggiore priorità di intervento.

Comunemente questo numero varia fra 1 e 1000, in quanto a ciascuno dei tre fattori è stata associata una scala di valori da 1 a 10, questa valorizzazione come si è visto, non è presente nella normativa MIL-STD-1629(A), e invece lo è nella normativa SAE J1739 (Tabelle 8.4, 8.5, 8.6). Dal momento che la SAE J1739 [2] è riferita e nasce nel settore automobilistico, tali classificazioni (in inglese) sono riferibili ad una FMECA dedicata al progetto di autoveicoli.

Va comunque precisato che tali valori sono indicativi e servono come orientamento; la definizione delle singole classificazioni per i tre fattori può essere fatta e contestualizzata all'interno di ogni ambito industriale, ciò che è assolutamente fondamentale è la sua condivisione fra i partecipanti al gruppo di lavoro, prima dell'inizio dello studio.

La riduzione delle criticità associate ad un componente, può essere effettuata agendo sul singolo fattore (ad esempio con l'inserimento nel sistema, di componenti aventi un MTBF maggiore e quindi minore *O*) o intervenendo contemporaneamente

Tabella 8.4 Classificazione della severità *S* degli effetti (Fonte: SAE J1739)

Effect	Severity of Effect	Ranking
Hazardous without warning	Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operator and/or involves non-compliance with government regulation without warning.	10
Hazardous with warning	Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operator and/or involves non-compliance with government regulation with warning.	9
Very High	Vehicle/item inoperable (loss of primary function).	8
High	Vehicle/Item operable but at a reduced level of performance. Customer very dissatisfied.	7
Moderate	Vehicle/Item operable but Comfort/Convenience item(s) inoperable. Customer dissatisfied.	6
Low	Vehicle/Item operable but Comfort/Convenience item(s) operable at a reduced level of performance. Customer somewhat dissatisfied.	5
Very Low	Fit & finish/Squeak & rattle item does not conform. Defect noticed by most customers (greater than 75%).	4
Minor	Fit & finish/Squeak & rattle item does not conform. Defect noticed by 50 percent of customers.	3
Very Minor	Fit & finish/Squeak & rattle item does not conform. Defect noticed by discriminating customers (less than 25 percent).	2
None	No discernible effect.	1

**Tabella 8.5** Classificazione della occorrenza - *O* (Fonte: SAE J1739)

Probability of Failure	Likely Failure Rates Over Design Life	Ranking
Very High: Persistent failures	≥ 100 per thousand vehicles/items	10
High: Frequent failures	50 per thousand vehicles/items	9
Moderate: Occasional failures	20 per thousand vehicles/items	8
	10 per thousand vehicles/items	7
	5 per thousand vehicles/items	6
	2 per thousand vehicles/items	5
	1 per thousand vehicles/items	4
Low: Relatively few failures	0.5 per thousand vehicles/items	3
	0.1 per thousand vehicles/items	2
Remote: Failure is unlikely	≤ 0.01 per thousand vehicles/items	1

**Tabella 8.6** Classificazione della rilevabilità - *D* (Fonte: SAE J1739)

Detection	Criteria: Likelihood of Detection by Design Control	Ranking
Absolute Uncertainty	Design Control will not and/or can not detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode; or there is no Design Control	10
Very Remote	Very remote chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	9
Remote	Remote chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	8
Very Low	Very Low chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	7
Low	Low chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	6
Moderate	Moderate chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	5
Moderately High	Moderately high chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	4
High	High chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	3
Very High	Very High chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	2
Almost Certain	Design Control will almost certainly detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode	1

su più fattori (per esempio scegliendo un componente più affidabile e quindi minore valore di *O* e utilizzando dispositivi per la gestione a vista che evidenzino una deriva del sistema e quindi minore valore di *D*).

### 8.6 Esempi di modulistica utilizzata nell'analisi FMEA/FMECA

La modulistica utilizzata e sviluppata come supporto dell'analisi FMECA, rispetta le varie personalizzazioni a cui questa tecnica è stata sottoposta.

SYSTEM REFERENCE LEVEL REFERENCE DRAWING MISSION	DATE SHEET COMPLETED BY APPROVED BY		REMARKS
	ITEM CRT C1		
	FAILURE MODE CRT C1		
	OPERATING TIME (t)		
	FAILURE DATE (a)		
	FAILURE MODE RATIO (a)		
	FAILURE EFFECT PROBABILITY (P)		
	FAILURE PROBABILITY FAILURE RATE DATA SOURCE		
	SEVERITY CLASS		
	MISSION PHASE/OPERATIONAL MODE		
	FAILURE MODES AND CAUSES		
	FUNCTION		
	ITEM/FUNCTIONAL IDENTIFICATION (NOMENCLATURE)		
IDENTIFICATION NUMBER			

**Figura 8.6** Modulo per analisi FMEA (Fonte: MIL-STD-1629(A)).

CRITICALITY ANALYSIS

DATE SHEET CONTROLLED BY APPROVED BY	ITEM/FUNCTIONAL IDENTIFICATION (NOMENCLATURE)	REMARKS
	IDENTIFICATION NUMBER	ITEM CRIT C <sub>T</sub>
	FUNCTION	FAILURE MODE CRIT C <sub>FI</sub>
	FAILURE MODES AND CAUSES	OPERATING TIME (T)
	MISSION PHASE/OPERATIONAL MODE	FAILURE RATE (λ)
	SEVERITY CLASS	FAILURE MODE RATIO (R)
	FAILURE PROBABILITY DATA SOURCE	FAILURE EFFECT PROBABILITY (P)
	FAILURE PROBABILITY DATA SOURCE	FAILURE EFFECT PROBABILITY (P)
	FAILURE PROBABILITY DATA SOURCE	FAILURE EFFECT PROBABILITY (P)
	FAILURE PROBABILITY DATA SOURCE	FAILURE EFFECT PROBABILITY (P)

Figura 8.7 Modulo per analisi CA (Fonte: MIL-STD-1629(A)).

A partire dunque dalle tabelle previste nella normativa MIL-STD-1629(A) (Figure 8.6 e 8.7) ne sono state derivate altre; l'aspetto formale è sicuramente secondario rispetto a quello sostanziale, legato alla tipologia delle informazioni che devono comunque essere sempre previste in un qualunque modulo impiegato durante un'analisi FMEA/FMECA.

In generale dunque all'interno delle schede FMECA dovrà essere contenuta una sezione relativa alla classificazione delle criticità del sistema, opportunamente codificate, e una sezione che tenga conto delle azioni correttive previste per la riduzione

System _____		Potential Failure Mode and Effects Analysis (Design FMEA)				FMEA Number _____	
Subsystem _____		Key Date _____				Prepared By _____	
Component _____						FMEA Date _____	
Design Lead _____						Revision Date _____	
Core Team _____						Page _____ of _____	

Item / Function	Potential Failure Mode(s)	Potential Effect(s) of Failure	S e v e r i t y	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	D e t e c t	Current Design Controls	D e t e c t	R e p a r	Recommended Action(s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results			
											Actions Taken	New Sev	New Occ	New Det

Figura 8.8 Modulo FMEA (Fonte: SAE J1739).

dell'indice di criticità determinato. Un aspetto da non sottovalutare è quello della attribuzione di una responsabilità a tali attività correttive.

Di seguito viene anche riportata a titolo di esempio una tabella (Figura 8.8) prevista dalla normativa SAE J1739.

Pur essendo presenti alcune differenze con i moduli previsti dalla MIL-STD-1629 (A) esistono comunque molte analogie in termini di contenuti; per ogni realtà si può anche definire e costruire un modulo specifico. Si ribadisce ancora una volta che quello che realmente conta sono la condivisione dei significati delle varie informazioni che saranno raccolte e la definizione di scale di riferimento univoche e chiare che servano a caratterizzare le criticità di un sistema.

### 8.7 Applicazione della metodologia FMECA

Un aspetto importante è dato dalla stima dei tempi necessari a condurre un progetto FMECA.

DATE: 3/26/2003  
Page 2 of 2  
COMPILED BY RS  
APPROVED BY RS

SYSTEM: 1- Widget  
INDENTURE LEVEL: 1 - Widget (Level 1)  
REFERENCE DRAWING: RS 12345  
MISSION: Description of mission

IDENTIFICATION NUMBER	ITEM FUNCTIONAL IDENTIFICATION (NOMENCLATURE)	FUNCTION	FAILURE MODES AND CAUSES	MISSION PHASE/OPERATIONAL MODE	FAILURE EFFECTS			FAILURE DETECTION METHOD	COMPENSATING PROVISIONS	SEVERITY CLASS	REMARKS							
					LOCAL EFFECTS	NEXT HIGHER LEVEL	END EFFECTS											
1	Widget	Perform an unnamed mechanical function	Defective part	All phases			Widget fails to perform intended mechanical function	Description of failure detection method	Description of compensating provisions	Category II - Critical								
			Quality assurance controls for manufacturing do not function adequately									All phases		Widget performs function at 50-70%	Description of failure detection method	Description of compensating provisions	Category II - Marginal	
			Improper installation															
Quality assurance controls for assembly do not function adequately	Improper lubrication	Maintenance personnel do not provide sufficient lubrication	Quality assurance controls for manufacturing do not function adequately	A leak caused the accelerated depletion of lubricating system														

Figura 8.9 Esempio di report di base prodotto da un tool informatico dedicato (Fonte: ReliaSoft).

Il tempo richiesto è legato alle dimensioni e alla complessità del sistema oggetto dell'analisi (oltre che alla capacità del facilitatore del metodo); nella normativa DOE-HDBK-1100-96 è presente una stima di tali tempi: in linea di massima si possono considerare le durate riportate nella Tabella 8.7. La difficoltà sta nella interpretazione del termine "piccole e grandi dimensioni", in gran parte soggettiva.

Tabella 8.7 Stima dei tempi per un'analisi FMECA (Fonte: DOE-HDBK-1100-96)

Tipo sistema	Preparazione	Analisi	Documentazioni
Semplice/piccole dimensioni	Da 2 a 6 ore	Da 1 a 3 giorni	Da 1 a 3 giorni
Complesso/grandi dimensioni	Da 1 a 3 giorni	Da 1 a 3 settimane	Da 2 a 4 settimane

L'adozione di strumenti informatici a supporto, può anche ridurre sensibilmente i tempi necessari per un'analisi FMECA; questi applicativi però possono soltanto agire in termini di gestione delle informazioni raccolte, rendendo per esempio più rapida e automatica la stesura dei report e della documentazione elaborata. Seppur un loro utilizzo consenta anche di rendere l'analisi più standardizzata (grazie per esempio alla possibilità di impiegare menù a tendina per le varie scale di criticità), un'analisi FMECA resta comunque uno strumento basato in gran parte sulla conduzione di un brain-storming (soprattutto in quei casi in cui vi sia una carenza di dati storici registrati e sia prevalente il ricorso all'esperienza e alla memoria individuale), fase dalla quale scaturisce la maggiore quantità delle informazioni; per questo motivo sarà fondamentale la capacità di chi dovrà coordinare il lavoro di gruppo, ovvero il facilitatore del metodo. Un esempio di report di base prodotto da uno strumento informatico è riportato in Figura 8.9.

Riferimenti bibliografici

- [1] MIL-STD-1629(A) *Military standard procedures for performing a failure modes, effects and criticality analysis*, USA Department of Defense, 1989.
- [2] *Draft proposal from the SAE J1739 Main Working Committee*, SAE Publications, 2000.
- [3] L. Furlanetto, *Manuale di manutenzione degli impianti industriali e servizi*, Franco Angeli, Milano, 1998.

# 9

## Modellizzazione a blocchi di affidabilità

La modellizzazione della affidabilità costituisce un approccio applicabile in moltissimi ambiti tecnologici, ingegneristici nonché scientifici e può essere adattato a ciascuno di questi, con forme e modalità specifiche.

L'evoluzione verso metodi in grado di fornire risultati di tipo quantitativo, relativamente alle prestazioni RAM, porta a considerare, anche nell'ambito industriale, approcci analitici sempre più completi e integrati, che sono spesso alla base dello sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni.

In particolare la *modellizzazione per diagrammi a blocchi di affidabilità* (dal termine inglese *Reliability Block Diagram - RBD*) permette di valutare quantitativamente i requisiti affidabilistici richiesti a un sistema, a partire dalla conoscenza del comportamento dei suoi singoli elementi costituenti [1].

La metodologia consente di evidenziare elementi di debolezza presenti nel sistema che un approccio qualitativo non sarebbe in grado di mostrare in modo adeguato.

Come noto, un sistema presenta passaggi di stato che possono essere rappresentati come in Figura 9.1.

La modellizzazione delle prestazioni affidabilistiche deve consentire di esprimere tale evoluzione e sicuramente fra le modalità rappresentative più versatili vi è proprio l'uso dei diagrammi RBD.

Durante la fase preliminare all'avvio di un progetto di modellizzazione RAM, una grande rilevanza deve essere data alla verifica della omogeneità del livello descrittivo, infatti prima di scegliere il livello di dettaglio è necessario fare una valutazione e se necessario anche un preprocessamento dei dati disponibili, in modo da notare eventuali lacune informative le quali potrebbero portare alla realizzazione di un modello poco rappresentativo.

Un elemento che deve comunque essere evidenziato è quello della contestualizzazione e caratterizzazione dell'ambiente all'interno del quale il sistema modella-

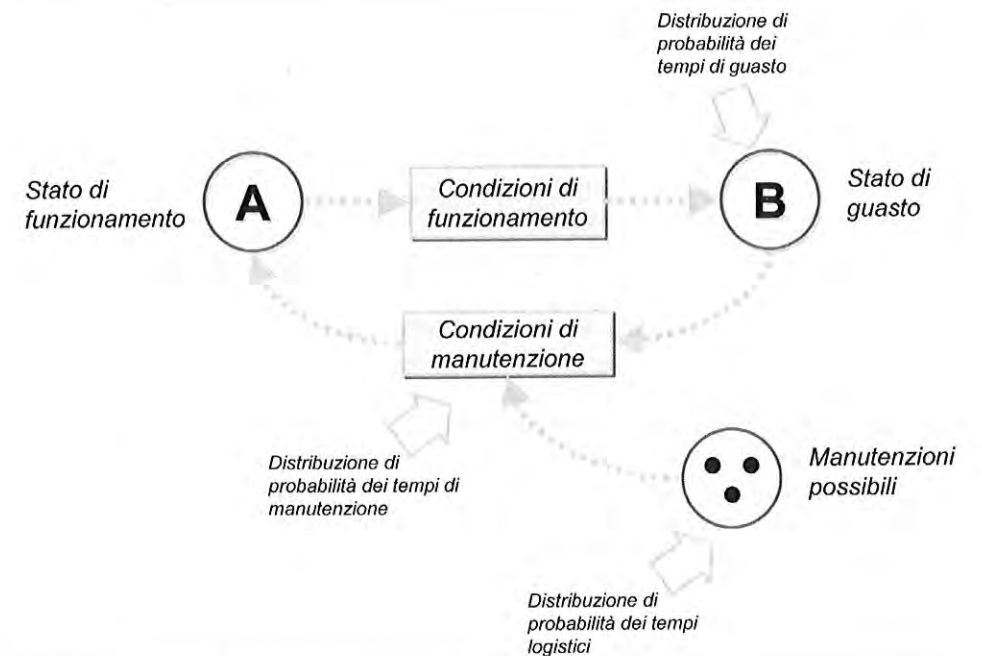


Figura 9.1 Possibili passaggi di stato presenti in un sistema.

to si trova a operare (concetto peraltro strettamente connesso alla definizione di affidabilità).

La creazione infatti di un modello RBD, limitato alla caratterizzazione intrinseca dei singoli blocchi costituenti un diagramma, può risultare insufficiente a rappresentare la realtà; questo aspetto è facilmente dimostrabile attraverso una validazione del modello costruito sulla base dei dati empirici.

Si può quindi parlare di due livelli di complessità, che devono essere comunque contemplati in un progetto di modellizzazione RBD:

- complessità intrinseca: legata soltanto alle caratteristiche intrinseche dei singoli blocchi di un diagramma e alla modalità secondo cui questi sono fra di loro legati;
- complessità ambientale: legata alla rappresentazione dell'ambiente all'interno del quale il sistema analizzato si trova.

Le due tipologie di complessità si distinguono quindi per una loro differente visione del sistema; infatti, mentre la complessità intrinseca considera le proprietà (distribuzioni dei tempi di guasto e di manutenzione e relazioni di configurazione) del singolo blocco costituente, la complessità ambientale, porta a considerare una visione di insieme del sistema, ovvero il sistema completo viene inserito all'interno di un ambiente e solo successivamente si valuta come l'ambiente incide sul comportamento dei singoli blocchi. L'ambiente è di fatto il contesto all'interno del quale il sistema si trova e può essere caratterizzato per esempio dalle condizioni di esercizio.



Delle due quella che risulta meno intuitiva e meno facilmente modellizzabile è proprio la complessità ambientale.

Molti degli applicativi in commercio, con i quali è possibile effettuare un modellizzazione RBD, tendono a ricondurre l'una all'interno dell'altra, facendo in modo di convertire la complessità ambientale in complessità intrinseca, per esempio "distribuendo a priori ma in maniera pesata", l'impatto che una variazione della produzione ha sulla singola macchina all'interno di una certa linea di produzione.

Nella descrizione della complessità ambientale si andranno a considerare fra gli altri, i seguenti aspetti.

- *Strategia di contratto della fornitura*: questa può per esempio incidere sulla quantificazione delle penalità legate al mancato o degradato funzionamento di un sistema; a questo proposito si pensi a una piattaforma off-shore in fase di definizione del contratto: è necessario tenere conto del fatto che spesso un sistema viene sovra utilizzato, in modo da creare riserve e non comportare costi di mancanza legati a guasti.
- *Variabilità del livello di fornitura richiesto*: aspetti legati a fenomeni quali la stagionalità possono comportare cambiamenti anche molto significativi nei livelli di produzione, i quali si riflettono in cambiamenti dei carichi di lavoro associati alle varie risorse del sistema e potenzialmente delle loro prestazioni RAM. La stagionalità può, però, agire anche sul comportamento RAM dei singoli elementi di un sistema: si pensi al semplice esempio dei filtri dell'impianto di condizionamento di un carrozza ferroviaria i quali risentono per esempio della presenza del polline nell'aria. Il fattore ambientale deve essere considerato in modo da ottenere un modello realistico. Un altro esempio utile a capire quanto detto è relativo al raffreddamento dell'aria prodotto da un impianto di refrigerazione, che dovrà essere parametrizzato sul valore della temperatura esterna: il livello di ridondanza dei ventilatori è dunque legato a un fattore esterno che fa parte della complessità ambientale.
- *Riconfigurazioni del sistema*: i sistemi complessi durante il loro ciclo di vita sono spesso soggetti a progetti di modifica, riconversione o retrofitting, dovuti a nuove esigenze di produzione. Tali modifiche possono verificarsi all'interno di un contesto in cui sono già fissati i parametri di contratto, e possono costituire un fattore di disturbo che deve necessariamente essere associato a un aggiornamento del modello di sistema.
- *Effetto transitorio*: all'avvio di un sistema, si ha un periodo transitorio prima che le prestazioni raggiungano un livello di regime. Realizzare un modello nel quale non si tiene conto di questo aspetto può a volte risultare troppo semplificato.
- *Professionalità della manodopera e qualità dei lavori*: oltre a una modellizzazione degli aspetti logistici del sistema espressi in termini probabilistici, anche una modellizzazione del fattore esterno "qualità dei lavori" può dare un contributo molto significativo per la rappresentazione del comportamento di un sistema. Basti pensare ad alcuni interventi di manutenzione preventiva, ai quali sono associati guasti accidentali, riconducibili a una cattiva esecuzione degli interventi previsti. Quindi anche la variabile qualità dei lavori può essere vista come una variabile casuale a cui poter associare una certa distribuzione di probabilità.

Riepilogando ogni sistema sarà in generale caratterizzato da alcuni specifici fattori esterni, dai quali risulta la complessità ambientale.

Da quanto detto emerge l'importanza di stabilire, prima di iniziare un qualunque progetto di questa natura, quali siano i confini del sistema che dovrà essere modellizzato, anche allo scopo di definire le interfacce fra il sistema oggetto dell'analisi e l'ambiente esterno.

## 9.1 Metodologia Reliability Block Diagram

Un modello costruito con una logica di tipo *Reliability Block Diagram* è come prima accennato, una modalità di rappresentazione grafica di componenti e sottosistemi appartenenti a un sistema, la quale permette di evidenziare come queste entità siano fra di loro connesse da un punto di vista affidabilistico, mostrando in particolare le varie ridondanze presenti.

In alcuni casi la configurazione affidabilistica può risultare diversa da quella rappresentante la configurazione "fisica"; si pensi per esempio a un gruppo di resistori che sono connessi in parallelo da un punto di vista elettrico, ma al tempo stesso sono tali per cui se uno solo di essi risulta danneggiato, allora il circuito può non risultare funzionante in modo adeguato, il che implica una configurazione affidabilistica di tipo serie.

Ogni schema deve essere considerato nel dettaglio.

I diagrammi RBD, sono costituiti da blocchi affidabilistici. Esistono poi varie modalità di rappresentazione delle interconnessioni fra tali blocchi (qualche esempio sarà mostrato in seguito) ma in genere le connessioni fra blocchi sono costituite da linee orientate che indicano la direzione con cui la funzione si propaga all'interno del sistema.

Le analisi basate su modelli RBD, consentono di:

- quantificare l'affidabilità di un sistema o di una funzione;
- determinare il livello di tolleranza al guasto;
- individuare sconnessioni interne al sistema così come aree per le quali si ha una progettazione incompleta e inadeguata;
- condurre analisi di trade-off, in modo da trovare il miglior compromesso costi-affidabilità, all'interno di un progetto.

In generale il metodo risulta applicabile a qualunque sistema, di qualunque tipologia tecnologica esso sia, meccanico o impiantistico, e permette *in primis* di identificare le eventuali lacune presenti nelle ridondanze esistenti.

Allo scopo, dunque, di applicare in modo corretto questa metodologia effettuando una valutazione quantitativa, risulta necessaria una comprensione della architettura e della funzionalità del sistema.

È bene osservare che l'approccio RBD consiste nello sviluppo di diagrammi a blocchi in cui i singoli blocchi possono rappresentare sia l'oggetto fisico a cui sono associate determinate funzioni, sia proprio le funzioni (o sottofunzioni), ciascuna delle quali contribuisce alla o alle funzioni del sistema nella sua totalità ma può, infine, anche rappresentare i modi di guasto dei singoli blocchi. Per questo motivo l'approccio RBD risulta essere molto versatile.

Per ogni blocco, sia esso rappresentativo di un item fisico sia esso corrispondente

a una sottofunzione del sistema, si possono indicare le distribuzioni dei tempi di guasto, le distribuzioni dei tempi di manutenzione e quelle dei tempi logistici.

Riassumendo, nella costruzione di un modello RBD risultano fondamentali alcune informazioni e possono essere individuati alcuni punti essenziali:

- a) *Input del modello e assunzioni fatte.* Per realizzare un modello RBD, sono necessarie almeno tre tipologie di dati:
  - dati relativi alla architettura funzionale del sistema (livelli e relazioni di ridondanza presenti: serie, parallelo, ridondanza parziale). Queste informazioni possono essere ottenute a partire da uno studio degli schemi progettuali, layout di impianto, sinottici e degli altri diagrammi del sistema;
  - dati relativi alla affidabilità e manutenibilità degli elementi costituenti il sistema (distribuzioni dei tassi guasto e dei tempi di riparazione);
  - dati relativi alla durata della missione del sistema.
- b) *Calcoli eseguiti.* Lo scopo principale della metodologia sta proprio nel calcolo della affidabilità del sistema, e questo risulta ampiamente agevolato nel caso siano disponibili degli strumenti di supporto. La maggior parte degli strumenti comunemente in commercio consente di associare distribuzioni di guasto a piacere ai singoli elementi del modello, non limitandosi dunque alla sola distribuzione esponenziale. Si può affermare che nella maggior parte dei casi, non sono note le distribuzioni dei tassi di guasto, ma soltanto gli *MTBF* dei singoli oggetti. La possibilità di utilizzare distribuzioni probabilistiche, anziché valori costanti, consente di ottenere risultati verosimilmente più vicini alla reale ottimizzazione del sistema.
- c) *Interpretazione da dare agli output.* In generale tutti gli applicativi forniranno report costituiti da tabelle e grafici, dai quali risulta possibile comprendere quale sia il comportamento affidabilistico di tutto il sistema e quali siano, al suo interno, gli elementi deboli (*weak link*) che hanno una maggiore necessità di essere sottoposti a una analisi approfondita. Spesso su tali elementi si effettua una *analisi di sensitività*, con la quale è possibile apprezzare quali sono le ripercussioni sulle prestazioni del sistema, associate a piccole variazioni delle variabili caratteristiche di oggetti classificati come critici. Tali modifiche possono però anche riguardare l'architettura del sistema. L'analisi di sensitività, può allora essere concepita come una attività da condurre in una fase di ottimizzazione affidabilistica del sistema.

I risultati ottenuti dalla simulazione di un modello RBD sono prima di tutto fondamentali per la validazione del modello realizzato, fase quest'ultima da cui non è possibile prescindere e che costituisce la prova della applicabilità del modello teorico al contesto reale e che indica quanto i risultati prodotti dal modello siano effettivamente utilizzabili. Una volta che questa verifica è stata condotta, tali dati possono essere usati per verificare quantitativamente i requisiti affidabilistici associabili al sistema analizzato. Successivamente tali analisi, possono essere indirizzate a studi della disponibilità, alla definizione e individuazione delle politiche manutentive più opportune, allo sviluppo della logistica connessa al sistema.

## 9.2 Analisi di sistemi complessi attraverso la modellizzazione RBD

Nella risoluzione di sistemi caratterizzati da una elevata complessità, l'uso di applicativi software, in grado di effettuare una simulazione dei diagrammi costruiti, secondo le modalità che abbiamo visto in particolare con il metodo Monte Carlo, costituisce un elemento di estrema importanza, soprattutto nei casi in cui tali sistemi non risultino risolvibili per via analitica.

L'uso di questo approccio è spesso rivolto a sistemi caratterizzati da un elevato numero di componenti e a sistemi per i quali la funzione sicurezza risulta fondamentale. Ampio utilizzo di questa metodologia è stato fatto per esempio nell'ambito della progettazione [2] del sistema ACF (*Attitude Control Function*) di una stazione spaziale; con l'analisi RBD è stata condotta una verifica del progetto di base, con la quale sono stati evidenziati i nodi più deboli del sistema ACF e, successivamente, secondo una logica di tipo what-if, sono state effettuate valutazioni in merito a ipotesi di alternative progettuali allo scopo di ottenere la soluzione migliore.

Il sistema ACF di una stazione spaziale ha una importanza fondamentale perché una perdita della funzione di controllo in orbita può portare anche alla perdita della stazione stessa.

Negli ultimi progetti riguardanti i sistemi ACF, la modellizzazione RBD è stata utilizzata per fare una verifica quantitativa dei requisiti di affidabilità, confrontandoli con i valori obiettivo indicati nella SSP 41000 (System Specification for the International Space Station - ISS).

## 9.3 Progettazione orientata alla affidabilità e manutenibilità – DFR e DFM

L'uso della schematizzazione a blocchi di affidabilità di un sistema complesso può essere come detto molto importante anche durante la fase di progettazione.

Grazie a questa rappresentazione, è infatti possibile valutare configurazioni progettuali alternative del sistema, al fine di poter giungere a definire quella ottimale.

Secondo una impostazione che rientra nel concetto di *concurrent engineering*, si effettua una progettazione che tenga conto non soltanto degli aspetti strutturali e funzionali ma anche delle prestazioni RAM.

La possibilità di associare a ogni blocco del diagramma non solo le informazioni relative alle specifiche distribuzioni di guasto ma anche quelle relative alla manutenibilità dell'oggetto permette di individuare l'insieme delle specifiche costruttive, che rendono il sistema ottimale, corrispondente cioè alla soluzione di miglior compromesso.

Si può dunque affermare che grazie all'uso congiunto della modellizzazione RBD e della simulazione, si possono confrontare alternative progettuali e gestionali differenti, al fine di individuare la migliore sia da un punto di vista tecnico sia economico.

Nello sviluppo di un *Design for Reliability* (DFR) e *Design for Maintainability* (DFM), si possono individuare alcune fasi principali:

- si esegue un'analisi del sistema attraverso l'uso di disegni schematici, P&I;
- si evidenziano le entità che hanno un maggiore impatto (potenziale o storico) rispetto al funzionamento di tutto il sistema;
- si individuano le aree su cui focalizzare lo studio e per le quali proporre le alternative progettuali;
- si ipotizzano interventi migliorativi conseguibili attraverso:
  - una modifica della configurazione affidabilistica, mantenendo gli stessi oggetti e cambiandone soltanto la configurazione;
  - un inserimento di componenti più performanti rispetto alla affidabilità e manutenibilità (e quindi anche alla disponibilità), mantenendo la stessa configurazione;
  - una combinazione dei due interventi precedenti.

Sarebbe opportuno poi che ogni modifica ipotizzata fosse valorizzata economicamente su tutto il ciclo di vita del sistema, andando quindi a considerare non soltanto il costo di primo impianto ma anche i costi di esercizio; in questo modo sarà possibile evidenziare la soluzione ottimale.

L'uso della modellizzazione RBD, unito alla simulazione stocastica, consente dunque di determinare la correttezza e opportunità di un intervento, prima che questo sia realizzato fisicamente.

Si consideri a questo proposito l'esempio riportato in Figura 9.2. Nei prossimi paragrafi si farà riferimento a software dedicati impiegati in queste analisi.

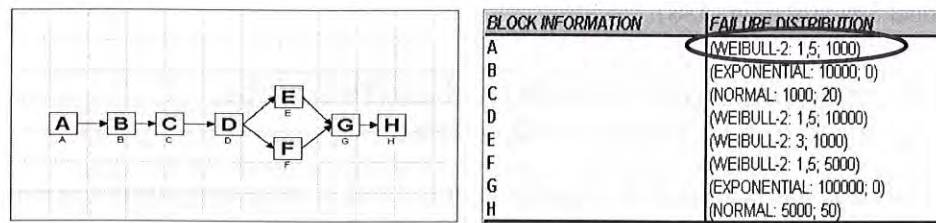


Figura 9.2 Diagramma RBD e distribuzioni dei tassi di guasto per ogni singolo blocco.

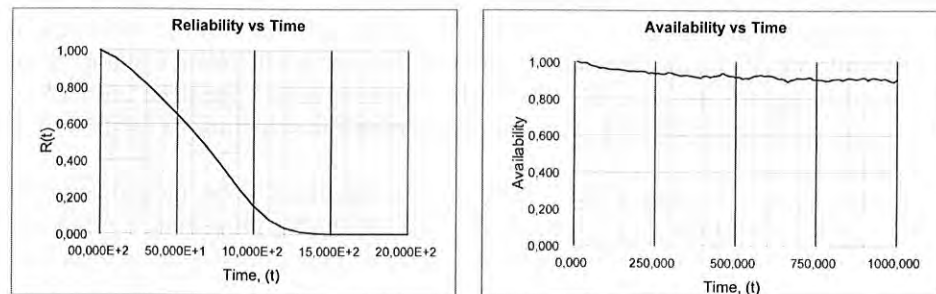


Figura 9.3 Grafici della affidabilità e disponibilità del sistema rappresentato in Figura 9.2.

Dalla simulazione con metodo Monte Carlo del modello RBD è emerso che il blocco A risulta essere quello più critico; a esso infatti corrisponde il downtime più elevato (Figura 9.3 e 9.4).

System Information	
Simulations:	10000 <small>The number of Simulations done!</small>
Time:	1000 <small>The End time for the simulations</small>
DownTime:	71,3368 <small>The total time the system was down</small>
UpTime:	928,6632 <small>The total time the system was up</small>
Mean Availability:	0,9287
PM DownTime:	0 <small>Total Down time due to preventive maintenance (Note that none of the blocks are set for PM)</small>
Pt. Availability:	0,0906
Reliability:	0,1559
Expected Number of Failures:	1,31 <small>The total number of system Failures</small>

Block Information						
Block	DownTime	UpTime	Mean Availability	Expected NOF	Expected NOPM	Reliability
C	2,2245	997,7755	0,9978	0,3741	0	0,5033
E	10,2645	989,7355	0,9897	0,5827	0	0,3625
A	66,9923	933,0077	0,933	0,8008	0	0,3583
F	6,1233	993,8767	0,9939	0,0731	0	0,9194
B	1,6965	998,3035	0,9983	0,0917	0	0,9055
H	0	1000	1	0	0	1
D	0,2665	999,7135	0,9997	0,0298	0	0,9676
G	0,0791	999,9209	0,9998	0,01	0	0,989

Down Time	<small>The time each block was down</small>
Up Time	<small>The time each block operated</small>
Expected NOF	<small>The expected number of failures for this component (also the number of spare parts that will be required)</small>
Expected NOPM	<small>The expected number of preventive maintenance actions (note no PM was set)</small>

Figura 9.4 Report analisi sistema rappresentato in Figura 9.2 (lo strumento utilizzato in questa analisi è BlockSim della ReliaSoft).

In base alla definizione di una scala di priorità misurabile (rappresentata dalle performance affidabilità e disponibilità simulate per il sistema), si ipotizza un intervento di modifica del blocco A, il quale abbia come obiettivo il miglioramento delle prestazioni complessive di tutto il sistema, esprimibili per esempio come un valore medio della disponibilità maggiore; tale risultato può essere ottenuto trovando sul mercato un componente corrispondente al blocco A, caratterizzato da un valore maggiore del MTBF. Scegliendo allora un blocco A con distribuzione della probabilità a guasto WEIB (1,5;4000) (utilizzando la simbologia nota), anziché WEIB (1,5;1000), si ottiene un miglioramento delle prestazioni complessive del sistema. Si confronti in particolare il grafico della Availability Vs Time in Figura 9.5 con quello riportato in Figura 9.3.

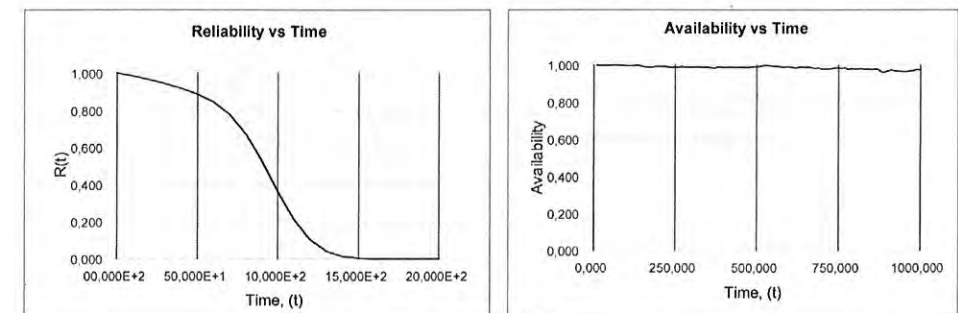


Figura 9.5 Grafico della affidabilità e disponibilità associato a una modifica migliorativa del blocco A in Figura 9.2.

9.3.1 Alcune considerazioni sull'utilizzo di questo metodo

La versatilità di una modellizzazione RBD risulta come detto essere notevole, data la possibilità di inserire e configurare all'interno di un diagramma, sia le funzioni dei componenti del sistema sia i componenti fisici.

Un'ulteriore possibilità molto interessante fornita da un approccio di questo tipo, è quella già citata relativa alla modellizzazione dei modi di guasto; spesso infatti, nei sistemi caratterizzati da una elevata complessità, un componente o una certa funzione possono presentare più modi di guasto.

Una sola descrizione del comportamento a guasto può risultare non sufficiente a rappresentare la reale evoluzione funzionale di un sistema; per questo motivo nei casi in cui si verificano situazioni con multiguasto potenziale, si ricorre a un caso particolare di modellizzazione RBD.

A partire dall'insieme dei modi di guasto potenziali di una funzione o di una parte del sistema, si seguono i seguenti passi:

- individuazione dei modi di guasto che rendono la parte inutilizzabile – guasti di prima specie (UNI9910 definizione di avaria maggiore);
- individuazione dei modi di guasto che comportano un decadimento delle prestazioni – guasti di seconda specie (UNI9910 definizione di avaria minore);
- modellizzazione in serie dei guasti di prima specie: nel caso si verifichi una sola avaria di tale specie, la funzione o parte risulta guasta e non utilizzabile;
- modellizzazione in parallelo, con livello di ridondanza stabilito, dei guasti di seconda specie: nel caso si verifichino una o più avarie di tale specie, la funzione o parte risulterà compromessa, vi sarà in generale un decadimento delle prestazioni, legato in particolare al livello di ridondanza presente.

In questo caso la rappresentazione mediante diagrammi a blocchi di affidabilità si presta alla modellizzazione dei singoli modi di guasto, anziché dei componenti costituenti il sistema. Se allora consideriamo un componente complesso caratterizzato da 8 modi di guasto, si può modellizzare il comportamento a guasto del componente andando a considerare le relazioni esistenti fra i modi di guasto elementari (FM) individuati (Figura 9.6).

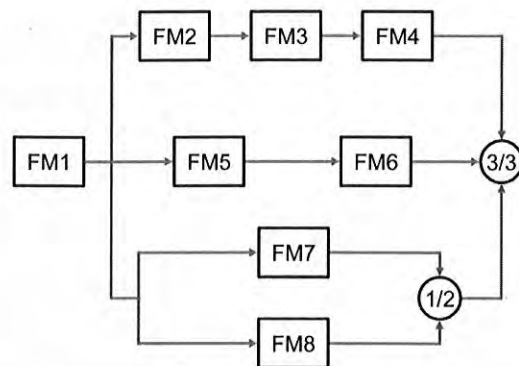


Figura 9.6 Diagramma a blocchi dei modi di guasto FM di un componente complesso.

È possibile effettuare una composizione del tasso di guasto, in modo da ottenere il comportamento complessivo a guasto della funzione o componente. In particolare nella Figura 9.7, si riporta un grafico che mostra il concetto di combinazione e sovrapposizione dei modi di guasto esprimibile come effetto di probabilità cumulata di guasto complessiva o inaffidabilità. È interessante notare come il contributo dei singoli modi di guasto possa essere caratterizzato da una diversa distribuzione nel tempo.

Un approccio così strutturato risulta essere abbastanza affine alla modellizzazione del comportamento a guasto ottenibile con una FTA; quello che si fa infatti è associare a ogni singolo possibile evento di guasto una certa distribuzione di probabilità di accadimento. Esistono in commercio alcuni applicativi che consentono di sviluppare RBD integrati con FTA (in cui cioè avviene una "traduzione automatica" dalla rappresentazione RBD a FTA e viceversa).

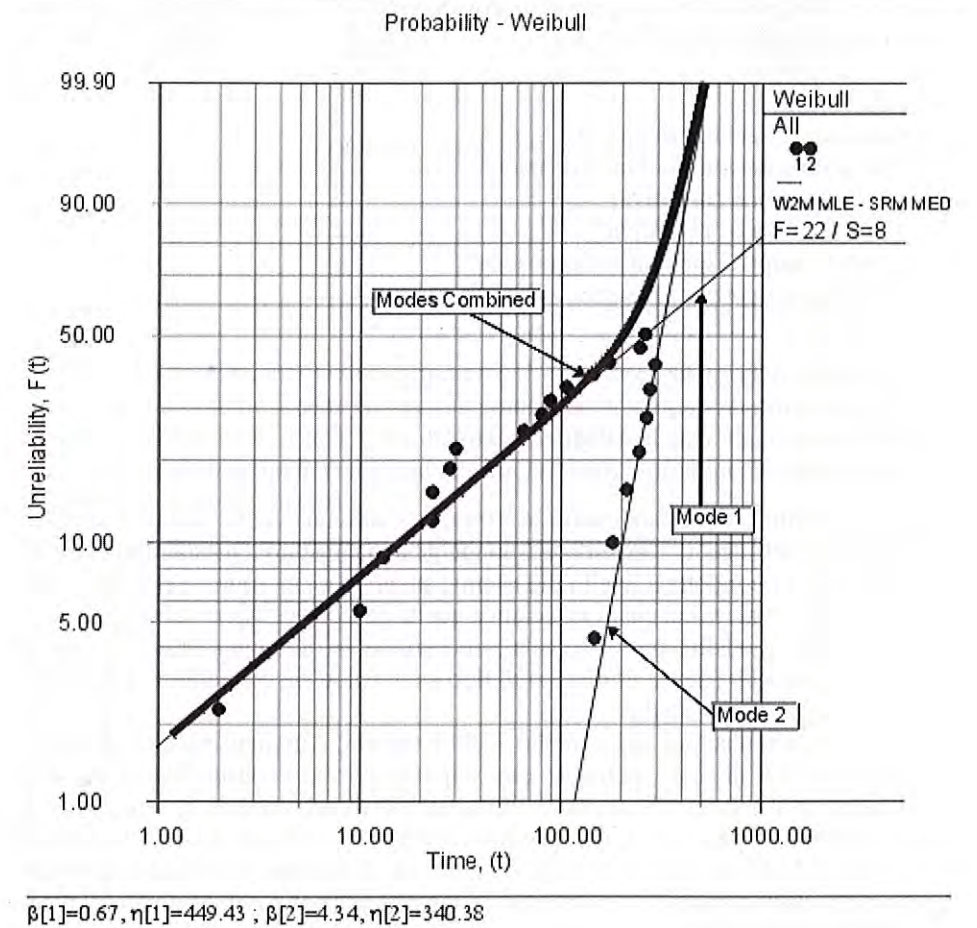


Figura 9.7 Esempio di sovrapposizione di più modi di guasto FM.

## 9.4 L'integrazione dei modelli RBD con i dati di costo

All'inizio del presente capitolo è stato fatto riferimento alla necessità di integrazione delle informazioni di tipo tecnico-affidabilistico con quelle di tipo economico.

Questo approccio permette di determinare le cosiddette configurazioni di *trade-off*, ovvero quelle configurazioni che consentono di individuare la soluzione che risulta migliore per il sistema, da un punto di vista sia tecnico sia economico.

Una prima osservazione in merito a questo è relativa al fatto che spesso la valutazione della soluzione ottimale viene basata soltanto sulla minimizzazione dei costi, senza tenere conto realmente di aspetti inerenti la redditività, in gran parte legata alla affidabilità di un sistema.

A partire da questa impostazione metodologica, a ogni blocco presente all'interno del modello sarà possibile associare informazioni di natura sia RAM sia economica.

Le due famiglie di dati necessari, che costituiscono gli input al modello integrato tecnico-economico, sono allora:

### Parametri RAM:

- distribuzione dei tassi di guasto;
- distribuzione dei tempi di manutenzione:
  - manutenzione correttiva;
  - manutenzione preventiva;
  - manutenzione ispettiva e diagnostica;
- distribuzione dei tempi logistici.

### Costi:

- costi unitari della manodopera;
- costi di acquisto delle parti di ricambio ;
- costi di stoccaggio e approvvigionamento;
- costi accidentali aggiuntivi (mancata produzione o mancato servizio).

Attraverso la simulazione sarà possibile attribuire a ciascun evento casuale associabile a un blocco del sistema il costo corrispondente a tale evento. Questa informazione potrà poi essere ricondotta a livello di sistema, andando a determinare per ogni ciclo di simulazione il valore del costo associato a quella particolare storia del sistema.

In base alle modalità previste dalla simulazione, si potranno calcolare alcune grandezze statistiche (figure di merito) di tipo sia tecnico sia economico, associabili al sistema oggetto dello studio.

Grazie alla simulazione del modello RBD integrato, comprensivo dunque anche delle informazioni di costo, potranno essere ipotizzate varie configurazioni possibili di sistema, sia nel caso di un nuovo progetto, sia di un progetto di retrofitting, e si potrà individuare quella che risulta essere il migliore compromesso fra le alternative possibili. Nel caso infine in cui il progetto sia finalizzato per esempio a un recupero della disponibilità di un sistema, la rappresentazione del rapporto costi/benefici, associata a ciascuna ipotesi, potrà essere per esempio del tipo riportato in Figura 9.8.

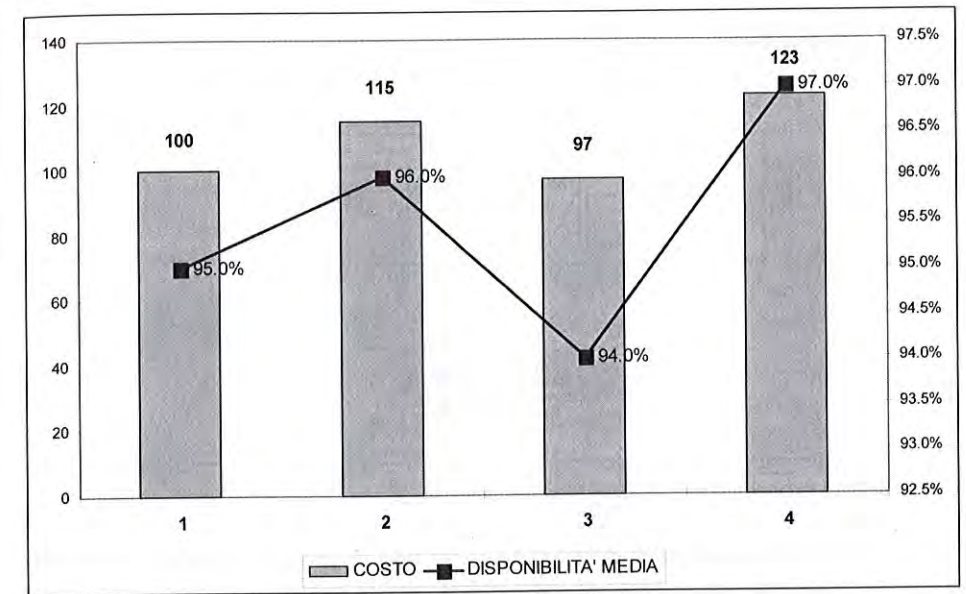


Figura 9.8 Ipotesi di differenti alternative di progetto a ciascuna delle quali è possibile associare un valore di disponibilità media e un valore di costo.

L'approccio deduttivo su indicato presenta alcuni vantaggi ma anche alcuni aspetti negativi.

Nella determinazione delle configurazioni ottimali, sono spesso incognite o non correttamente definite alcune condizioni di vincolo, che consentono di circoscrivere lo spazio delle soluzioni realmente ammissibili; questo comporta la impossibilità di comprendere se la soluzione individuata fra tutte quelle teoricamente ipotizzate sia effettivamente quella migliore.

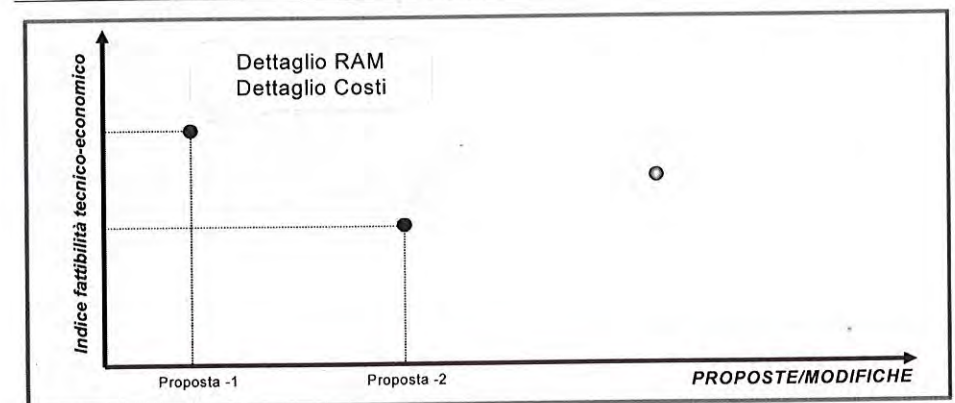


Figura 9.9 Il piano cartesiano delle alternative, a ogni proposta corrisponde un indice sintetico della sua fattibilità.

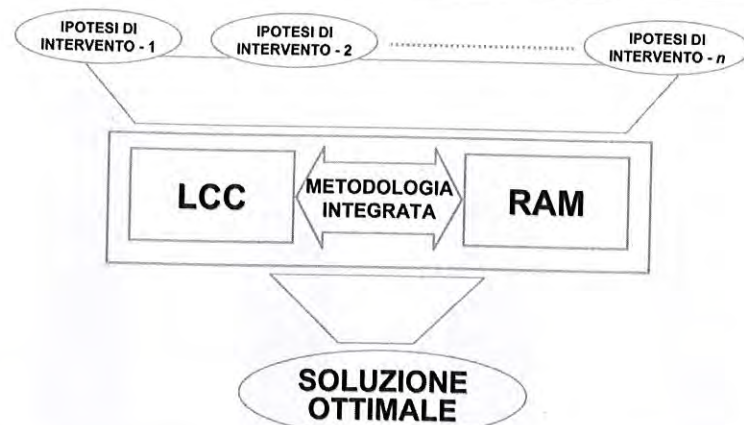


Figura 9.10 Il processo decisionale integrato RAM-LCC.

Per ogni proposta o ipotesi di intervento (sia in fase di progettazione sia di retrofitting) sarà possibile determinare un indice sintetico di fattibilità tecnico-economica (Figura 9.9), e sarà scelta la soluzione a cui è associato il più alto valore dell'indice.

A partire dunque da un elenco di possibili idee alternative o complementari di intervento, ciascuna di queste può essere sottoposta a una fase di valutazione integrata, arrivando alla determinazione della soluzione ottimale che risulti valida per tutta la durata del ciclo di vita del sistema (Figura 9.10); grazie all'uso della simulazione, sarà infatti possibile ottenere, a partire dai diagrammi a blocchi e analogamente a quanto già visto per le performance RAM, l'andamento temporale delle funzioni di costo nel tempo.

## 9.5 Una applicazione della metodologia RBD

La modellizzazione attraverso diagrammi a blocchi di affidabilità, unita allo strumento della simulazione stocastica, consente di rappresentare anche sistemi molto complessi, per i quali la schematizzazione attraverso semplici configurazioni serie-parallelo può risultare limitativa e richiedere approssimazioni non accettabili.

In questi casi risulta praticamente non determinabile una soluzione per via analitica perché non è risolvibile analiticamente l'equazione della affidabilità e della disponibilità del sistema, e a maggior ragione quando le distribuzioni di guasto associate ai singoli blocchi non sono esponenziali la risoluzione per via numerica risulta essere la sola praticabile.

Si pensi per esempio al caso riportato in Figura 9.11; per tale sistema risulta adeguata la soluzione di tipo numerico.

In generale, nel caso di sistemi molto complessi, caratterizzati da un elevato numero sia di blocchi sia di relazioni funzionali fra singoli blocchi, è richiesta prima di tutto una classificazione e schematizzazione di tali relazioni da fare preliminarmente alla costruzione di un diagramma.

Il comportamento di un sistema e in particolare le prestazioni RAM sono legate

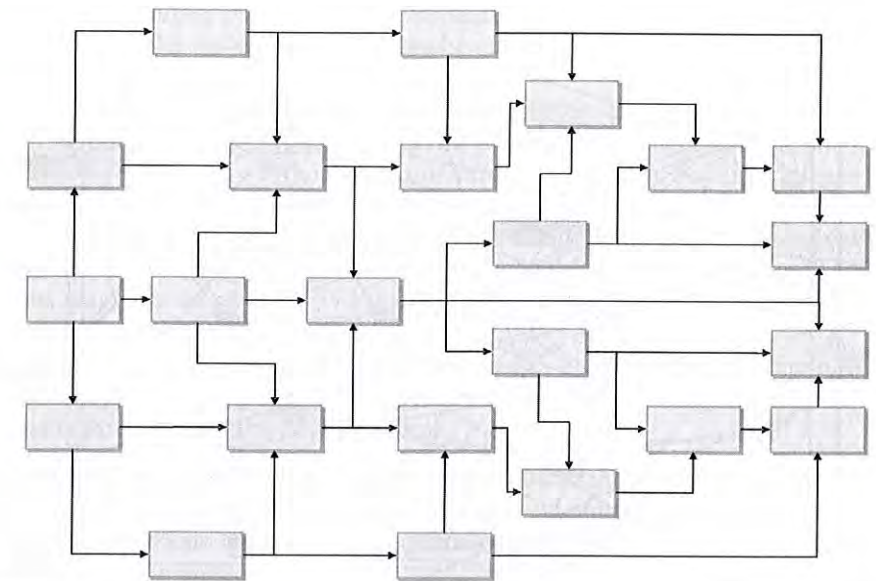


Figura 9.11 Un esempio di sistema complesso per il quale si può utilizzare un'impostazione numerica per la sua risoluzione.

alle caratteristiche intrinseche dei singoli blocchi, ma anche alle relazioni presenti fra gli elementi del sistema. Per questo motivo si dovranno evidenziare i blocchi che risultano essere più rilevanti, non soltanto per le loro specifiche proprietà, ma anche per la loro importanza rispetto al funzionamento dell'intero sistema all'interno del quale essi si trovano.

Da questo tipo di classificazione emergeranno:

- *blocchi isolati*: si tratta di blocchi che contribuiscono alle prestazioni RAM di tutto il sistema soltanto per il loro contributo al tasso di guasto, ma non per la loro posizione all'interno della configurazione;
- *blocchi iniziali (start block)*: nell'ordine della propagazione della funzione all'interno del sistema, tali blocchi si trovano all'inizio e pertanto un loro malfunzionamento può comportare (in funzione del livello di ridondanza) un blocco del sistema. Tali blocchi presentano soltanto degli output funzionali verso blocchi che si trovano in una posizione successiva (sono collocati a valle rispetto alla funzione);
- *blocchi intermedi (cross block)*: la loro presenza all'interno della configurazione affidabilistica è necessaria alla propagazione della funzione e si trovano in posizione intermedia. Presentano sia input sia output;
- *blocchi finali (end block)*: nell'ordine della propagazione della funzione all'interno del sistema, essi si trovano al termine. Si tratta di blocchi che presentano soltanto un collegamento di input, ma nessun output.

Un esempio è riportato nella Figura 9.12, nella quale i blocchi costituenti il sistema sono stati numerati per semplificare lo schema.

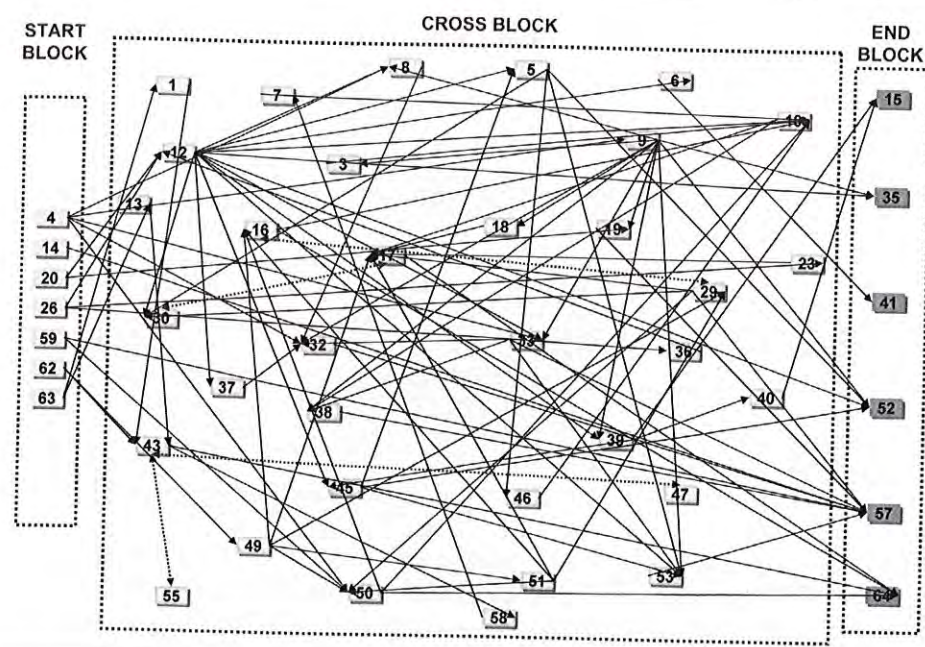


Figura 9.12 Un esempio di suddivisione fra categorie di blocchi.

All'interno dei blocchi intermedi si possono poi verificare situazioni in cui una funzione non è rappresentabile in modo unidirezionale da un blocco a un altro, ma anche bidirezionale. Questa ultima possibilità può complicare in modo notevole la complessità del modello e in tali casi è necessario valutare l'opportunità di utilizzare qualche ipotesi semplificativa.

## 9.6 Prodotti dedicati presenti in commercio

Gli applicativi software presenti in commercio e utilizzati nella modellazione RBD dei sistemi sono numerosi. Ognuno di questi prodotti ha alcune funzionalità distintive ma tutti hanno alcune caratteristiche comuni.

Nel corso degli ultimi anni sono stati condotti in ambito industriale e scientifico alcuni studi rivolti a classificare tali strumenti e sono state elaborate valutazioni e predisposti benchmarking.

A questo scopo si cita uno studio [4] pubblicato dalla Society of Reliability Engineer, il quale ha individuato alcune funzionalità sulle quali possono essere valutati e testati gli applicativi presenti in commercio:

- *capacità di modellare sistemi caratterizzati da un elevato numero di componenti e da una architettura a elevata complessità*: si tratta di una proprietà che è collegata alla memoria richiesta e utilizzata dall'applicativo, e quindi può essere connessa anche alle prestazioni dei sistemi di database management;

- *numero delle distribuzioni di probabilità previste*;
- *livello di condivisione delle informazioni fra i moduli dell'applicativo*: tale caratteristica risulta molto importante perché consente di conseguire risparmi di tempo anche notevoli;
- *vincoli logistici e gestione delle parti di ricambio*: la possibilità di considerare anche questi aspetti del sistema consente di creare un modello più realistico;
- *determinazione della disponibilità operativa*: l'applicativo può determinare la disponibilità operativa del sistema, tenendo conto anche dei vincoli logistici;
- *parametrizzazione della missione*: la possibilità di definire una missione, che sia costituita da varie sezioni e da differenti livelli prestazionali, consente di ottenere una maggiore rappresentatività del modello e quindi di poter interpretare e utilizzare i risultati in modo più diretto;
- *grafica*: la possibilità di ottenere output grafici permette di avere una maggiore facilità interpretativa e di rendere più rapida anche la individuazione delle eventuali correzioni da apportare al sistema.

Alcuni prodotti software dedicati sono stati caratterizzati da una notevole e rapida evoluzione e oggi essi sono in grado di fornire un supporto davvero significativo nella determinazione della decisione ottimale relativa alla progettazione e gestione di un sistema complesso.

In molti casi sono disponibili gratuitamente versioni demo reperibili su Internet; queste versioni non hanno tutte le potenzialità e funzionalità della versione completa ma sono comunque utili per fare le prime considerazioni.

Allo scopo di comprendere meglio quali siano i flussi di informazioni in ingresso e gli output prodotti da questi applicativi, consideriamo un sistema di riferimento e verifichiamo quali sono le principali caratteristiche associate a un applicativo software preso come esempio.

Il sistema considerato nel test è riportato in Figura 9.13.

Il tool consente di indicare per ogni singolo blocco le distribuzioni di probabilità associate ai tassi di guasto e ai tempi di manutenzione (compresi i tempi logistici che non saranno però valutati) (Tabella 9.1).

L'applicativo considerato in questa valutazione prevede anche la possibilità di introdurre informazioni di costo, che in questo esempio non saranno però considerate.

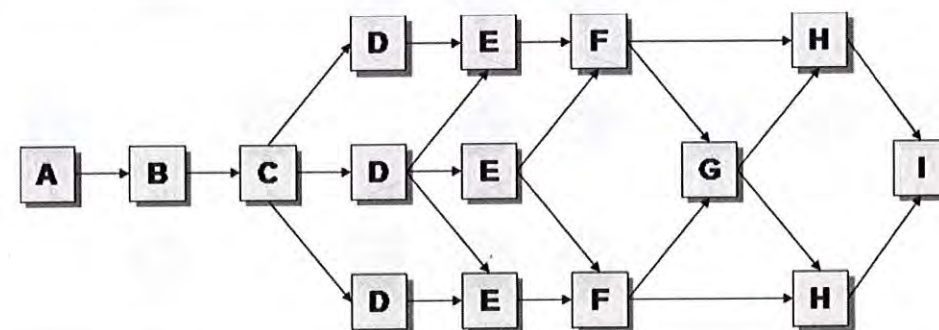


Figura 9.13 Modello RBD considerato nella valutazione dello strumento informatico.

**Tabella 9.1** Distribuzioni affidabilistiche e manutentive dei blocchi costituenti il diagramma di Figura 9.13

Blocco	Distribuzione di guasto	Distribuzione di manutenzione correttiva
A	WEIB (10000; 1.5)	LOGN (2; 0.5)
B	EXP (15000; 0)	LOGN (8; 1)
C	WEIB (14000; 1.2)	LOGN (1; 0.2)
D	WEIB (12500; 2)	LOGN (1.5; 0.3)
E	EXP (11000; 0)	LOGN (10; 1)
F	EXP (9700; 0)	LOGN (1; 0.2)
G	WEIB (125000; 3)	LOGN (10; 2)
H	WEIB (11800; 1.1)	LOGN (1; 0.1)
I	EXP (18000; 0)	LOGN (15; 1)

Il sistema schematizzato in Figura 9.13, viene modellizzato all'interno dell'applicativo; in Figura 9.14 è riportata la rappresentazione grafica che si ha durante la costruzione del modello.

Come si è detto l'unione fra blocchi avviene mediante frecce, indicando in questo modo anche il percorso che la funzione compie da sinistra verso destra.

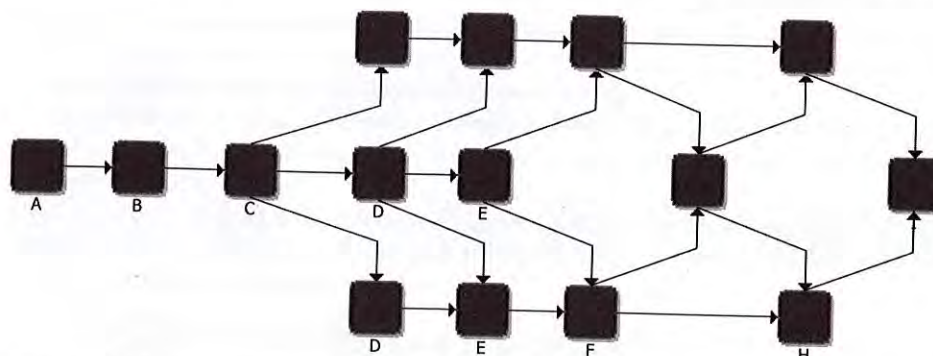
Il concetto di direzionalità della funzione è presente in molti applicativi di questo tipo.

Il tempo di missione scelto, rispetto al quale vengono valutate le prestazioni, è stato impostato a 10000 unità di tempo.

Tale valore viene considerato come uno dei parametri di ingresso alla simulazione, in quanto esso corrisponde all'intervallo di vita del sistema che sarà analizzato mediante simulazione.

Questo applicativo sfrutta la simulazione Monte Carlo per l'esecuzione dei calcoli e la determinazione dei risultati previsionali.

I risultati dei calcoli sono riportati come esempio in forma tabellare (Tabella 9.2). Questo report è organizzato in modo da dare immediatamente un riepilogo delle informazioni salienti relative al funzionamento di tutto il sistema, evidenziando in

**Figura 9.14** Rappresentazione del modello RBD all'interno dello strumento utilizzato (ReliaSoft-BlockSim 6.0).

particolare la disponibilità media tenendo conto sia di tutti gli eventi di fermo del sistema sia della sola manutenzione correttiva (*w/o PM & Inspection*).

Inoltre vengono indicati i valori attesi di:

- numero di guasti (*Number of failures*);
- interventi di manutenzione correttiva (*Number of CMs*);
- interventi di ispezione (*Number of Inspections*);
- interventi di manutenzione preventiva (*Number of PMs*).

**Tabella 9.2** Principali risultati derivanti dalla simulazione (Reliasoft - BlockSim 6.0)

System Overview	
Mean Availability (All Events):	0.6367
Std Deviation:	0.009
Mean Availability (w/o PM & Inspection):	0.6367
Point Availability (All Events) at 10000:	0.4142
Reliability at 10000:	0.0378
Expected Number of Failures:	1.8835
MTTF:	3637.795
System Uptime/Downtime	
Uptime:	6366.8644
CM Downtime:	3633.1356
Inspection Downtime:	0
PM Downtime:	0
Total Downtime:	3633.1356
System Downing Events	
Number of Failures:	1.8835
Number of CMs:	1.8835
Number of Inspections:	0
Number of PMs:	0
Total Events:	1.8835

L'applicativo oltre a fornire statistiche (valori medi e deviazioni standard) consente anche di ottenere gli andamenti nel tempo delle principali grandezze RAM (disponibilità e affidabilità).

I grafici delle due ultime grandezze citate sono riportati nelle Figure 9.15 e 9.16.

Questa funzionalità è molto importante perché permette di evidenziare situazioni critiche con un anticipo che consente di evitare che queste si verifichino realmente (per esempio sostituendo un componente prima che il suo malfunzionamento, previsto dalla simulazione, possa produrre un arresto di tutto il sistema). In questo senso l'adozione di strumenti avanzati come questi, unitamente a una validazione del modello costruito può risultare strategica.



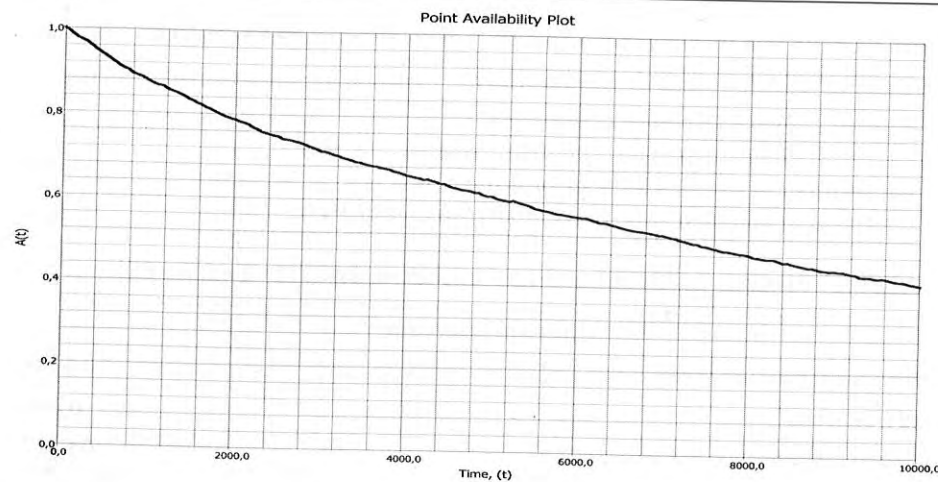


Figura 9.15 Grafico della disponibilità per il sistema analizzato.

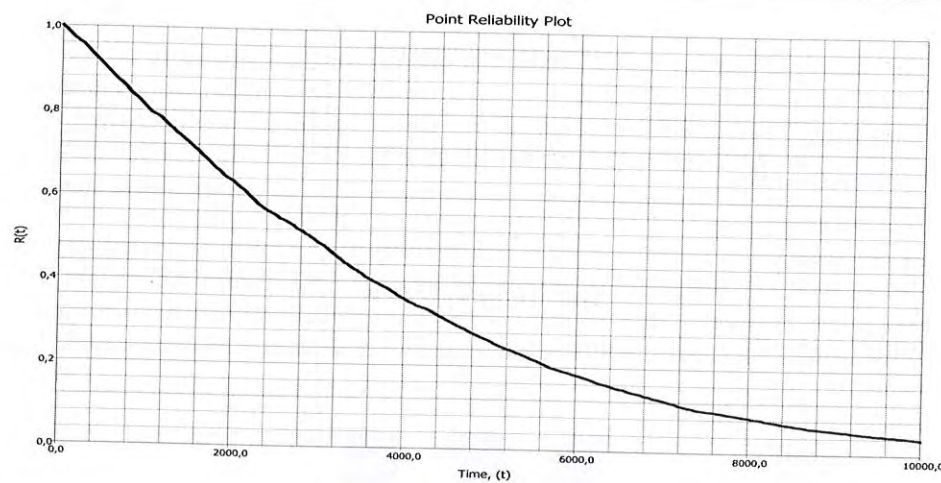


Figura 9.16 Grafico della affidabilità per il sistema analizzato.

Un'altra forma di report che può risultare interessante riguarda la durata totale dei downtime cumulati nel periodo di missione (nell'esempio dato da 10000 unità di tempo), associati ai singoli blocchi costituenti il diagramma.

Nel caso in cui la durata del downtime (Figura 9.17) sia considerata significativa rispetto alla valutazione della criticità di un certo componente all'interno del sistema, questo stabilisce una classificazione degli oggetti più critici che, quindi, dovranno essere presidiati in modo più efficace.

Si precisa che i valori di downtime riportati tengono conto dei contributi di manutenzione preventiva (comprese le attività di ispezione) e correttiva.

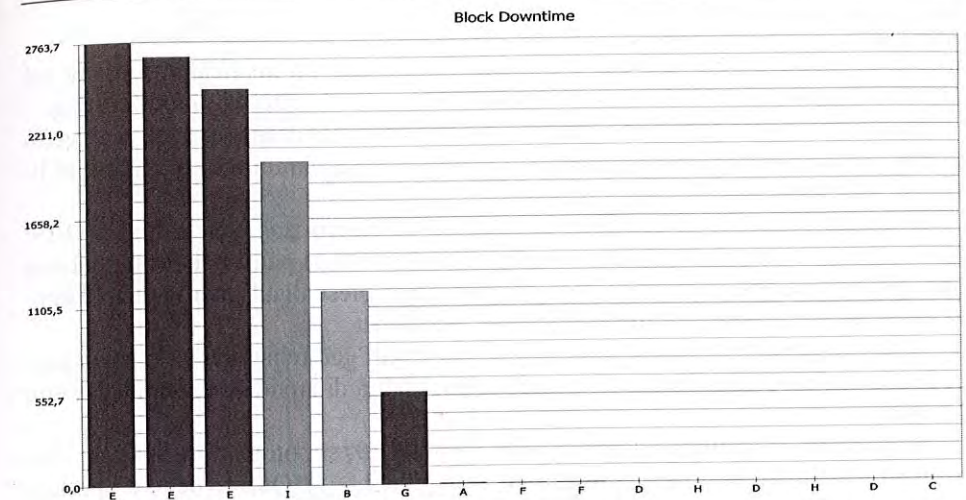


Figura 9.17 Andamento delle durate di downtime associate ai singoli blocchi costituenti il sistema.

Infine, un terzo tipo di report è costituito dal grafico che rappresenta l'importanza affidabilistica di un componente del sistema rispetto alla affidabilità di tutto il sistema.

Analiticamente questa funzione può essere determinata come derivata parziale della affidabilità del sistema, rispetto alla affidabilità del singolo componente. Questa grandezza assumerà un valore specifico se determinata in un certo istante fissato oppure si potrà osservare come questa varia nel tempo (Figura 9.18). È interessante far notare come l'importanza affidabilistica dei singoli componenti varia durante il tempo di missione, fino al punto che componenti non critici possono diventarlo.

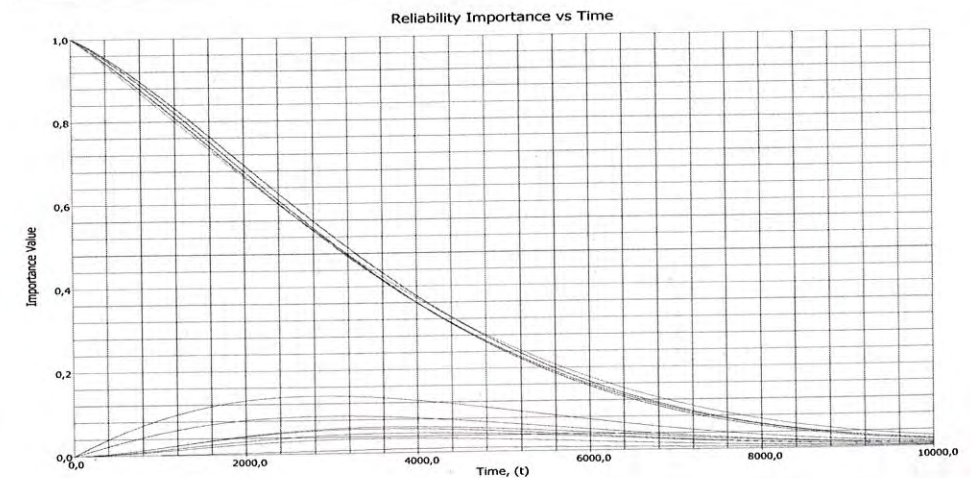


Figura 9.18 Grafico dell'andamento dell'importanza affidabilistica.

### 9.7 La funzione di annidamento (block nesting)

Una funzionalità molto utile che è comune a quasi tutti gli applicativi presenti sul mercato è quella relativa alla possibilità di annidamento dei blocchi: *block nesting*.

In questo modo è possibile costruire i diagrammi RBD corrispondenti a un certo livello di scomposizione dell'impianto, a partire dai diagrammi RBD associati ai livelli di scomposizione di maggiore dettaglio.

A questo proposito si consideri la struttura ad albero riportata in Figura 9.19; questo esempio mostra un sistema composto da 4 livelli, si pensi per esempio a una linea produttiva, agli impianti di linea, alle macchine presenti all'interno di un singolo impianto e ai gruppi costituenti le singole macchine.

A partire dunque da una scomposizione per livelli gerarchici del sistema, si procede alla sua modellizzazione, sfruttando la possibilità di annidare i sottodiagrammi ottenuti.

Rispettando la struttura ad albero della Figura 9.19, si potranno identificare *diagrammi parent* (livello  $n$ ) e *diagrammi child* (livello  $n - 1$ ). Quanto detto è riportato in Figura 9.20.

In molti casi il livello di annidamento permesso da un applicativo non presenta un limite, inoltre è opportuno effettuare una selezione dei blocchi, corrispondenti a funzioni o parti del sistema, per i quali può effettivamente avere senso effettuare una ulteriore disaggregazione e quindi procedere ad analisi con un dettaglio descrittivo maggiore.

Se da un lato questa tecnica risulta molto intuitiva, non altrettanto lo è comprendere la modalità con cui i risultati dei calcoli relativi a un diagramma child si inseriscono all'interno dei diagrammi parent.

In questi casi vengono introdotte approssimazioni che comunque producono un aumento della incertezza dei risultati determinati; nella pratica è dunque sempre importante limitare il numero di livelli coinvolti in un processo di annidamento.

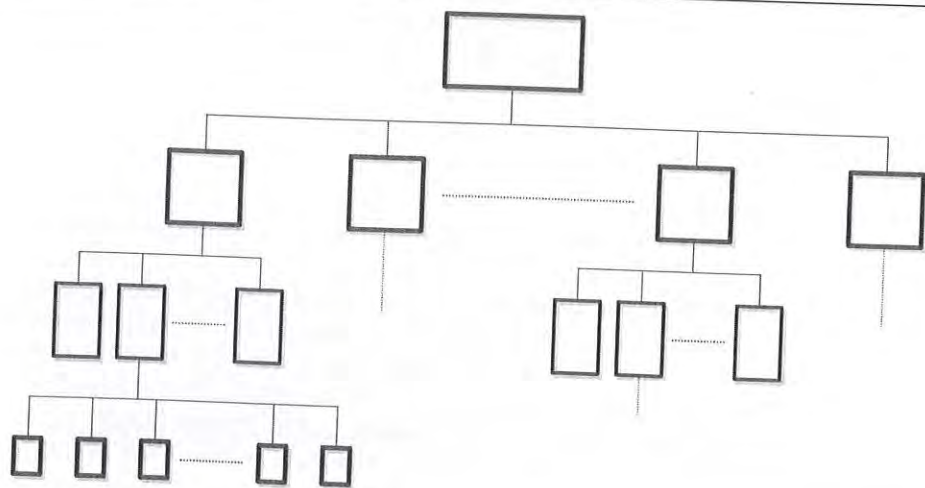


Figura 9.19 Struttura ad albero del sistema.

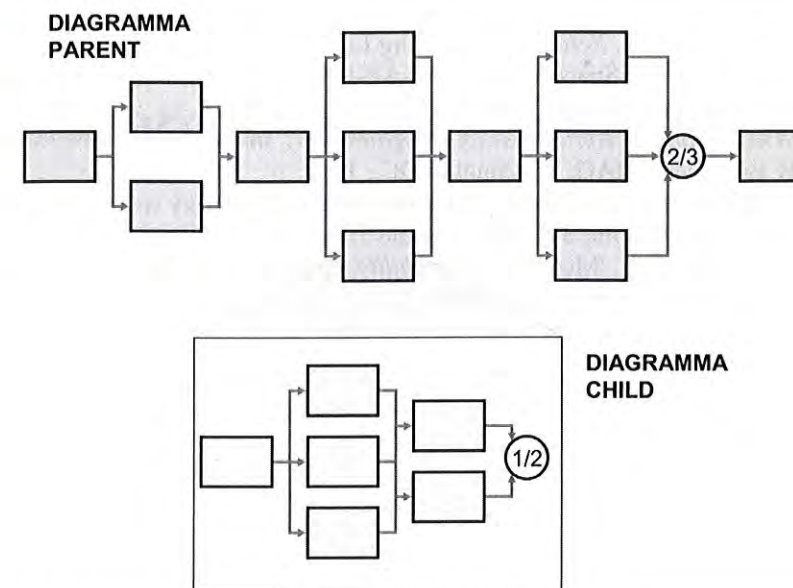


Figura 9.20 Diagrammi parent e diagrammi child.

La fattibilità di questo approccio è prima di tutto legata alla disponibilità di "micro-informazioni", le quali sono spesso riferite, ma questo non costituisce una regola, a quelle parti del sistema che risultano più significative rispetto al funzionamento del sistema stesso.

La possibilità di annidamento rappresenta comunque per un applicativo una caratteristica molto importante, perché attraverso il suo utilizzo la complessità di un sistema può essere notevolmente semplificata.

Prima di avviarsi però alla costruzione di un modello RBD nel quale sia utilizzata la funzione di annidamento, può essere di ausilio costruirsi una tabella analoga a quella riportata di seguito (Tabella 9.3) in cui a ogni diagramma vengono associati un nome e una posizione nella gerarchia strutturale o funzionale del sistema analizzato.

Tabella 9.3 Schema di riferimento per la costruzione di RBD con annidamento

Nome diagramma	Livello 1	Livello 2	...	Livello $n$
DIAG_1	X	-	-	-
DIAG_1_1		X	-	-
DIAG_1_1_... $n$				X
DIAG_1_2		X	-	-
DIAG_1_2_... $n$				X
DIAG_2	X	-	-	-

**Riferimenti bibliografici**

- [1] W.G. Schneeweiss, *Reliability Modeling* LiLoLe-Verlag, Hagen 2001.
- [2] NASA - Johnson Space Center, PD-AP-1313, *System reliability assessment using block diagramming methods*, 1995.
- [3] R. Willis, *Comparison of Reliability-Availability simulators*, Society of Reliability Engineers, MAG, Washington DC., 1999.
- [4] Updating the classic reliability block diagram methodology and constructs, *Reliability Edge*, Quarter 3 - 2002, volume 3: issue 2.
- [5] B.M. Ayyub, R.H. McCuen, *Probability, Statistics, & Reliability for Engineers*, CRC Press, New York 1997.

**10****Hazard and Operability Analysis  
HAZOP**

La HAZOP è una metodologia di natura qualitativa che presenta sia aspetti deduttivi (ricerca delle cause) sia aspetti induttivi (analisi delle conseguenze) e ha come obiettivo principale quello di identificare gli eventi iniziali che conducono a incidenti.

Una HAZOP può essere eseguita per esempio per stabilire quale sia il luogo più idoneo per la realizzazione di un nuovo impianto, in modo da ridurre l'impatto sull'ambiente e sulla sicurezza, oppure per verificare il livello di rischio associato a un impianto già esistente o ancora per rendere la manutenzione più mirata ed efficace.

Gli studi di HAZard and OPERability furono ideati dalla divisione Mond dell'Institute of Chemical Industry (ICI) in Inghilterra, si sono sviluppati nell'ambito della ingegnerizzazione dei processi chimici a partire dalla fine degli anni '60 del secolo scorso e hanno preso grande impulso dopo il disastroso incidente di Flixborough nel quale l'esplosione in uno stabilimento chimico causò la morte di 28 persone.

Il metodo si è successivamente diffuso nell'ambito petrolchimico, nell'industria alimentare, dove il rischio è maggiormente legato a eventi di contaminazione che non a fatti quali esplosioni e incendi, e anche in altri settori soprattutto di processo.

Per comprendere i criteri di applicazione di questa metodologia, possiamo iniziare dal considerare le due seguenti definizioni di Hazard e di Operability.

- *Hazard*: qualsiasi situazione che possa causare un rilascio catastrofico di sostanze chimiche tossiche, infiammabili o esplosive o qualunque evento che possa produrre il ferimento del personale.
- *Operability*: qualsiasi situazione che possa produrre uno spegnimento dell'impianto con una conseguente violazione delle condizioni di rispetto ambientale, di sicurezza e di salute degli operatori e che possa infine avere ripercussioni negative sulla profittabilità.

Il concetto di base della metodologia HAZOP è che un processo industriale lavora bene se esso si trova a operare nelle condizioni di progetto; per fare in modo che tale

processo operi correttamente si devono identificare tutte le possibili alterazioni. Pertanto per sviluppare studi di questo tipo è necessario avere una profonda conoscenza del processo, della strumentazione presente e delle operazioni.

Il metodo presenta due principali sotto-obiettivi fra di loro collegati.

- Identificare i rischi e i problemi operativi che degradano le prestazioni dell'impianto (qualità del prodotto, tasso di produzione, profitto) presenti all'interno dei processi di primaria importanza.
- Trovare soluzioni ai problemi individuati (secondario).

Questo metodo è impiegato per identificare i rischi e le criticità prevalentemente di natura operativa e si basa sulla assunzione che la maggior parte dei problemi (deviazioni) di un sistema è trascurata a causa della sua complessità più che per una reale mancanza di conoscenza da parte del team di progettazione.

Si tratta dunque di un approccio sistematico e orientato all'esame approfondito del processo.

Un progetto HAZOP è normalmente realizzato da una team di specialisti (fra cui, se possibile, dovranno comparire anche coloro che sono stati coinvolti nella progettazione dell'impianto); si fonda su una attività di brainstorming e sulla stimolazione della creatività e immaginazione individuale in modo da concepire e identificare tutti i possibili modi in cui i rischi e i problemi operativi possono avvenire.

Per questo motivo un processo è studiato in modo sistematico così da ridurre le possibilità di sottovalutazioni.

La tecnica richiede a tale scopo la definizione di una matrice contenente una lista dei parametri di processo e una lista di parole chiave. Ad alcune combinazioni "parola chiave-parametro di processo" potranno corrispondere situazioni di *deviazione*, ovvero di deriva del processo, che dovranno essere studiate durante l'analisi HAZOP.

Per ogni deviazione del sistema il team di studio deve rispondere ad alcune domande formulate utilizzando una modulistica apposita che verrà predisposta ed elaborata dal facilitatore del metodo prima del coinvolgimento del team di lavoro.

La metodologia HAZOP presenta alcune affinità con la FMEA/FMECA, infatti lo studio si sviluppa attraverso una analisi delle modalità di guasto di un certo item per diversi livelli di scomposizione; tuttavia, mentre la FMEA/FMECA è più prevalentemente basata sugli aspetti strutturali e hardware del sistema, la tecnica HAZOP è focalizzata maggiormente sui processi che sono presenti all'interno dell'impianto.

Le varie tipologie di guasto sono registrate usando una logica causa-conseguenza-azione correttiva.

Fino a oggi questo tipo di analisi è stato applicato a campi in cui i processi sono delimitati sia nello spazio sia nel numero di operazioni differenti e all'interno dei quali i costituenti del team presentano analoghe competenze.

In letteratura esistono comunque tentativi di applicazione del metodo anche a sistemi aperti, come quelli connessi ai processi legati al traffico dei veicoli.

In commercio poi si trovano alcuni software utilizzabili per supportare l'analisi HAZOP i quali possono funzionare anche come strumenti di supporto alle decisioni.

È opportuno ricordare che in fase di progettazione, l'adozione di un approccio di tipo HAZOP può agevolare il raggiungimento delle condizioni di sicurezza intrinseca al sistema.

## 10.1 Gli step della metodologia

Prima di tutto uno studio HAZOP, richiede come già detto la costituzione di un gruppo di lavoro, al cui interno la figura del leader, oltre a presentare una conoscenza tecnica in merito all'ambito di studio, deve anche avere doti di coordinamento e finalizzazione delle considerazioni e dei documenti prodotti dal gruppo di lavoro.

La fase di documentazione e acquisizione dei dati è legata alle caratteristiche del sistema considerato e consiste in schemi progettuali della struttura del sistema, in piani schematici di flusso sia fisico sia logico, in manuali operativi e manuali della strumentazione. Particolarmente utili risultano i P&I (Pipes and Instruments)

L'analisi procede come di seguito.

1. Si scompone il sistema in unità di processo funzionalmente indipendenti (per esempio unità di reazione, unità di stoccaggio, unità di pompaggio ecc.); per ciascuna unità di processo si devono poi individuare i vari stati operativi di processo (avvio, regime, blocco, manutenzione ecc.). Anche in questo caso particolarmente importante sarà la definizione dei confini di sistema e del livello di dettaglio utilizzato. Le unità funzionali individuate prendono il nome di *nodi*.
2. Per ciascuna unità di processo e stato operativo si identificano le potenziali deviazioni dal comportamento nominale del processo. Per fare questo dobbiamo:
  - a) specificare tutti i flussi in ingresso e in uscita dalla unità di processo (energia, massa, segnali di controllo ecc.) e le variabili caratteristiche del processo (temperatura, portata, pressioni, concentrazione ecc.);
  - b) scrivere tutte le differenti funzioni che l'unità si supponga effettui (riscaldamento, raffreddamento, pompaggio, filtraggio ecc.);
  - c) applicare parole chiave come *basso*, *alto*, *nessuno*, *inverso* ecc. alle variabili e funzioni delle unità di processo identificate precedentemente, in modo da definire le possibili deviazioni dal normale processo (Tabella 10.1).

Tabella 10.1 Esempi di parole chiave da usare in una analisi HAZOP

Parole chiave	Significato	Esempio
Nessuno	Negazione di un intento	Nessun flusso quando dovrebbe essere presente
Maggiore	Incremento quantitativo	Maggiore pressione, maggiore viscosità, maggiore viscosità di quella che dovrebbe esserci
Minore	Diminuzione quantitativa	Opposto di Maggiore
Parte di	Diminuzione qualitativa	Composizione del sistema differente da quella che dovrebbe avere
Così come	Incremento qualitativo	Pressione alta così come la temperatura
Inverso	Logicamente opposto	Flusso inverso
Altro	Completa sostituzione	Cosa potrebbe accadere rispetto alla norma se non fosse effettuato il campionamento del prodotto

La composizione delle deviazioni avviene quindi attraverso opportune combinazioni, nel modo seguente:

Parola chiave + Parametro/Funzione = Deviazione potenziale

per esempio

Nessun + Flusso = Nessun flusso

3. Per ogni deviazione di processo (qualitativa) si identificano le possibili cause e conseguenze. Per quanto concerne le conseguenze, si devono includere gli effetti anche sulle altre unità; questo permette alla HAZOP di tenere conto degli effetti a catena fra le differenti unità. Inoltre devono essere individuate le condizioni di prevenzione o riduzione del rischio consistenti in azioni correttive e in condizioni di sicurezza. In generale potranno verificarsi deviazioni che non hanno senso per quel particolare nodo del processo e che quindi devono essere trascurate (Tabella 10.2).

Tabella 10.2 Alcuni esempi di parametri di processo

Parametro di processo	Deviazione	Parametro di processo	Deviazione
Flusso	Nessun flusso	Durata	Durata eccessiva
	Flusso elevato		Durata breve
	Flusso basso		Ritardo
	Flusso inverso		Anticipo
Portata	Portata eccessiva	Sequenza	Saltare uno step
	Portata insufficiente		Inversione di step Step imprevisto
Pressione	Pressione elevata Pressione bassa	pH	pH elevato pH basso
Temperatura	Temperatura elevata Temperatura bassa	Viscosità	Viscosità elevata Viscosità bassa
Livello	Livello elevato Livello basso	Quantità di calore	Quantità di calore eccessivo
Composizione	Mancanza di un componente	Fase	Fase imprevista
	Concentrazione elevata		Fase mancante
	Concentrazione bassa		
Purezza	Presenza di impurezze	Reazione	Assenza di reazione
	Purezza insufficiente		Reazione limitata
			Reazione eccessiva
			Reazione troppo lenta
			Reazione troppo veloce

Sebbene esistano in letteratura parole guida di tipo standard, che possono essere ritenute valide per ogni tipo di processo, ogni gruppo di lavoro ha comunque la possibilità di definire le proprie parole guida e l'obbligo di condividerne il significato preciso, in modo da rendere l'analisi più contestuale al particolare processo.

Come detto una caratteristica importante per la riuscita di uno studio HAZOP è rappresentata proprio dalla creatività e dalle idee che vengono generate dal gruppo di lavoro ed è proprio dalla interazione fra i componenti del gruppo che vengono generate nuove idee. Per questo motivo, il successo di uno studio HAZOP è legato alla possibilità di potere esprimere liberamente le proprie considerazioni e opinioni. Attraverso una strutturazione di questo approccio si può pervenire a una visione sistematica e sufficientemente completa.

La documentazione prodotta in un progetto HAZOP è a volte molto consistente e risulta costituita in gran parte dai tabulati degli effetti associabili alle deviazioni.

Oltre a raggiungere una conoscenza approfondita dell'impianto e del processo, vengono individuate le azioni correttive più adeguate associabili a ogni evento negativo.

Interessante può essere la stima dei tempi necessari [2] alla esecuzione di uno studio HAZOP e che è riportata nella normativa DOE-HDBK-1100-96 *Chemical Process Hazards Analysis*; naturalmente i tempi richiesti sono legati alla complessità del sistema oggetto dell'analisi, al livello di dettaglio richiesto e alla conoscenza del processo da parte dei componenti del team di lavoro (Tabella 10.3).

Tabella 10.3 Stima dei tempi di analisi HAZOP (Fonte: DOE-HDBK-1100-96)

Sistema	Fase di preparazione	Fase di valutazione	Elaborazione documentazione
Semplice/piccole dimensioni	8-12 ore	1-3 giorni	2-6 giorni
Complesso/processo esteso	2-4 giorni	1-4 settimane	2-6 settimane

Un limite ricorrente della metodologia è dato dal non considerare adeguatamente i rischi legati alle condizioni di lavoro (interazione con apparecchiature elettriche, apparecchiature rotanti, superfici a elevata temperatura ecc.) o i rischi cronici (esposizione cronica ad agenti chimici, rumore ecc.).

Nell'utilizzo pratico del metodo, è diffusa e consigliata l'impostazione secondo cui un processo può essere suddiviso in sottoprocessi maggiormente circoscritti e più facilmente descrivibili. Quello che conta è in questo caso la definizione precisa dei confini e delle interfacce dei vari sottoprocessi.

In Figura 10.1 è riportato un esempio di studio HAZOP estratto dalla normativa precedentemente indicata (DOE-HDBK-1100-96).

Guide word	Deviation	CAUSE	CONSEQUENCE	SAFETY LEVELS	SCEN	COMMENTS / ACTION
No	No flow	Valve V-19 closed HF Vaporizer inlet header plugged/frozen	Loss of HF to B-1 process; consequences unknown	No known protection	1	Action item: determine the level of protection available and potential consequences in B-1. Wing
Less	Low flow	Line rupture	HF release in area; possible injuries/fatalities	None	2	No action: unlikely event; piping protected against external impact
		Valve V-19 partially closed HF Vaporizer inlet header partially plugged/frozen	Insufficient HF supply to B-1 process; consequence unknown	No known protection	3	Same as #1
More	High flow	None	Local rapid flashing, rupture disc/relief valve inadvertently opens, release to stack	Stack height designed to dissipate release	4	
			Release HF into storage area; potential injuries/fatalities if people in area	Valve V-28 closed, foreing release to stack	5	Action item: consider administrative controls or actions to ensure V-28 is closed when operating
		High temperature	Over-pressure; HF release; possible injuries/fatalities	Local temperature indication on water heating loop	6	No action: unlikely event
Reverse	Backflow to HF inlet line	Fire: hot weather	Possible plugging of lines; insufficient vaporization (see consequences of no/less flow scenarios #1-5)		7	
		Cold weather			8	
		None			9	

Figura 10.1 Esempio di analisi HAZOP per una linea di alimentazione di un vaporizzatore (Fonte: DOE-HDBK-1100-96).

Una visione completa del flusso logico della metodologia può essere schematizzato nel seguente modo (Figura 10.2):

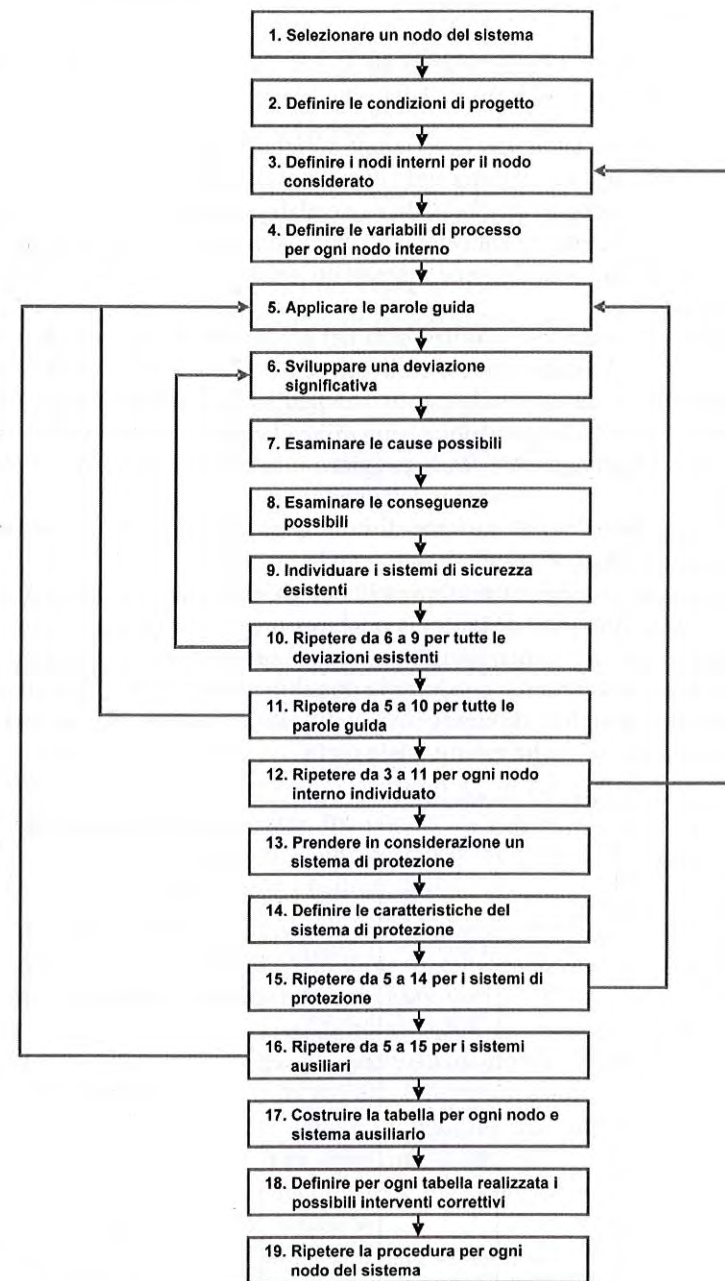


Figura 10.2 Flusso di processo della metodologia HAZOP

## 10.2 Glossario della metodologia HAZOP

La metodologia viene dunque implementata attraverso l'uso di tabelle, utilizzate per la registrazione delle informazioni emerse dallo studio e risultanti dalle attività del gruppo di lavoro.

Esiste un modello di scheda (Figura 10.3) per l'applicazione della tecnica HAZOP; il significato [3] dei vari campi della scheda è riportato di seguito:

- **Nodo:** non si riporta tanto una descrizione sommaria delle caratteristiche del sottosistema analizzato, quanto una sigla di riconoscimento o codice che può essere stabilito a priori o recuperato dai codici aziendali esistenti.
- **Parametro di processo:** si considerano i parametri di processo più significativi. Nella casella di ogni scheda viene inserito un parametro per volta a cui si associa una parola guida.
- **Parola guida:** riportando la parola guida nel modulo si dà una maggiore completezza alla stesura del documento e si favorisce l'evidenza di eventuali omissioni.
- **Deviazione:** oltre a descrivere le caratteristiche di deriva dei parametri, esso serve a valutare se i sistemi di protezione sono efficaci e per indicare i valori che la deviazione può raggiungere nel caso peggiore e in quanto tempo tali valori sono raggiunti.
- **Causa:** è rappresentata dall'insieme di tutte le cause hardware e/o software che hanno condotto alla deviazione.
- **Conseguenza:** le conseguenze rappresentano gli effetti di una deviazione e possono agire sulle altre parti del sistema o interessare un più ampio raggio.
- **Sistemi di protezione:** si intendono i sistemi già presenti che concorrono a prevenire le possibili deviazioni e/o ridurre le possibili conseguenze (allarmi, chiusure di emergenza, procedure di emergenza codificate). I sistemi di protezione di un nodo possono essere anche esterni a tale nodo.

Scheda n. 1		Nodo 1		Descrizione: Linea di comunicazione SI - R			
Parametro di processo	Parola guida	Deviazione	Causa	Conseguenza	Sistemi di protezione	Interventi	Note
Flusso da A al reattore R	NON	NON c'è trasferimento di A	stoccaggio di A esaurito; la condotta è rotta, si ha una perdita lungo la linea; la valvola di isolamento è stata chiusa; la valvola si è rotta e si ha una fuoriuscita di sostanza A.	eccesso della sostanza B nel reattore; prodotto finale fuori dalle specifiche di progetto se la sostanza B è tossica e/o volatile si possono avere dei rilasci pericolosi nell'ambiente di lavoro	periodiche manutenzioni sulla linea di collegamento	possibilità di aggiunta di un allarme collegato a un misuratore di portata che avverte di possibili variazioni di flusso; prevedere un sistema di chiusura ermetica per la vasca di stoccaggio finale	

Figura 10.3 Esempio modulo HAZOP (Fonte: Giagnoni).

- **Intervento:** si riportano tutte le possibili azioni atte a migliorare lo stato attuale del sistema. Gli interventi possono non appartenere necessariamente al sottosistema in esame, tuttavia devono essere riportati in corrispondenza della deviazione i cui effetti sono predisposti a fronteggiare.
- **Note:** campo libero in cui si possono riportare tutte le informazioni ulteriori che si ritengono utili alla completezza dello studio.

## 10.3 Alcune regole pratiche

Al fine di poter conseguire un risultato concreto e positivo, associato alla esecuzione della metodologia HAZOP, esistono alcune regole fondamentali, di tipo pratico, che sono da seguire.

Il gruppo di lavoro rappresenta un elemento cruciale per la qualità dei risultati prodotti; per la istituzione del gruppo di lavoro si possono allora riepilogare alcune caratteristiche:

1. il team deve essere composto da persone aventi competenze e conoscenze, differenti e con estrazioni culturali e professionali differenti:
  - a) processisti, progettisti, manutentori, controllori della qualità;
  - b) operai aventi esperienze quotidiane del processo;
2. il team deve comprendere a fondo il funzionamento dell'impianto;
3. il gruppo deve essere composto al massimo da 9 persone, idealmente 6;
4. eventuali dubbi e incertezze devono essere eliminate immediatamente al momento della loro comparsa e non rimandate o lasciate in sospeso;
5. la documentazione deve essere preparata e distribuita prima dell'incontro;
6. il team-leader deve favorire il rispetto dei tempi, in quanto lo studio può in certi casi risultare dispersivo e inoltre deve mantenere una oggettività e obiettività nei pareri espressi dai componenti del gruppo;
7. i risultati dell'analisi devono essere registrati da un componente del gruppo a cui è attribuito il ruolo di segretario, ma che deve comunque presentare anche competenze tecniche ed essere in grado di registrare e sintetizzare correttamente le considerazioni emerse durante i brainstorming.

Nel caso in cui a un gruppo di lavoro partecipino sia esponenti del cliente sia progettisti dell'impianto, esponenti del fornitore, il team-leader dovrà essere in grado di mantenere un equilibrio fra i due sottogruppi.

La possibilità di trasferimento delle informazioni fra persone appartenenti ad aree aziendali diverse, favorisce anche la condivisione del know-how, sviluppando uno spirito di collaborazione e allineamento agli obiettivi comuni.

Altro aspetto che è opportuno notare sta nel fatto che non è necessario che tutti debbano partecipare sempre agli incontri, una schedulazione precisa e mirata degli impegni individuali può servire anche a dare maggiore fiducia e comprensione allo studio, favorendone il successo.

Soltanto il team-leader, in qualità di owner del metodo, dovrà presidiare lo svolgimento di tutto il progetto.

Alla conclusione di uno studio HAZOP per ogni oggetto facente parte dell'impianto, sarebbe auspicabile poi determinare:

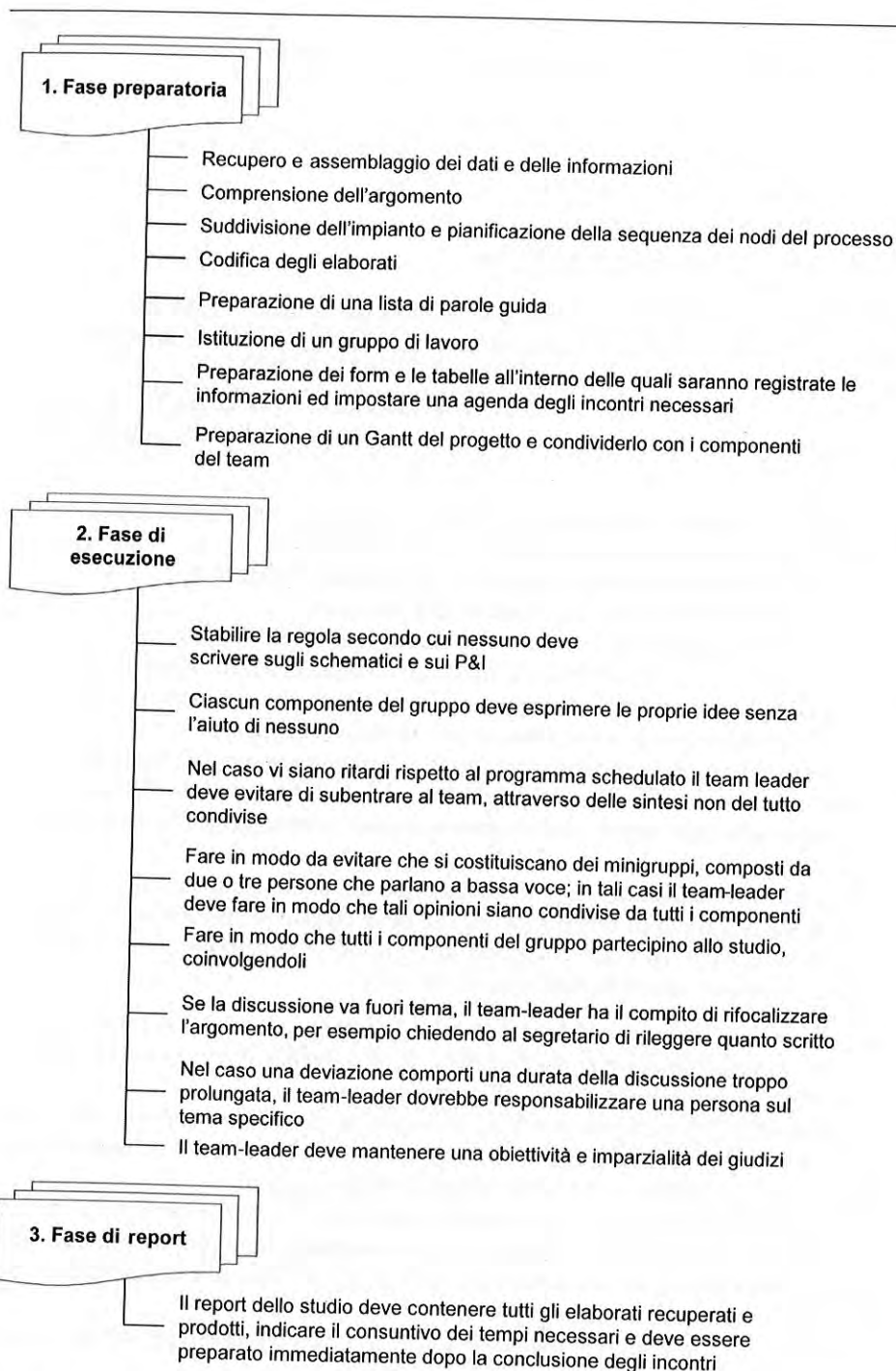


Figura 10.4 Alcune regole pratiche per il coordinamento della metodologia HAZOP.

- la priorità di interventi futuri;
- la stima del danno associato a un evento;
- la stima della probabilità di un evento;
- i costi degli interventi.

Un altro aspetto da considerare durante l'esecuzione di uno studio HAZOP è legato alla identificazione delle cause di deviazione che devono essere realmente plausibili e verosimili per quel particolare processo. Anche in questo caso sarà il gruppo di lavoro a esprimere un giudizio in merito alla stesura della lista di tali cause [4].

A questo proposito si possono considerare tre principali categorie di cause di deviazione:

- errore umano: si tratta di azioni di omissione o alterazione commesse da parte di operatori, progettisti, costruttori o altre persone che generano un rischio che potrebbe per esempio condurre al rilascio di materiale pericoloso;
- guasto alle apparecchiature: si tratta di guasti strutturali, meccanici oppure operativi che possono condurre al rilascio di sostanze pericolose;
- eventi esterni: item al di fuori dell'unità funzionale considerata, che influenzano le operazioni associate all'unità oggetto dello studio. Sono eventi esterni per esempio la mancanza di utility o l'esposizione agli agenti atmosferici o gli eventi sismici.

È possibile riassumere alcune regole pratiche, utili al facilitatore come linee guida per il coordinamento a una applicazione della metodologia HAZOP, in cui si evidenziano le attività e le fasi che la costituiscono (Figura 10.4).

#### Riferimenti bibliografici

- [1] T. Kletz, *Hazop and Hazan*, Taylor & Francis, Londra, 1999.
- [2] DOE-HDBK-1100, 1996.
- [3] L. Giagnoni, *Metodi di valutazione dell'affidabilità e del rischio*, Università di Firenze, 2002.
- [4] T. Stien, R. Brett, J. Davis, "Using a modified HAZOP/FMEA Methodology for managing process risk", *Sesha Journal*, vol. 15, n. 3/2002.
- [5] A.M. Heikkila et al., *Inherent Safety in Proces Plant Design*, European Symposium on computer aided process engineering, Lappenranta, 2002.



# 11

## Fault Tree ed Event Tree analysis

Un *albero dei guasti* è una rappresentazione logica di un sistema, ovvero di un insieme di gruppi, componenti, funzioni, modi di guasto e relative cause associate, secondo la loro struttura relazionale.

Storicamente la *Fault Tree Analysis* (FTA) è stata utilizzata per la prima volta nei laboratori della Bell Telephone, congiuntamente al risk assessment del sistema di controllo di lancio del missile Minuteman avvenuto nel 1962.

Tale rappresentazione, inizia con la individuazione di un evento indesiderato chiamato *top event* (in genere un guasto o un malfunzionamento del sistema) e prosegue con la determinazione di tutte le possibili modalità di accadimento del top event analizzato.

La valutazione della affidabilità di un sistema ingegneristicamente complesso, richiede metodi analitici e sistematici e fra questi la Fault Tree Analysis può essere utilizzata per questo scopo.

Come suggerisce la denominazione stessa della metodologia, l'albero che si costruisce con l'applicazione del metodo mostra i percorsi di guasto e gli scenari che possono condurre all'accadimento di un evento. Attraverso una associazione delle probabilità di accadimento ai singoli eventi costituenti l'albero, è possibile determinare la probabilità di accadimento di un top event (macro-evento risultante e che in genere riguarda l'intero sistema), tenendo conto delle interconnessioni presenti fra i vari eventi.

In generale un sistema potrà avere più di un top event, ovvero eventi indesiderati, per ciascuno dei quali sarà possibile effettuare una combinazione di eventi preliminari (di base) che ne determinano l'accadimento. Di conseguenza, è necessario definire e determinare un insieme di eventi di livello inferiore e deve anche essere stabilita la "forma" secondo cui questi eventi di livello inferiore sono logicamente connessi. Le catene di eventi vengono costruite a partire dall'utilizzo di operatori di tipo OR o AND che nell'analisi FTA vengono denominati *gate*.

È opportuno notare che in un'analisi FTA non tutti i possibili guasti del sistema vengono considerati, ma soltanto alcuni top event; inoltre la FTA fornisce un model-

lo prima di tipo qualitativo che successivamente può essere utilizzato come struttura di riferimento per effettuare valutazioni di natura quantitativa (legate per esempio alla determinazione della probabilità di guasto e quindi della affidabilità).

Un albero dei guasti è dunque un diagramma logico, che contiene al suo interno le dipendenze funzionali delle parti di un sistema e che consente di evidenziare le combinazioni di eventi di base (*basic event*) che portano a un certo top event.

Questa metodologia è ampiamente utilizzata nella progettazione di nuovi impianti ma può essere impiegata anche per la valutazione di un sistema già installato e in esercizio. Le sue applicazioni sono molteplici.

- Modellizzazione della configurazione, architettura e funzionalità di un sistema, impostata secondo una logica di tipo top-down, ricercando modi di guasto potenziali e cause associate, che potrebbero produrre un effetto negativo sul sistema finale.
- Determinazione quantitativa della affidabilità del sistema (o comunque di una sua stima), a partire da una individuazione dei modi e delle cause associate di guasto, che risultano avere un impatto maggiore sulla inaffidabilità del sistema. A partire da questa analisi è, infatti, possibile valutare il miglioramento conseguibile.

Fra i risultati dell'analisi, vi è l'individuazione dei *Minimal Cut Set* (MCS), ovvero dei più piccoli raggruppamenti di eventi dal cui accadimento simultaneo deriva anche l'accadimento di un particolare top event.

La FTA è dunque una metodologia di tipo deduttivo, la quale partendo dalla definizione e individuazione di alcune possibili conseguenze negative (rappresentate proprio dai top event) consente di risalire alle cause originali (*basic event*) in modo da poter intervenire.

Associando agli eventi di base (bottom) le probabilità di accadimento e seguendo un percorso di tipo bottom-up, è possibile pertanto stabilire la probabilità di accadimento del top event (up). La Figura 11.1 mostra l'impostazione di una logica analitica di questo tipo.

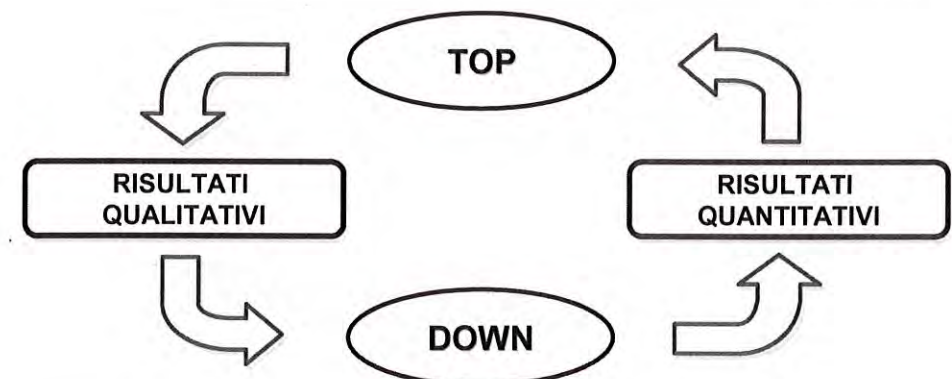


Figura 11.1 La logica top - down - top.

Riassumendo, nella costruzione di un albero di guasto, si effettuano i seguenti passi:

- definizione di un sistema e delimitazione dei suoi confini fisico-funzionali;
- definizione delle sue parti e funzioni principali;
- determinazione dei fenomeni che precludono l'operatività;
- determinazione delle cause di tali fenomeni;
- determinazione dei fattori che contribuiscono alle cause.

## 11.1 La metodologia FTA

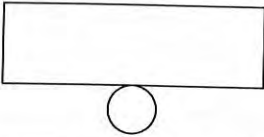
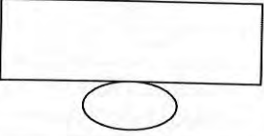
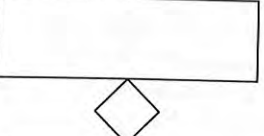
Nello sviluppo di una FTA e in particolare nella costruzione di un fault tree si possono considerare principalmente due elementi già citati:

- *gate*: risultati di un evento o di una combinazione di eventi di input o di altri gate;
- *cut set*: ovvero gruppi di eventi di base o di eventi risultanti che, se si verificano, possono causare il guasto dell'intero sistema.

Nel caso di alberi caratterizzati da un elevato numero di eventi, il calcolo della probabilità di accadimento del top event analizzato, può risultare anche molto oneroso e anche da questa considerazione è derivata l'opportunità di procedere alla ricerca dei *Minimal Cut Set*.

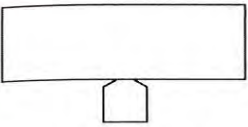








Un MCS è dunque un insieme di eventi di base per il quale il non accadimento di uno qualsiasi di tali eventi, che fanno parte di quel set, ha come diretta conseguenza il non accadimento del top event. La rimozione di uno solo di tali eventi dovrebbe dunque consentire la sopravvivenza del sistema. In generale un sistema presenterà più di un MCS [1].

**Tabella 11.1** Simbologia utilizzata nella FTA (Fonte: NUREG 0492)

Simbolo	Significato
	<i>Evento di base</i> : si tratta di un guasto di partenza (di base), per il quale non sono necessari ulteriori dettagli
	<i>Evento condizionante</i> : condizioni specifiche o restrizioni che possono essere applicate a qualunque gate logico
	<i>Evento non sviluppato</i> : evento che non viene ulteriormente sviluppato, sia perché ha scarse conseguenze, sia perché non vi sono altre informazioni disponibili

(segue)

(continua)

	<i>Evento consueto</i> : evento il cui accadimento è normalmente atteso
	<i>Gate AND</i> : il guasto di output avviene soltanto nel caso in cui si verifichino tutti i guasti di input
	<i>Gate OR</i> : il guasto di output avviene nel caso in cui si verifichi almeno un guasto di input
	<i>Combinazione</i> : il guasto di output avviene soltanto nel caso in cui avvengano $n$ guasti di input
	<i>Gate OR esclusivo</i> : il guasto di output accade solo se precisamente uno dei guasti di input si verifica
	<i>Gate AND con priorità</i> : il guasto di output accade solo se tutti i guasti di input accadono secondo una sequenza precisa
	<i>INHIBIT</i> : il guasto di output accade se il (solo) guasto di input si verifica in presenza di una condizione che lo permette
	<i>Trasferimento interno</i> : indica che l'albero è ulteriormente sviluppato, in una sezione in cui vi è il corrispondente <i>trasferimento esterno</i>
	<i>Trasferimento esterno</i> : indica che questa sezione dell'albero, deve essere collegata al corrispondente <i>trasferimento interno</i>

La simbologia utilizzata nella costruzione dei FT ha subito modifiche nel corso degli anni, e inoltre in letteratura si possono riscontrare molte varianti; esistono però alcuni elementi fondamentali, che sono comuni a ogni particolare impostazione.

Può risultare interessante a questo punto effettuare un parallelismo fra gli elementi riportati in Tabella 11.1 e il loro significato nell'ambito della modellizzazione della affidabilità (Tabella 11.2).

Tabella 11.2 Terminologia e significati

Simbolo	Modello affidabilistico
<i>Evento di base</i>	Rappresenta il modo di guasto di un componente oppure la causa del guasto
<i>Evento condizionante</i>	Probabilità condizionata
<i>Evento non sviluppato</i>	Costituisce un contributo alla probabilità di guasto. Il modello di struttura di quella parte del sistema non è dettagliato ulteriormente
<i>Gate AND</i>	Il guasto avviene se tutte le parti di quel sistema si guastano (parallelo)
<i>Gate OR</i>	Il guasto avviene se qualcuna delle parti di quel sistema si guasta (serie)
<i>Combinazione</i>	Il guasto avviene se un certo numero di parti si guastano (ridondanza parziale)
<i>Gate OR esclusivo</i>	Un guasto del sistema avviene soltanto se un solo specifico guasto delle parti si verifica
<i>Gate AND con priorità</i>	È una buona soluzione per rappresentare guasti secondari o per attivare sequenze di eventi
<i>INHIBIT</i>	Probabilità condizionata di accadimento dell'evento finale
<i>Trasferimento interno ed esterno</i>	Diagrammi a blocchi di affidabilità parziale, che è rappresentato in un altro diagramma del sistema complessivo

Si può dunque vedere da questo semplice schema riassuntivo come esista una possibilità di integrazione fra le varie tecniche e strumenti utilizzabili per analisi quantitative delle prestazioni RAMS dei sistemi complessi.

## 11.2 Regole fondamentali da considerare nella costruzione di un FT

La costruzione di un FT è un processo che è si evoluto in modo graduale su un arco di tempo di circa vent'anni. Sono state delineate alcune regole fondamentali, le quali costituiscono un supporto nel realizzare un corretto FT, che hanno reso il processo di costruzione sistematico e strutturato e, anche per questo motivo, facilmente traducibile in tool informatici dedicati.

Le regole possono essere così riassunte:

1. descrivere le informazioni che sono contenute nelle caselle rappresentanti gli eventi come guasti, definendo in modo preciso in che cosa consiste il guasto e le condizioni in cui questo si verifica (per esempio, il motore non funziona all'avvio quando è applicata l'alimentazione elettrica);

2. distinguere le avarie dei componenti da quelle del sistema (livelli di attribuzione);
3. se nel normale funzionamento di un componente, avviene la propagazione di una sequenza di guasto, allora si può assumere che il componente stia funzionando normalmente;
4. tutti gli input a un certo gate devono essere completamente definiti, prima di iniziare qualunque ulteriore analisi su ciascuno di loro;
5. gli input di un gate dovrebbero essere costituiti unicamente da eventi di guasto e non dovrebbero esistere connessioni dirette fra gate perché queste situazioni possono generare confusione.

## 11.3 Applicazione della FTA nella progettazione e nel successivo esercizio di un sistema

Come detto all'inizio, la versatilità della metodologia di analisi FT ne consente un impiego sia durante la fase di progettazione di un sistema complesso sia durante il suo esercizio.

Sebbene i principi generali utilizzati nella costruzione di alberi di guasto riferiti alle diverse fasi di vita di un sistema siano gli stessi, esistono alcune differenze nelle strategie utilizzate, negli obiettivi perseguibili e nel livello di dettaglio considerato, riconducibili proprio alle peculiarità delle singole fasi di vita di un sistema.

In generale si può [4] affermare che nella costruzione di un FT dedicato alla progettazione di un sistema, le specifiche di dettaglio o gli schemi definitivi non sono disponibili. Spesso è presente soltanto una macro descrizione delle funzioni di base e delle interfacce.

Anche con informazioni estremamente limitate, la FTA può essere utilizzata per realizzare un progetto basato sulle prestazioni, per esempio può essere considerato come obiettivo di progetto il valore massimo ammissibile della probabilità di accadimento di un top event; compito della progettazione sarà quello di configurare il nuovo sistema in modo che quel valore sia rispettato, attraverso un'allocazione di tali probabilità fra i vari eventi e sottosistemi costituenti il FT.

Nel caso una particolare prestazione obiettivo sia ottenibile con soluzioni progettuali differenti, sarà associata a ciascuna di queste alternative una misura della sua fattibilità.

Per la valutazione di un FT di progetto, all'interno del quale non siano disponibili dati specifici, vengono utilizzati dati ottenuti da librerie o da considerazioni basate sul principio di analogia con altri sistemi simili già realizzati.

La costruzione di un FT associato a un sistema in esercizio dovrebbe essere invece caratterizzata da una maggiore disponibilità di informazioni.

In questi casi l'obiettivo di una FTA è dato dalla possibilità di migliorare il sistema e/o di diagnosticarne le eventuali criticità presenti.

Una conoscenza dei valori di probabilità associati ai singoli eventi consente di selezionare soltanto gli elementi più critici costituenti il sistema; nella maggior parte dei casi i FT non sono sviluppati fino a un livello di dettaglio troppo elevato, questo a causa della frequente mancanza di dati quantitativi.

La FTA permette di evidenziare il livello di importanza associato ai vari elementi di un albero e può risultare anche interessante confrontare questa importanza con i

costi associati a tali voci, in modo da evidenziare situazioni di squilibrio gestionale; quindi, attraverso misure di importanza e valutazioni costi-benefici, è possibile giungere anche a una riallocazione delle risorse più corretta.

### 11.4 FTA: analisi qualitative e analisi quantitative

Supponiamo di considerare il caso di una missione aerospaziale.

Questa può essere suddivisa in tre fasi principali: lancio, orbita e rientro.

In questi casi uno degli obiettivi è costituito dalla modellizzazione del sistema durante le fasi evolutive della missione; infatti nel caso il sistema passi attraverso fasi differenti all'interno di una missione, allora dovrà essere modellato il guasto del sistema in ciascuna delle fasi individuate.

Passando da una fase all'altra i criteri di misurazione del successo della missione, così come la configurazione del sistema e i suoi confini, possono cambiare.

Allo scopo di avere una buona rappresentatività del modello, il comportamento a guasto del sistema, e quindi l'albero di guasto, dovrebbe essere contestualizzato per ogni singola fase specificandone caratteristiche e proprietà.

Nella costruzione dunque di un FT corrispondente a una certa fase, possono essere ignorate le altre fasi. Quando però si passa da una descrizione qualitativa del modello alla determinazione dei risultati quantitativi, associabili a ogni singola fase, non è più possibile prescindere dalla valutazione delle interazioni esistenti fra le differenti fasi.

Per esempio se esiste un evento all'interno del FT, che descrive il comportamento del componente risultato guasto in una certa fase, allora quel componente potrebbe essersi guastato in quella fase oppure in una precedente.

Quando si quantifica la probabilità di guasto di un componente in una certa fase, allora le probabilità di guasto del componente, in fasi precedenti, devono essere valutate allo stesso modo della probabilità di guasto nella fase in corso; in generale vi potranno essere tassi di guasto, criteri e tempi di riparazione differenti per uno stesso componente, all'interno delle differenti fasi.

Una corretta costruzione qualitativa del modello risulta comunque essenziale per passare a una successiva valutazione di tipo quantitativo.

### 11.5 L'analisi FT nel processo decisionale

Grazie all'uso di questa metodologia si possono recuperare molte informazioni utili in un processo decisionale.

Ripercorriamo a questo proposito i principali contributi [1] della FTA a tale processo.

- *Uso della FTA per la comprensione delle logiche di accadimento di un top event:* la FTA fornisce infatti un modello logico, di tipo grafico, che mostra le cause originali e gli eventi intermedi che determinano l'accadimento di un top event. Spesso i FT non sono limitati a un solo sistema ma ne attraversano i confini fisici, per questo motivo può risultare complesso riuscire a determinarne i limiti. Il modello che si costruisce evidenzia le combinazioni di eventi e guasti che porta-

no all'accadimento di un evento negativo. Gli MCS possono essere dunque organizzati e prioritizzati, secondo il numero di eventi coinvolti nel processo e a seconda della loro natura. Le informazioni qualitative, associate alla descrizione degli eventi intermedi e alle loro caratteristiche, rivestono un'importanza comunque paragonabile a quelle quantitative.

- *Uso della FTA per classificare i contributi che portano all'accadimento del top event:* una delle più importanti tipologie di informazioni risultanti da una FTA è costituita dall'ordinamento dell'importanza dei contributi all'accadimento del top event, contributi che possono essere espressi dalle loro cause. Associati a differenti applicazioni vi potranno essere diversi livelli di priorità. In generale soltanto a pochi eventi saranno riconducibili i contributi più importanti in termini di impatti sul sistema. Mediamente infatti soltanto il 10-20% degli eventi di base contribuisce in modo significativo alla probabilità di accadimento del top event. La determinazione di un ordine di priorità corrisponderà alla definizione di una priorità nell'utilizzo delle risorse, rendendo gli interventi coerenti con la loro importanza relativa rispetto all'evento finale.
- *Uso della FTA come strumento proattivo all'accadimento del top event:* la FTA è spesso utilizzata per porre in evidenza eventuali elementi di debolezza all'interno di un sistema. Tali aree critiche possono essere migliorate prima che si verifichi il top event. Ciò può essere fatto sia in fase di progettazione sia in fase di upgrading di un progetto esistente (attraverso il ricorso a interventi di manutenzione migliorativa e di manutenzione straordinaria). Fra le varie alternative di miglioramento ipotizzate, la FTA, grazie alla visione globale del sistema rispetto all'accadimento di un certo evento, consente di misurare la bontà di una soluzione rispetto a tutto il sistema, aiutando a determinare le migliori combinazioni costi-benefici.
- *Uso della FTA per il monitoraggio delle prestazioni di un sistema:* durante il monitoraggio delle prestazioni, rispetto a un top event, la FTA può tenere conto degli aggiornamenti nei dati relativi agli eventi di base, definendo andamenti e comportamenti nel tempo delle prestazioni monitorate, tenendo anche conto degli effetti di invecchiamento. L'aggiornamento delle informazioni può essere condotto anche per via automatica e in questo modo il fault tree può essere ri-analizzato con nuove informazioni sui difetti e sulle condizioni di guasto incipiente. Sulla base di questi dati, si possono individuare azioni utili a rendere l'apparecchiatura adeguata a contenere il rischio. Questo tipo di impiego della FTA è ampiamente diffuso nel settore nucleare.
- *Uso della FTA per minimizzare e ottimizzare le risorse:* attraverso la stima delle varie misure di importanza, si possono allocare le risorse in modo ottimizzato. Alla base di questo vi può anche essere una riduzione delle risorse utilizzate, mantenendo la stessa probabilità di accadimento del top event. In letteratura esistono applicazioni in cui a fronte di una riduzione del 40% delle risorse impiegate, il livello di rischio si è mantenuto costante o addirittura diminuito.
- *Uso della FTA come strumento di diagnostica per l'identificazione e correzione delle cause di un top event:* in questo caso la FTA a differenza di quanto detto circa il suo uso proattivo, è utilizzata quando il top event o alcuni eventi intermedi sono già accaduti. In base alle risultanze dell'analisi, sarà possibile stabilire al-

cune azioni correttive, e quindi la FTA può essere usata come strumento per valutare in modo oggettivo i benefici di tali azioni rispetto al ri-accadimento del top event. Ipotizzando lo stato di guasto di alcuni componenti, si possono in altri termini individuare le azioni utili a minimizzare gli effetti dei guasti. Tale approccio è denominato *analisi delle contingenze* e può per esempio essere utilizzato per stimare i tempi di down o di riparazione dei componenti, prima che si verifichi il top event.

## 11.6 Applicazione della metodologia FTA allo studio di un semplice sistema

La FTA è stata ampiamente impiegata per la valutazione della affidabilità e sicurezza di sistemi caratterizzati da una elevata complessità, soprattutto in ambito di diagnosi delle cause di guasto.

I campi [2] in cui questo metodo è stato maggiormente utilizzato sono quelli nucleare e aeronautico, e ciò anche grazie alla possibilità di valutare con questo metodo gli impatti sulla Human Safety. Se esiste un modo di guasto particolarmente critico, allora si rende necessario scoprire tutte le possibili catene di eventi che portano all'accadimento di quel guasto.

Nell'ambito petrolchimico viene data una notevole importanza agli aspetti di sicurezza legati alla tenuta delle tubazioni, in relazione alle quali i materiali utilizzati assumono un ruolo fondamentale e gli eventi di guasto hanno spesso ricadute molto importanti in termini di conseguenze. Supponiamo allora di considerare il seguente esempio di calcolo, in cui si analizza un sistema di tubazioni.

Tale sistema è costituito da 9 componenti con le probabilità di guasto indicate. La configurazione affidabilistica del sistema è riportata in Figura 11.2.

Il top event è dato in questo caso da una mancanza di flusso dal punto A al punto B. Il sistema è suddiviso in tre sezioni di tubazioni come riportato nella Figura 11.3.

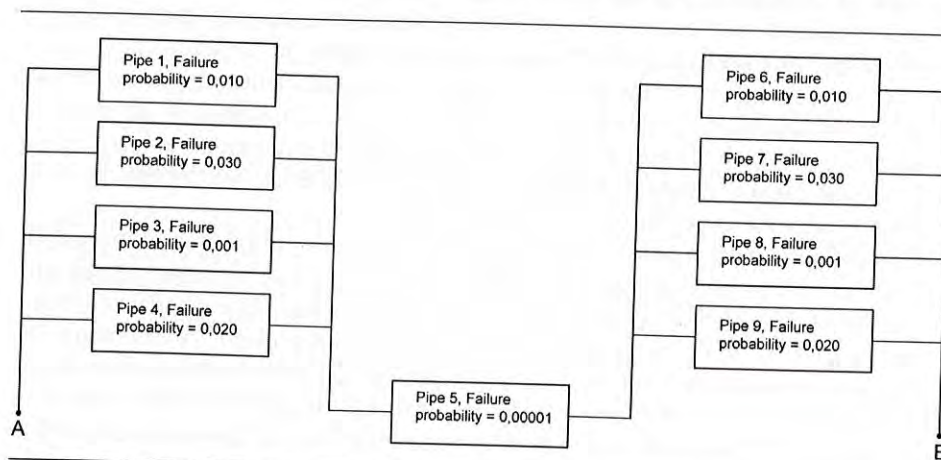


Figura 11.2 Esempio di impianto di distribuzione.

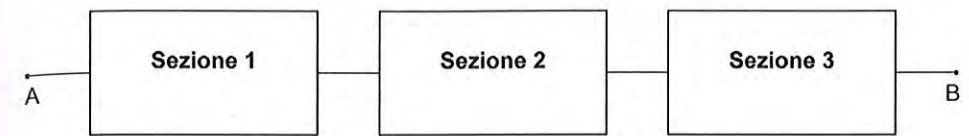


Figura 11.3 Sezione 1: pipe 1, 2, 3, 4. Sezione 2: pipe 5. Sezione 3: pipe 6, 7, 8, 9.

L'albero di guasto è riportato nella Figura 11.4 ed è costruito utilizzando gate OR e AND. Gli eventi che sono indicati nella figura, sono gli eventi di guasto.

La probabilità  $P_f$  di accadimento del top event, può essere determinata nel modo seguente (essendo  $P_i$  le probabilità di guasto delle varie tubazioni):

$$P_f = P[(P_1 \text{ AND } P_2 \text{ AND } P_3 \text{ AND } P_4) \text{ OR } (P_5) \text{ OR } (P_6 \text{ AND } P_7 \text{ AND } P_8 \text{ AND } P_9)]$$

La probabilità di accadimento del guasto della sezione 1  $P(S_1)$  può essere determinata a partire dalla assunzione che i guasti alle tubazioni siano indipendenti:

$$\begin{aligned} P(S_1) &= P[(P_1 \cap P_2 \cap P_3 \cap P_4)] = P(P_1)P(P_2)P(P_3)P(P_4) = \\ &= (0,010)(0,030)(0,001)(0,020) = 6 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

Analogamente, le probabilità di guasto delle sezioni 2 e 3 sono:

$$P(S_2) = 0,00001$$

$$P(S_3) = P(S_1) = 6 \times 10^{-9}$$

Adesso, la probabilità di accadimento del top event può essere determinata utilizzando le regole della teoria degli insiemi come:

$$\begin{aligned} P_f &= P[(S_1) \cup P(S_2) \cup P(S_3)] = P(S_1) + P(S_2) + \\ &+ P(S_3) - P(S_1)P(S_2) - P(S_1)P(S_3) - P(S_2)P(S_3) + P(S_1)P(S_2)P(S_3) \end{aligned}$$

Sostituendo i valori numerici delle singole probabilità di guasto si ottiene:

$$\begin{aligned} P_f &= (6 \times 10^{-9}) + 0,00001 + (6 \times 10^{-9}) - (6 \times 10^{-9})(0,00001) - (6 \times 10^{-9}) \\ &(6 \times 10^{-9}) - (0,00001)(6 \times 10^{-9}) + (6 \times 10^{-9})(0,00001)(6 \times 10^{-9}) = 0,0000100 \end{aligned}$$

che indica quindi la probabilità di accadimento del top event.

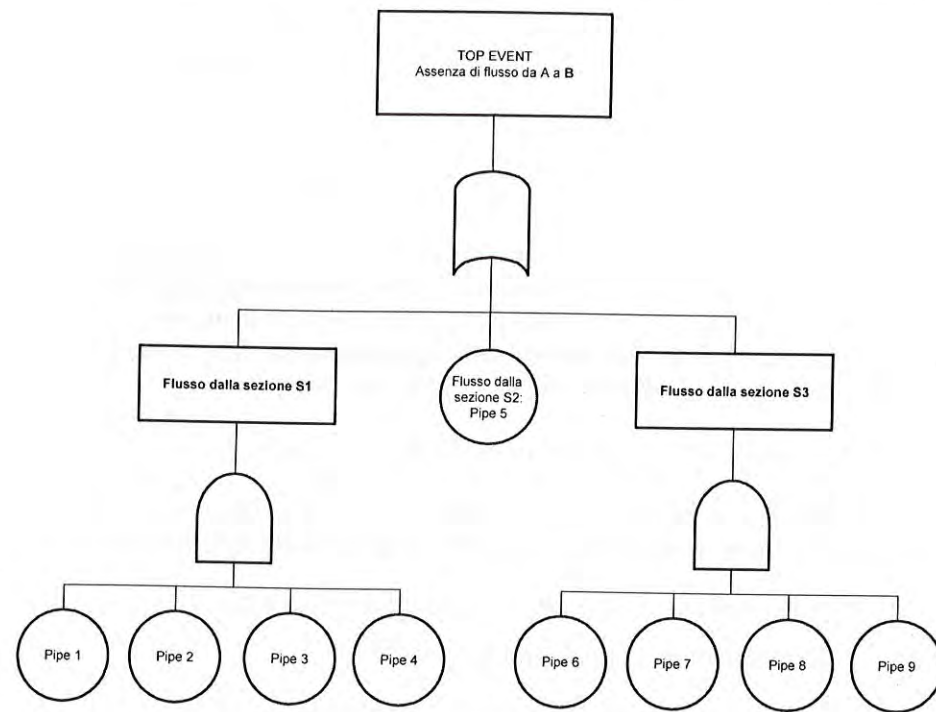


Figura 11.4 FT corrispondente all'impianto di distribuzione.

### 11.7 Un esempio di FTA utilizzando un tool di calcolo dedicato

Consideriamo ora l'applicazione della metodologia FTA allo studio di un serbatoio a pressione.

Il sistema analizzato è riportato nelle Figure 11.5 e 11.6: si tratta di un gruppo serbatoio, pompa motore, con dispositivi di controllo per il mantenimento delle condizioni di riempimento e pressione stabiliti. La funzione del dispositivo di controllo è di regolare le operazioni della pompa. Lo switch di pressione ha contatti che sono chiusi quando il serbatoio è vuoto. Quando è stata raggiunta la soglia di pressione, i contatti dello switch di pressione si aprono, togliendo energia al relay K2 così che il relay K2 si apre, togliendo energia alla pompa che di conseguenza si ferma. La valvola di uscita non è una valvola a rilascio di pressione [1].

La costruzione dell'albero di guasto del sistema è stata fatta ipotizzando quale top event la rottura del serbatoio, successiva all'avvio della pompa.

La risoluzione del problema può essere fatta con l'adozione di strumenti di calcolo, ampiamente diffusi sul mercato e che si possono trovare all'interno di pacchetti software per analisi RAMS dei sistemi complessi.

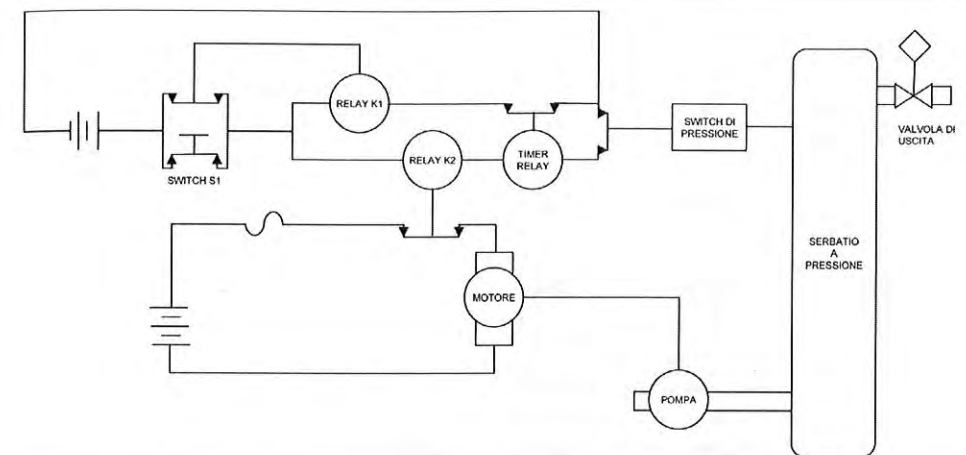


Figura 11.5 Schema impiantistico di un serbatoio in pressione (Fonte: NASA - Fault Tree Handbook with Aerospace Applications).

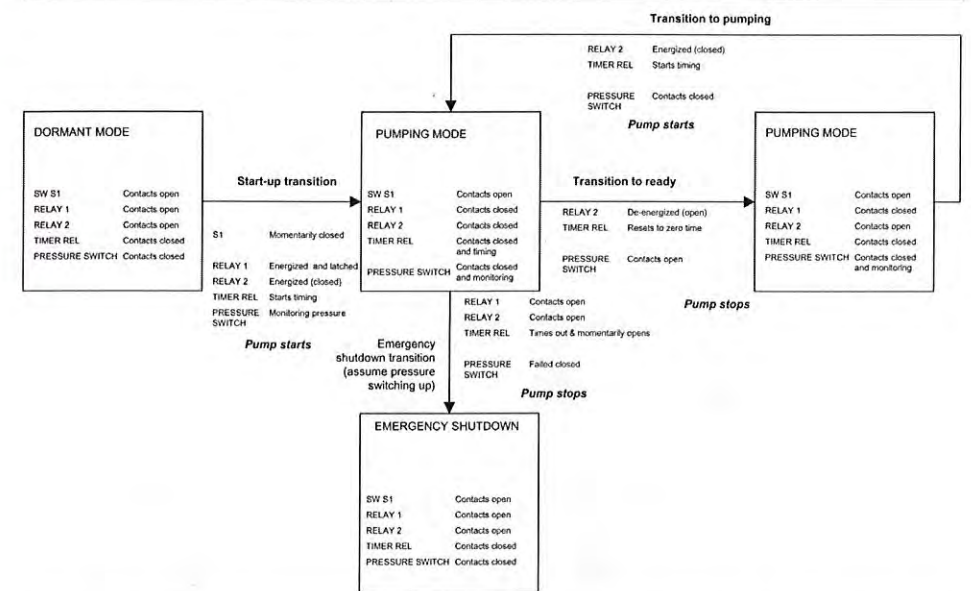


Figura 11.6 Modi di funzionamento del serbatoio in pressione (Fonte: NASA - Fault Tree Handbook with Aerospace Applications).

In Figura 11.7 viene riportato un esempio di rappresentazione del FT relativo allo schema di impianto di Figura 11.5, attraverso l'utilizzo di un strumento informatico.

Una volta eseguita la rappresentazione, il programma è in grado di effettuare tutti i calcoli utilizzando le regole per il calcolo della probabilità viste in precedenza e tenendo conto delle proprietà di ogni singolo gate ed evento.

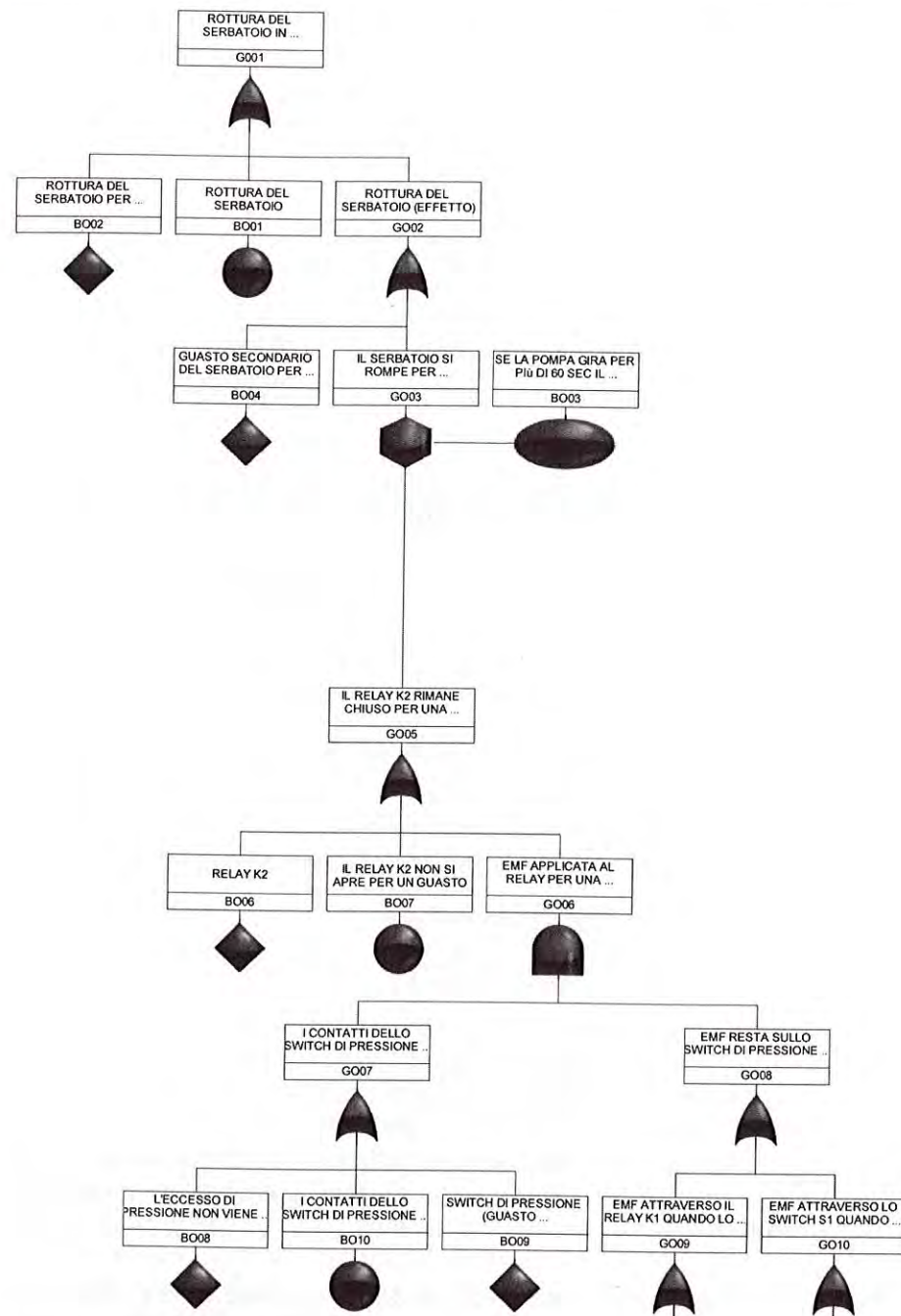


Figura 11.7 Esempio di parziale rappresentazione del FT associato alla rottura di un serbatoio in pressione utilizzando un tool informatico (Relax 7.6).

### 11.8 Event tree analysis - ETA

Parlando di FTA è interessante considerare anche la *Event Tree Analysis* (ETA), la quale presenta alcune caratteristiche distintive rispetto alla FTA.

L'analisi dell'albero degli eventi è un metodo utilizzato per studiare l'effetto di un evento iniziale rispetto al sistema. L'evento iniziale può essere rappresentato dal guasto di un componente all'interno del sistema o da un top event, come visto per gli alberi di guasto.

Possono dunque essere sviluppati molti scenari possibili, ciascuno dei quali può avere impatti sul sistema, che in certi casi possono dimostrarsi anche molto severi.

In particolare nell'analisi della affidabilità, è fondamentale identificare questi scenari, le loro probabilità di accadimento e i loro effetti sul sistema. In alcuni casi, un evento iniziale potrebbe avere intrinsecamente un impatto limitato, ma appena il suo accadimento è combinato con l'occorrenza di altri eventi il risultato può essere costituito da un impatto rilevante, fino a una possibile distruzione del sistema.

Questa metodologia è nata nell'ambito nucleare per poter effettuare una valutazione degli effetti di incidenti o di altri eventi negativi iniziali, sulla integrità dei reattori.

All'interno di un albero degli eventi, si possono individuare i rami che risultano poco significativi dal punto di vista delle loro probabilità di accadimento e/o di gravità delle conseguenze; tali rami in prima approssimazione possono essere trascurati.

Dopo avere completato la costruzione dell'albero, la probabilità associata a un ramo può essere determinata come il prodotto delle probabilità di tutti gli eventi lungo un ramo, così come mostrato nella Figura 11.8.

Rottura delle tubazioni	Potenza elettrica	Sistema di emergenza per il raffreddamento del core	Rimozione prodotto della fissione	Integrità del contenimento	Probabilità dei rami dell'albero	Conseguenze
Evento iniziale P(E)	Funzionante 1-P(E1)	Funzionante 1-P(E2)	Funzionante 1-P(E3)	Funzionante 1-P(E4)	$P(E)(1-P(E1))(1-P(E2))(1-P(E3))(1-P(E4))$	Rilascio molto contenuto di radiazioni
			Guasto P(E3)	Guasto P(E4)	$P(E)(1-P(E1))(1-P(E2))P(E3)P(E4)$	Rilascio contenuto di radiazioni
			Funzionante 1-P(E3)	Guasto P(E4)	$P(E)(1-P(E1))(1-P(E2))P(E3)P(E4)$	Rilascio medio di radiazioni
			Guasto P(E2)	Funzionante 1-P(E4)	$P(E)(1-P(E1))P(E2)(1-P(E3))(1-P(E4))$	Rilascio grande di radiazioni
			Guasto P(E3)	Guasto P(E4)	$P(E)(1-P(E1))P(E2)P(E3)P(E4)$	Rilascio grande di radiazioni
			Funzionante 1-P(E3)	Guasto P(E4)	$P(E)P(E1)(1-P(E2))(1-P(E3))P(E4)$	Rilascio molto grande di radiazioni
	Guasto P(E1)	Guasto P(E2)	Funzionante 1-P(E3)	Funzionante 1-P(E4)	$P(E)P(E1)(1-P(E2))(1-P(E3))(1-P(E4))$	Rilascio molto grande di radiazioni
			Guasto P(E3)	Guasto P(E4)	$P(E)P(E1)(1-P(E2))P(E3)P(E4)$	Rilascio molto grande di radiazioni
			Funzionante 1-P(E3)	Guasto P(E4)	$P(E)P(E1)(1-P(E2))P(E3)P(E4)$	Rilascio molto grande di radiazioni
			Guasto P(E3)	Funzionante 1-P(E4)	$P(E)P(E1)(1-P(E2))P(E3)(1-P(E4))$	Rilascio molto grande di radiazioni
			Funzionante 1-P(E3)	Guasto P(E4)	$P(E)P(E1)P(E2)(1-P(E3))(1-P(E4))$	Rilascio molto grande di radiazioni
			Guasto P(E3)	Funzionante 1-P(E4)	$P(E)P(E1)P(E2)P(E3)(1-P(E4))$	Rilascio molto grande di radiazioni

Figura 11.8 Esempio di Event Tree Analysis.

Alla base di questa modalità di calcolo vi è l'ipotesi di indipendenza degli eventi, la quale deve essere comunque verificata.

Le conseguenze di un evento richiedono una loro descrizione e quantificazione e in generale all'interno di un albero vi potranno essere più modalità di misurare le conseguenze, per esempio la quantificazione dei costi o anche delle vittime di incidenti.

A ogni ramo di un ET si può dunque associare un certo livello di rischio, il quale è dato dal prodotto fra la frequenza di accadimento e l'entità delle conseguenze.

$$\text{Rischio} = \text{Probabilità di accadimento} \times \text{Entità delle conseguenze}$$

Per ogni ramo si potrà dunque determinare un certo livello obiettivo di miglioramento, conseguibile con interventi di riduzione di uno dei due fattori o di entrambe.

### 11.9 Albero delle decisioni

Nei problemi di tipo ingegneristico è possibile effettuare una distinzione tra problemi mono-obiettivo e problemi multi-obiettivo.

La definizione di un sistema di supporto alle decisioni richiede tale distinzione. Nel caso di problemi multi-obiettivo, i vari obiettivi devono essere espressi nella stessa unità e devono essere assegnati i fattori di peso che possono essere utilizzati per una loro combinazione.

Successivamente le variabili decisionali richiedono una definizione e deve anche essere data una quantificazione dei loro range di valori accettabili. Le variabili decisionali possono anche essere di natura economica (soprattutto costi). I valori assunti poi da queste variabili possono essere considerati come una diretta conseguenza dell'aver preso determinate decisioni.

Infine devono essere definiti e individuati i risultati associabili alle decisioni, rappresentati da eventi che possono accadere proprio come conseguenza di una decisione presa. Tali eventi in natura sono casuali e un loro accadimento non può essere controllato del tutto in modo deterministico da chi deve prendere una decisione, quello che è possibile fare è associare a tali eventi una certa probabilità.

Ogni decisione sarà dunque caratterizzata sia da una probabilità di accadimento sia da una quantificazione anche economica delle conseguenze (per esempio il costo di un guasto non rilevato con una certa modalità di ispezione).

A partire quindi dalla logica di composizione degli ETA, si possono anche determinare gli alberi delle decisioni (*Decision Tree*), in cui a ogni ramo dell'albero sarà associata non soltanto la probabilità di accadimento di un certo evento ma anche una quantificazione delle conseguenze, ottenuta a partire dalla definizione del rischio associato a una particolare decisione.

### 11.10 Regole di calcolo

Dal momento che i metodi di FTA e ETA sono basati su alcune regole di teoria degli insiemi, può risultare utile riportare una tabella di riepilogo. L'applicazione di tali formule consente di determinare le probabilità di accadimento associate ai nodi degli

alberi. Spesso queste formule sono implementate all'interno di applicativi dedicati, come nell'esempio che abbiamo visto in precedenza.

(1a) $X \cap Y = Y \cap X$	$X \cdot Y = Y \cdot X$	
(1b) $X \cup Y = Y \cup X$	$X + Y = Y + X$	
(2a) $X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z$	$X \cdot (Y \cdot Z) = (X \cdot Y) \cdot Z$	
(2b) $X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z$	$X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$	
(3a) $X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$	$X \cdot (Y + Z) = X \cdot Y + X \cdot Z$	
(3b) $X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$	$X + (Y \cdot Z) = (X + Y) \cdot (X + Z)$	
(4a) $X \cap X = X$	$X \cdot X = X$	
(4b) $X \cup X = X$	$X + X = X$	
(5a) $X \cap (X \cup Y) = X$	$X \cdot (X + Y) = X$	
(5b) $X \cup (X \cap Y) = X$	$X + X \cdot Y = X$	
(6a) $X \cap X' = \phi$	$X \cdot X' = \phi$	
(6b) $X \cup X' = \Omega = 1$	$X + X' = \Omega = 1$	
(6c) $(X')' = X$	$(X')' = X$	
(7a) $(X \cap Y)' = X' \cup Y'$	$(X \cdot Y)' = X' + Y'$	TEOREMA DI DE MORGAN
(7b) $(X \cup Y)' = X' \cap Y'$	$(X + Y)' = X' \cdot Y'$	
(8a) $\phi \cap X = \phi$	$\phi \cdot X = \phi$	
(8b) $\phi \cup X = X$	$\phi + X = X$	
(8c) $\Omega \cap X = X$	$\Omega \cdot X = X$	
(8d) $\Omega \cup X = \Omega$	$\Omega + X = \Omega$	
(8e) $\phi' = \Omega$	$\phi' = \Omega$	
(8f) $\Omega' = \phi$	$\Omega' = \phi$	
(9a) $X \cup (X' \cap Y) = X \cup Y$	$X + X' \cdot Y = X + Y$	
(9b) $X' \cap (X \cup Y) = X' \cap Y = (X \cup Y)'$	$X' \cdot (X + Y) = X' \cdot Y = (X + Y)'$	

### Riferimenti bibliografici

- [1] NASA Office for Safety and Mission Assurance, *Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*, 2002.
- [2] B.M. Ayyub, R.H. McCuen, *Probability, statistics, & reliability for engineers*, CRC Press, New York 1997.
- [3] C. Smith, B.O'Connor, *Probabilistic risk assessment for the international space station*, Furtron, Washington, DC 2001.
- [4] USA Nuclear Regulatory Commission, *Fault Tree Handbook - NUREG 0492*, 1981.



## 12

## Catene e processi di Markov

Per molti anni le analisi condotte con i metodi di Markov sono state relegate ad applicazioni molto sporadiche, almeno per quanto riguarda le tematiche connesse alle prestazioni RAM.

L'introduzione nel mondo industriale dello standard IEC 61508 (*Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems*), ripreso più avanti nei suoi elementi più salienti, ha invece rivitalizzato l'interesse attorno a questa metodologia. A questo fattore si è aggiunta anche la possibilità di utilizzare strumenti informatici di calcolo.

Il nome di Markov viene particolarmente ricordato per studi condotti sulle cosiddette catene di Markov, ovvero sequenze di variabili casuali, nelle quali il valore futuro di una variabile viene determinato a partire da quello attuale, ma è indipendente da come siamo arrivati alla variabile attuale. Quella appena indicata costituisce l'ipotesi di Markov.

Molti eventi casuali sono influenzati da cosa è accaduto prima e, pertanto, non sono del tutto indipendenti.

L'analisi di Markov vede il modello come una sequenza di eventi e valuta la probabilità di passare da uno stato noto a uno stato logico successivo.

Esistono due metodi fondamentali di analisi secondo Markov: le già citate *catene* di Markov e i *processi* di Markov. La differenza fra i due sta nel fatto che mentre una catena di Markov assume valori discreti associati a un suo stato in un certo istante, un processo markoviano assume valori continui.

I processi markoviani sono ampiamente utilizzati nell'ambito delle analisi RAM, per due motivi principali [1]:

- la traduzione di un problema di affidabilità in termini di processo di Markov consente di superare in modo agevole le limitazioni di applicabilità dell'approccio combinatorio in presenza di componenti con guasti statisticamente dipendenti;
- sulla base dei dati raccolti si può ritenere che la maggior parte dei componenti elettronici ha una distribuzione nel tempo al guasto di tipo esponenziale negativa e, pertanto, i loro tassi di guasto risultano essere costanti nel tempo.

I modelli di Markov sono dunque utilizzati frequentemente negli studi di tipo RAM in cui eventi come un guasto o una riparazione possono accadere in qualunque istante.

Per un componente si possono individuare in generale almeno due stati, definiti come condizione di funzionamento e condizione di guasto; il comportamento del componente sarà caratterizzato dalla probabilità di transizione tra questi due stati o da quantità statistiche a esse equivalenti.

In generale per ogni componente si potrà individuare un vettore dei suoi stati possibili  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_n]$ .

Lo stato del sistema può poi cambiare nel tempo in seguito al verificarsi di eventi, i cambiamenti di stato dei singoli componenti, capaci ciascuno di far passare il sistema da un certo stato  $S_j$  a un altro stato  $S_i$ .

I cambiamenti di stato sono denominati *transazioni* e la loro successione cronologica, descrive l'evoluzione temporale del sistema ed è detta *traiettoria*.

Le funzioni statistiche che descrivono il passaggio da uno stato all'altro sono i tassi di transizione, funzione del tempo.

Lo stato di un sistema è dunque una variabile casuale, discreta, dipendente dalla variabile esplicativa tempo e per questo l'evoluzione di un sistema è caratterizzata da un processo stocastico.

Dato dunque che ogni transizione è un evento casuale, a ciascuna di esse si può associare una certa probabilità di accadimento. A partire da questa impostazione concettuale, viene formulata l'ipotesi che sta alla base della teoria markoviana secondo cui, la probabilità di transizione di un sistema da uno stato  $S_k$  a uno stato  $S_p$  nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ , condizionata all'essere in  $S_k$  all'istante iniziale  $t$ , dipende soltanto dagli stati  $S_k$  e  $S_p$  e non da come si è giunti allo stato di partenza  $S_k$ , il processo è cioè *memoryless*.

In altri termini un sistema senza memoria è caratterizzato dal fatto che il suo stato futuro dipende unicamente dal suo valore attuale.

Le probabilità di transizione, poiché dipendono dai due indici  $k$  e  $p$  (stato di partenza e stato di arrivo), sono raccolte nella matrice di transizione  $\Phi_{pk}$ , per la quale l'indice di riga  $p$  rappresenta lo stato di arrivo, mentre l'indice di colonna  $k$  rappresenta lo stato di partenza.

Tutti gli elementi della matrice, in quanto probabilità, sono compresi fra 0 e 1, e quindi  $\Phi_{pk}$  è una matrice non negativa.

Nell'ambito degli studi RAM sono da menzionare i processi semi-markoviani; si tratta di un modello probabilistico utile nell'analisi dei sistemi dinamici complessi. Il suo comportamento è analogo a quello di un puro modello di Markov. La differenza sta nel fatto che in un modello semi-markoviano i tempi di transizione e le distribuzioni di probabilità dipendono dall'istante in cui il sistema raggiunge lo stato attuale. Ciò implica che i tassi di transizione, in un particolare stato dipendono da quanto il sistema si trova in tale stato, ma non dipendono dal percorso che ha condotto allo stato attuale. Per questo motivo le distribuzioni di transizione, in un processo semi-markoviano, possono risultare non esponenziali.

È opportuno menzionare il caso di impiego della modellizzazione di un processo markoviano per la risoluzione di alberi di guasto di tipo dinamico. In tali casi infatti, le consuete modalità di calcolo, legate alla logica booleana e alla determinazione dei MCS (*Minimal Cut Set*), non risultano adeguati. Nel caso infatti di alberi di guasto

dinamici, i gate devono tenere conto non soltanto della probabilità di accadimento di un evento di input ma anche della sequenza secondo cui gli eventi accadono.

## 12.1 Una semplice applicazione di un processo di Markov

Supponiamo di voler determinare la risposta dello stato stazionario di un processo di Markov. Esistono almeno tre metodi [8] che possono essere impiegati per calcolare la risposta dello stato stazionario di un sistema:

1. iterazione sequenziale utilizzando la corrispondente relazione ricorsiva;
2. risoluzione del sistema di equazioni;
3. calcolo degli autovalori della matrice di transizione.

Focalizziamo l'attenzione sul primo dei metodi sopra elencati e consideriamo a questo proposito il seguente esempio.

**Esempio 12.1** Ogni anno 1/10 degli oggetti esterni a un sistema vi entra e 2/10 degli oggetti all'interno dello stesso sistema ne escono.

La relazione ricorsiva per gli stati successivi può essere espressa con due equazioni in cui  $x_n$  è il numero di oggetti all'interno del sistema nell'anno  $n$  e  $y_n$  è il numero di oggetti esterni al sistema nell'anno  $n$

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= x_n + \frac{1}{10}y_n - \frac{2}{10}x_n \\y_{n+1} &= y_n + \frac{2}{10}x_n - \frac{1}{10}y_n\end{aligned}$$

Si possono riscrivere le equazioni in forma di matrice

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 \\ 0.2 & 0.9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix}$$

Come si è già accennato la matrice di transizione di un processo Markoviano ha tre particolari proprietà:

1. gli elementi della matrice di transizione sono sempre positivi;
2. gli elementi di ciascuna colonna hanno sempre una somma pari a 1;
3. il processo di Markov converge con tasso geometrico verso una risposta dello stato stazionario  $((x_\infty, y_\infty))$ . Il tasso di convergenza è la somma degli elementi della diagonale meno 1 (nell'esempio considerato il tasso di convergenza del processo sarà pari a 0.7).

È possibile allora determinare lo stato del sistema  $(x_n, y_n)$  del processo di Markov per un qualsiasi anno  $n$  utilizzando la matrice di transizione e la distribuzione iniziale della popolazione  $(x_0, y_0)$ .

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = A^n \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$$

La risposta dello stato stazionario  $(x_\infty, y_\infty)$ , del sistema di Markov può essere determinato attraverso il calcolo del limite di  $(x_n, y_n)$  per  $n \rightarrow \infty$ .

Se adesso consideriamo una popolazione iniziale di 50 000 oggetti interni al sistema e di 50 000 oggetti usciti dal sistema, possiamo utilizzare la relazione ricorsiva per calcolare la distribuzione della popolazione negli anni successivi.

È importante notare che lo stato stazionario di un processo di Markov è funzione della relazione ricorsiva, ma è generalmente indipendente dalla distribuzione iniziale della popolazione (un'eccezione si verifica quando la popolazione totale è nulla, mentre la seconda eccezione a questo è riconducibile agli effetti dell'arrotondamento).

La Tabella 12.1 mostra i risultati associati alla applicazione di questa regola ricorsiva.

**Tabella 12.1** Convergenza del processo markoviano

Anno	Oggetti in ingresso	Oggetti in uscita	Anno	Oggetti in ingresso	Oggetti in uscita
0	50000	50000	15	33412	66588
1	45000	55000	16	33389	66611
2	41500	58500	17	33372	66628
3	39050	60950	18	33360	66640
4	37335	62665	19	33352	66648
5	36135	63866	20	33347	66653
6	35294	64706	21	33343	66657
7	34706	65294	22	33340	66660
8	34294	65706	23	33338	66662
9	34006	65994	24	33337	66663
10	33804	66196	25	33336	66664
11	33663	66337	26	33335	66665
12	33564	66436	27	33334	66666
13	33495	66505	28	33334	66666
14	33446	66554	29	33334	66666

La Tabella 12.1 mostra anche che la popolazione converge allo stato stazionario  $(x_\infty = 33334, y_\infty = 66666)$ , dopo 27 anni.

## 12.2 Un ulteriore esempio di calcolo

Un sistema produttivo è costituito da una sola macchina che lavora un pezzo per volta e ha un tempo di lavorazione distribuito secondo una esponenziale con parametro  $p$ .

Un tempo di setup è richiesto tra due lavorazioni consecutive e anche tale tempo ha distribuzione esponenziale con parametro  $s$ .

La macchina è soggetta a guasti e il tempo tra due guasti è descrivibile con una variabile distribuita esponenzialmente con parametro  $f$ .

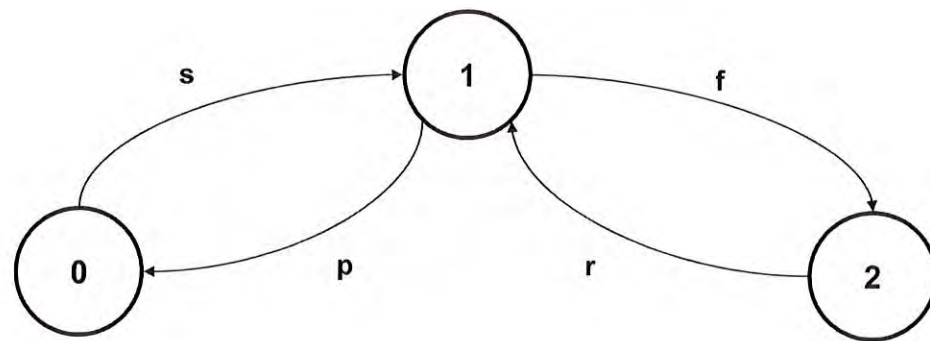


Figura 12.1 Schematizzazione degli stati della macchina.

La macchina guasta viene immediatamente riparata e anche il tempo di riparazione è distribuito secondo un esponenziale con parametro  $r$ .

Lo stato del sistema assume valori nell'insieme  $\{0,1,2\}$ , interpretabile nel modo seguente:

- 0: macchina in fase di set-up;
- 1: macchina in fase di lavorazione;
- 2: macchina in fase di riparazione.

Il sistema produttivo considerato può essere gestito, a fronte di un guasto, con due diverse politiche: in un primo caso la macchina riparata riprende la lavorazione del pezzo che stava lavorando prima del guasto (*resume policy*), nell'altro caso, la macchina riprende la lavorazione da un pezzo nuovo (*discard policy*).

Nei due casi si ottengono due catene diverse, la cui analisi può fornire criteri di valutazione delle due politiche.

Il grafo corrispondente al caso di *resume policy* è quello di Figura 12.1.

La matrice di transizione avrà la forma:

$$Q = \begin{pmatrix} -s & s & 0 \\ p & -(p+f) & f \\ 0 & r & -r \end{pmatrix}$$

È possibile trovare il vettore delle probabilità di stato a regime risolvendo il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} p_0s = p_1p \\ p_1(p+f) = p_0s + p_2r \\ p_2r = p_1f \\ p_0 + p_1 + p_2 = 1 \end{cases}$$

dalla cui risoluzione risultano le seguenti espressioni delle probabilità di stato a regime:

$$p_0 = \frac{pr}{pr + rs + fs}$$

$$p_1 = \frac{rs}{pr + rs + fs}$$

$$p_2 = \frac{fs}{pr + rs + fs}$$

### 12.3 Criteri di modellizzazione di un sistema attraverso le catene di Markov

Consideriamo il caso di un sistema caratterizzato da un componente attivo e da un secondo componente di riserva, con uno switch di commutazione dall'uno all'altro (Figura 12.2).

Supponiamo che il guasto dello switch sia tale per cui, quando questo avviene, lo switch non sia in grado di commutare da un componente all'altro. Il guasto del commutatore è critico soltanto quando è richiesta una commutazione dal componente attivo a quello di riserva. Se il commutatore si guasta successivamente al guasto del componente attivo, e quindi è già avvenuta la commutazione sulla riserva, allora il sistema continua a operare regolarmente. Nel caso in cui invece il commutatore si guasta prima che il componente attivo si sia guastato, allora l'unità di riserva non può essere commutata e dunque al guasto del componente attivo corrisponde anche il guasto del sistema.

Questo semplice esempio serve a dimostrare come l'ordine degli eventi può determinare se il sistema continua o meno a funzionare.

Possiamo allora costruire un modello di Markov, corrispondente a tale situazione; come noto i cerchi rappresentano gli stati e gli archi rappresentano gli eventi che causano transizioni fra gli stati. Gli archi sono etichettati con il valore del tasso di transizione (in genere coincide con il tasso di guasto del componente guasto). Il tasso di guasto di un componente attivo è  $\lambda_p$  mentre  $\lambda_s$  è il tasso di guasto del commutatore (Figura 12.3).

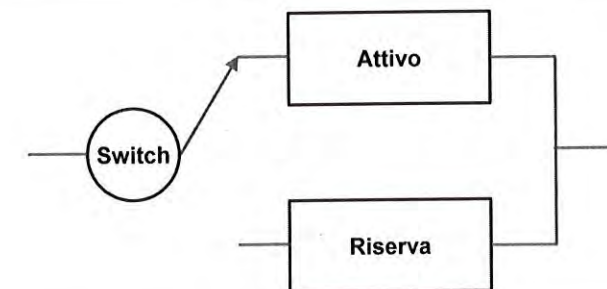


Figura 12.2 Esempio di sistema con commutazione.

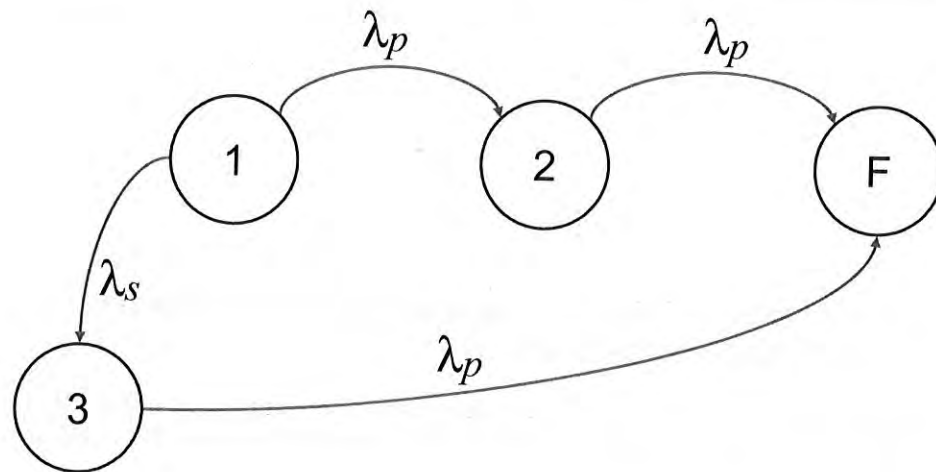


Figura 12.3 Catena di Markov per il sistema schematizzato in Figura 12.1

Nello stato 1 commutatore, componente attivo e componente di riserva sono funzionanti; le due transizioni dallo stato 1 rappresentano il guasto del componente attivo, che porta allo stato 2 e il guasto del commutatore che porta allo stato 3. Nello stato 2, è avvenuta una commutazione alla riserva. Dallo stato 3, il guasto al componente attivo porta allo stato di guasto del sistema F.

Una catena di Markov è equivalente a un insieme di equazioni differenziali, con una equazione corrispondente a ogni stato; infatti associata a ciascuno stato vi è una variabile di stato, la quale rappresenta la probabilità, variabile nel tempo, che il sistema si trovi in quello stato esclusivo (ogni stato cioè esclude gli altri).

Le equazioni differenziali associate alla catena dell'esempio precedente sono:

$$\frac{d}{dt} P_1(t) = -(\lambda_p + \lambda_s) P_1(t)$$

$$\frac{d}{dt} P_2(t) = -\lambda_p P_2(t) + \lambda_p P_1(t)$$

$$\frac{d}{dt} P_3(t) = -\lambda_p P_3(t) + \lambda_s P_1(t)$$

$$\frac{d}{dt} P_F(t) = -\lambda_p P_2(t) - \lambda_p P_3(t)$$

assumendo che lo stato iniziale all'istante 0 è lo stato 1 e quindi  $P_1(0) = 1$  e  $P_i(0) = 0$  se  $i \neq 1$ .

La soluzione delle equazioni differenziali sopra riportate porta a determinare:

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_p + \lambda_s)t}$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} (e^{-\lambda_p t} - e^{-(\lambda_p + \lambda_s)t})$$

$$P_3(t) = e^{-\lambda_p t} - e^{-(\lambda_p + \lambda_s)t}$$

$$P_F(t) = 1 - \frac{\lambda_p + \lambda_s}{\lambda_s} e^{-\lambda_p t} + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} e^{-(\lambda_p + \lambda_s)t}$$

La affidabilità del sistema con riserva è data dalla probabilità  $(1 - P_F)$  che il sistema non si trovi nello stato di guasto:

$$R(t) = -\frac{\lambda_p + \lambda_s}{\lambda_s} e^{-\lambda_p t} + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} e^{-(\lambda_p + \lambda_s)t}$$

Dal momento che la modellizzazione di un sistema secondo l'approccio di Markov può generare tutti i possibili stati di un sistema, il numero di stati può essere estremamente numeroso, anche per sistemi di piccola entità. Per questo motivo, è necessario utilizzare una serie di tecniche di riduzione, le quali possono essere applicate per circoscrivere in modo significativo il numero di stati, mantenendo al tempo stesso l'accuratezza e completezza del modello. Per esempio, se consideriamo un sistema composto da 10 componenti, ciascuno dei quali ha almeno due stati possibili (guasto o funzionante), il numero complessivo degli stati possibili diventa  $2^{10} = 1024$ .

Un approccio è legato al principio secondo cui gli stati che rappresentano livelli multipli di guasto contribuiscono in modo trascurabile alla probabilità complessiva di guasto del sistema; il modello dunque può essere limitato a un particolare livello di guasto, combinando tutti gli stati al di sotto di tale livello in un unico stato di guasto.

Se per esempio si vuole troncare al livello  $n$ -esimo, tutte le transizioni di stato dal livello  $n - 1$  dovrebbero essere aggregate a un solo ordine  $n$ -esimo di stato di guasto.

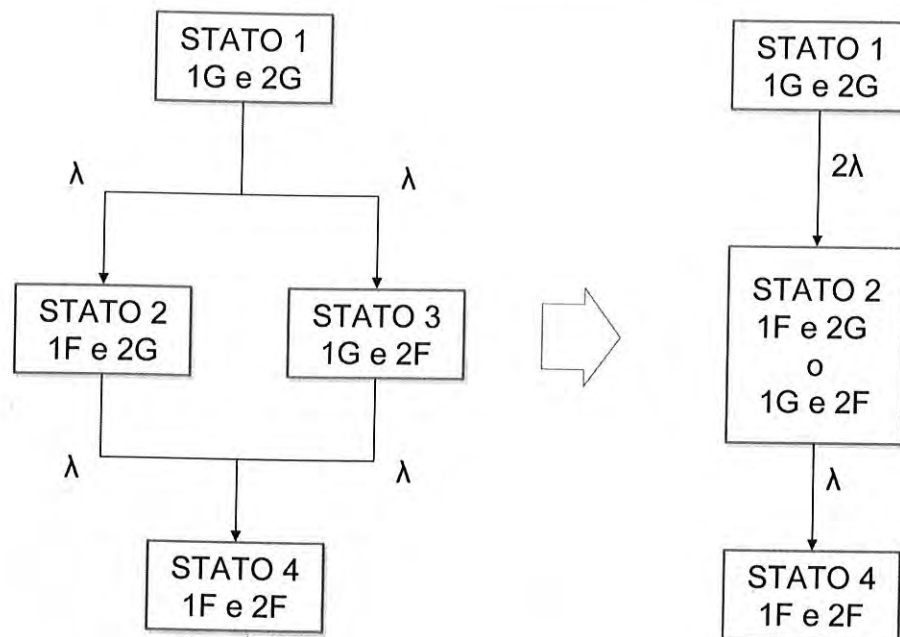
Nell'effettuare questi troncamenti bisogna fare attenzione a non rendere l'analisi poco realistica.

Per capire questo approccio si può considerare il caso di un sistema a due canali [6], ciascuno dei quali può avere due stati. Supponiamo che ogni canale abbia tasso di guasto  $\lambda$ . Entrambi i canali sono attivi, quindi se uno dei due si guasta, l'altro funziona.

Dal momento che il guasto sia di un canale sia dell'altro comporta gli stessi effetti, ovvero funzionamento di un solo canale, i due stati corrispondenti possono essere combinati.

Inoltre, poiché l'impatto sul sistema è lo stesso indipendentemente da quale canale si guasta per primo, e dal momento che i tassi di guasto sono gli stessi, è possibile fare una riduzione senza perdere in accuratezza.

Quanto detto è riportato in Figura 12.4.



G: good  
F: failed

Figura 12.4 Un esempio di riduzione per un sistema composto da due canali uguali.

Un'altra tecnica di riduzione prevede la divisione di eventi di livello più alto, per il quale si vuole determinare la probabilità di guasto, in  $n$  sotto-eventi, ciascuno dei quali è modellato separatamente. Le probabilità associate a ogni sotto-evento sono dunque combinate per ottenere la probabilità dell'evento di livello più alto. Se dunque l'evento di livello massimo, contenente dieci elementi, è diviso in due sotto-eventi, ciascuno dei quali contiene cinque elementi, il sistema può essere descritto con due modelli, ciascuno con 32 possibili stati ( $2^5$ ); quindi 64 stati a fronte di 1032.

Se l'evento di livello più alto, ha una probabilità  $P$  e i due sottoeventi hanno rispettivamente probabilità  $P_1$  e  $P_2$ , la probabilità  $P$  può essere determinata come  $P = f(P_1, P_2)$ .

### 12.4 Vantaggi e svantaggi connessi all'uso dell'analisi markoviana

Le analisi RAMS condotte con i metodi della teoria di Markov possono risultare molto utili.

Tale approccio è particolarmente valido in quei casi in cui i componenti di un sistema presentano dipendenze e relazioni molto forti.

Altri metodi invece, come per esempio la FTA, spesso assumono la totale indipendenza fra componenti, di conseguenza se utilizzati in modo isolato questi metodi possono in alcuni casi portare a conclusioni e previsioni ottimistiche circa la affidabilità e sicurezza del sistema oggetto di studio [7].

I principali vantaggi connessi all'uso della metodologia di Markov rispetto alle altre tecniche impiegate nelle analisi RAMS possono essere così riepilogati:

1. i modelli sono facilmente generabili, sebbene essi richiedano una maggiore conoscenza di tipo matematico-statistico;
2. la riconfigurazione del sistema, connessa all'analisi dei guasti, può essere facilmente introdotta nel modello generato;
3. i guasti coperti e/o scoperti che si verificano sui componenti, sono eventi mutualmente esclusivi e possono essere rappresentati con un approccio markoviano a differenza di quanto si può fare con le altre tecniche;
4. esistono molte tecniche di riduzione della complessità di un sistema senza, al tempo stesso, ridurre la rappresentatività del modello;
5. spesso un analista è interessato a determinare la probabilità di accadimento di un evento risultante da altri sotto-eventi, e anche questo tipo di problema può essere risolto con Markov.

Il più grande svantaggio associabile a un approccio markoviano è legato al fatto che per sistemi molto complessi, nei quali si ha un numero elevatissimo di stati possibili, i diagrammi tendono a divenire ingestibili, complicati e caratterizzati da tempi di risoluzione molto lunghi.

### 12.5 Analisi di Markov, standard internazionali

Esistono due standard di maggiore rilievo, che fanno riferimento all'approccio markoviano. Essi sono lo IEC 61165 e lo IEC 61508. La normativa IEC 61165 fornisce le linee guida per l'applicazione delle tecniche di studio di Markov alle analisi affidabilistiche. La normativa IEC 61508 ha come primario obiettivo quello di stimare per un sistema critico analizzato, la probabilità di accadimento di un guasto e inoltre ha accresciuto l'interesse verso le analisi markoviane, conseguentemente al fatto di poter prevedere molti stati possibili associati a un certo componente o a tutto il sistema. Quest'ultima normativa è suddivisa in 7 parti.

Nella Tabella 12.2, è riportato un breve prospetto riassuntivo delle due normative menzionate.

Tabella 12.2 Sezioni delle norme IEC61165 e 61508

Titolo	Descrizione
IEC 61165 - Applicazione delle tecniche di Markov	Questa normativa fornisce le linee guida per la applicazione delle tecniche di analisi markoviana applicata alla affidabilità dei sistemi. Vi sono riferimenti a molti metodi analitici distinti (la normativa IEC 300-3-1 fornisce poi una visione generale di gran parte di tali tecniche e delle loro caratteristiche generali).

(segue)

(continua)

IEC 61508/1 - Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici/elettronici/programmabili - Requisiti generali	Questo documento mostra un approccio generico per tutte le attività legate alla sicurezza, su tutto il ciclo di vita di un sistema, che riguardano dispositivi elettrici/elettronici/programmabili utilizzati per le funzioni di sicurezza.
IEC 61508/2 - Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici/elettronici/programmabili - Requisiti specifici per dispositivi elettrici/elettronici/programmabili legati ai sistemi di sicurezza	Le indicazioni fornite nella parte 1 della normativa sono contestualizzate.
IEC 61508/3 - Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici/elettronici/programmabili - Requisiti software	Questo documento viene applicato a qualsiasi software che fa parte di un sistema di sicurezza, o utilizzato per sviluppare un sistema di sicurezza. Esso fornisce i seguenti requisiti per: a) fasi e attività legate al ciclo di vita della funzione sicurezza b) informazioni relative alla validazione della sicurezza software c) preparazione di informazioni e procedure relative al software d) per essere utilizzato dall'organizzazione che produce modifiche ai software legati alla sicurezza e) supporto agli applicativi.
IEC 61508/4 - Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici/elettronici/programmabili - Definizioni e acronimi	Questo documento contiene acronimi e definizioni relative alle parole contenute nelle 7 parti della normativa.
IEC 61508/5 - Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici/elettronici/programmabili - Esempi di metodi usati per la determinazione del livello di integrità della sicurezza	Questo documento fornisce informazioni sui concetti di rischio e sulle relazioni rischio - sicurezza. È utilizzato come guida per lo sviluppo di progetti di riduzione del rischio.
IEC 61508/6 - Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici/elettronici/programmabili - Linee guida per l'applicazione della normativa IEC 61508 - 2 e 3	Questo documento contiene informazioni sulle linee guida per la applicazione delle parti 2 e 3 della normativa.
IEC 61508/7 - Sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza elettrici/elettronici/programmabili - Riepilogo di tecniche e misure	Questo documento contiene un riepilogo delle varie tecniche e misure di sicurezza relativamente alle parti 2 e 3 della normativa.

## 12.6 Applicabilità dell'analisi markoviana

L'analisi markoviana prevede una gamma di strumenti e mezzi molto ampia, in particolare per quei sistemi che mostrano dipendenze molto complesse fra i loro elementi costituenti.

Questo approccio, di fatto estremamente versatile dal punto della rappresentatività di un sistema, ha però un inconveniente dato dalla complessità che può assumere

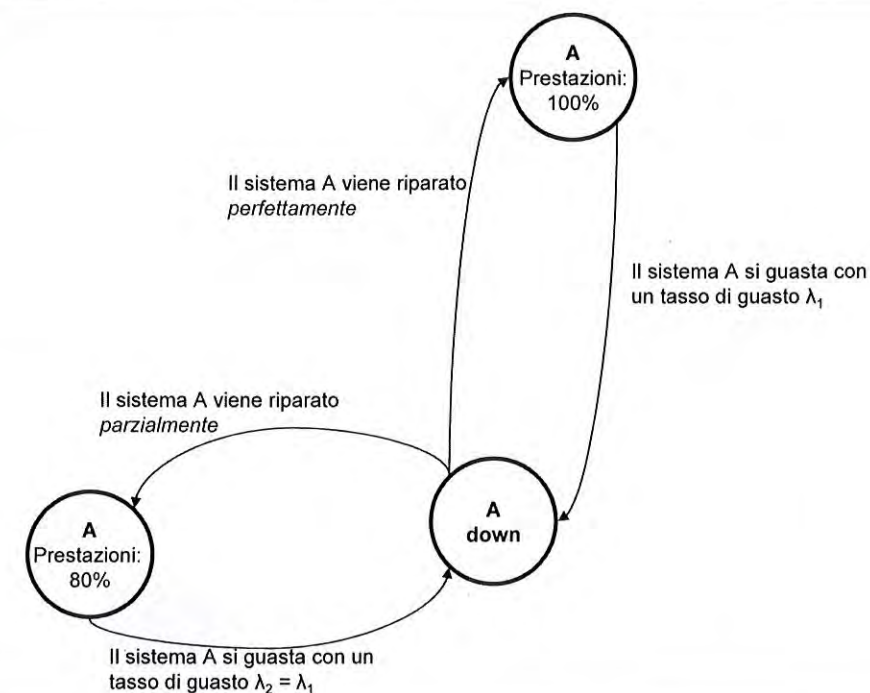


Figura 12.5 L'analisi markoviana consente di rappresentare stadi intermedi in cui si possono avere prestazioni ridotte di un sistema.

il modello, soprattutto quando questo sia riferito a una realtà composta da molti elementi eterogenei.

Se da un lato gli strumenti informatici di supporto consentono di eseguire calcoli anche molto onerosi, in tempi ragionevolmente brevi, dall'altro si manifesta una difficoltà durante la fase di costruzione del modello, dovuta proprio alla numerosità di stati e transizioni che devono essere tracciati.

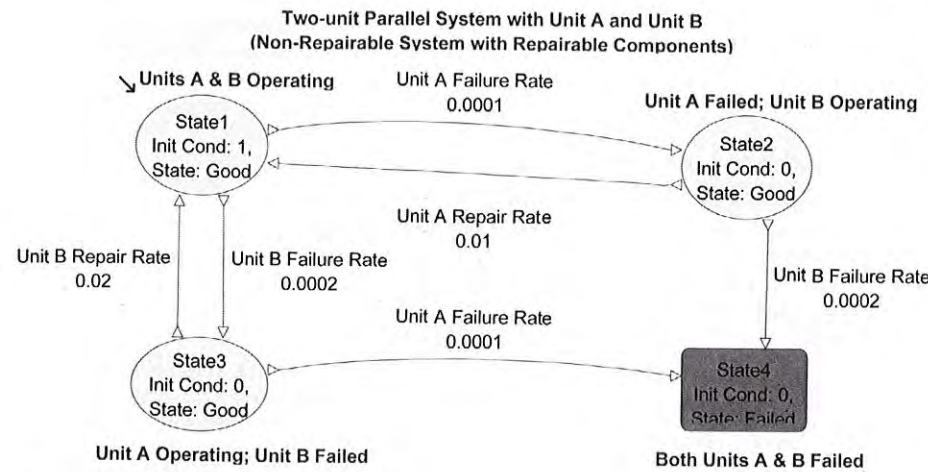
L'applicabilità di questo metodo è dunque maggiormente riferibile a sistemi non troppo estesi, al cui interno sia però possibile evidenziare alcune forti dipendenze fra gli oggetti e i loro stati, e per i quali sia comunque richiesta una valutazione molto precisa e puntuale dell'evoluzione del sistema.

I modelli di Markov sono particolarmente utili nel caso si vogliano analizzare sistemi riparabili o sui quali sono previste attività di ispezione o diagnostica e portano alla determinazione di misure quantitative di grandezze di interesse, quali la disponibilità.

Una rappresentazione interessante che può essere fatta con un modello di Markov è quella relativa allo svolgimento di attività di manutenzione di tipo minimale, per esempio gli interventi tampone, che vengono comunemente effettuati su impianti o macchine, in modo da rendere più rapido il riavvio del sistema, rinviando l'intervento completo a un istante in cui la macchina possa per esempio essere resa accessibile, o in cui vi sono le parti di ricambio necessarie (Figura 12.5).

È stato osservato che componenti che sono sottoposti a interventi di riparazione parziali (interventi tampone) non hanno un tasso di guasto costante, ma esso risulta essere costante su un certo intervallo di tempo (andamento a gradino).

Si può dunque affermare, come già accennato, che in un modello di Markov è possibile introdurre il concetto di degrado delle prestazioni, anche esso rappresentabile come una sequenza ordinata di stati successivi.



-- Markov Calculation Results -  
MTTF: 345000,

-- Results at time 1000,00 --  
Reliability: 0,997337  
Unreliability: 0,002663

**Markov Calculation Results**

File Name: Sample Relex Protect.RPJ  
Configuration: Sample Markov #1  
MTBF: 345000.00  
MTTR:

Results At: 1000.00  
Reliability: .99733738  
Availability:  
Unreliability:  
Unavailability: .00266262  
Failure Frequency:

Time	Reliability	Availability	Unreliability	Unavailability	Failure Frequency
.00	1.00000000		.00000000		
100.00	.99987128		.00012872		
200.00	.99962914		.00037086		
300.00	.99935909		.00064091		
400.00	.99907085		.00092915		
500.00	.99878315		.00121685		
600.00	.99849429		.00150571		
700.00	.99820509		.00179491		
800.00	.99791581		.00208419		
900.00	.99762695		.00237344		
1000.00	.99733738		.00266262		

**Markov States Report**

Calculation Start Time: .00  
Calculation End Time: 1000.00

File Name: Sample Relex Protect.RPJ  
Configuration: Sample Markov #1

Figure ID	State Name	Initial Condition	State	Output State	Output Rate	Output Description
5	State 1	1.00	Good	State 2	.00010000	A Failure Rate
6	State 2	.00	Good	State 3	.00020000	B Failure Rate
7	State 3	.00	Good	State 1	.01000000	A Repair Rate
8	State 4	.00	Failed	State 1	.00020000	B Failure Rate
				State 4	.00010000	A Repair Rate

Figura 12.6 Un esempio di risoluzione dei modelli markoviani con strumenti informatici (Fonte: RelexSoftware).

Ricordiamo che l'approccio markoviano è memoryless, in quanto come si è visto la determinazione dello stato successivo è legata unicamente allo stato attuale e non al come si è giunti in questo stato; questo aspetto concettuale in un certo senso si adatta bene anche a una realtà caratterizzata da una mancanza di dati storici e di modelli evolutivi relativi a tutto quello che è già avvenuto.

Prima comunque di applicare questo metodo analitico per lo studio di un sistema, deve essere sempre effettuata una verifica della ipotesi di Markov, perché se questo non venisse fatto si potrebbero ottenere risultati a partire da un modello che risulta non validato e non corrispondente alla situazione reale.

Si può infine notare come a volte l'impostazione di una analisi RAMS più corretta sia data da una combinazione di più metodi, per esempio i modelli di Markov possono essere utilizzati per analizzare sotto-sistemi più piccoli con forti dipendenze che richiedono valutazioni accurate. Successivamente altre tecniche di analisi, come per esempio la FTA, possono essere impiegate, per valutare il sistema globale utilizzando modalità più semplici di calcolo probabilistico.

**Riferimenti bibliografici**

- [1] T. D'Alessio, G. Meucci, R. Somma, *I metodi dell'affidabilità*, Franco Angeli, Milano, 1987.
- [2] W.R. Gilks, S. Richardson, D.J. Spiegelhalter, *Markov Chain Monte Carlo in practice*, Chapman & Hall/CRC, London, 1998.
- [3] E. Hugues, E. Carpentier, *Application of Markov processes to predict aircraft operational reliability*, 3<sup>rd</sup> European Systems Engineering Conference, Toulouse, 2002.

- [4] J. Van Casteren, *Power System Reliability Assessment using the Weibull - Markov Model*, 2001.
- [5] USA Department of Defense - RAC, START 2003 - 2, *The applicability of Markov analysis methods to Reliability, Maintainability and Safety*, volume 10.
- [6] D. Jinhua, O. Erland, *Availability Analysis for high voltage synchronous motor based on Markov model*, Malardalen University, Sweden 2001.
- [7] N. Fuqua, "Markov Analysis", *The Journal of the Reliability Analysis Center*, 3Q/2003.
- [8] "Tessix", Nanochron LLC, 2003.

# 13

## Reti neurali

Negli ultimi tempi si è assistito, in campo industriale, alla nascita di un vivo interesse nei confronti dei sistemi di processo delle informazioni di tipo *soft-computing*. Con tale espressione vengono indicate tutte quelle metodologie di trattamento dei dati che si basano su algoritmi che non si limitano semplicemente a elaborare le informazioni che ricevono bensì creano altri algoritmi e procedure adatti a questo compito.

In pratica, in una visione molto semplicistica dell'argomento ma adatta a introdurre il concetto di *soft-computing*, si può parlare di meta-algoritmi in grado di generare gli algoritmi necessari al trattamento dei dati che a essi vengono sottoposti.

Il *soft-computing* è a ragione ritenuta una branca di quell'interessantissimo campo di ricerca che si occupa della intelligenza artificiale.

Sono tre le strade principali che si seguono nel *soft-computing*:

- la *fuzzy logic*;
- gli *algoritmi genetici*;
- le *reti neurali*.

La *fuzzy logic*, o *logica sfumata* come si è visto, altro non è che un ampliamento della logica classica. Mentre in quest'ultima un elemento può solamente appartenere o no a un insieme, nella *fuzzy logic* viene introdotto il grado di appartenenza di un elemento a un insieme, per cui è possibile trovare asserzioni del tipo: "L'elemento  $x$  possiede un grado di appartenenza 0,34 alla classe A e un grado di appartenenza 0,56 alla classe B". In questa logica vengono quindi ampliati i concetti di intersezione e unione di insiemi fino a rivedere in questa chiave tutti i teoremi della logica classica e a stilare di nuovi. Il suo obiettivo è di trarre relazioni da dati che possiedono una incertezza di fondo ed estrarne le informazioni che comunque possiedono.



Gli *algoritmi genetici* si utilizzano per l'ottimizzazione. Creando un algoritmo parametrizzato per trovare l'ottimo di una funzione e svariate stringhe di parametri casuali, si fa "girare" l'algoritmo con i parametri di ognuna delle stringhe e si selezionano le stringhe che hanno raggiunto i migliori risultati, eliminando le altre. A questo punto vengono fatte riprodurre le stringhe vincenti con un *cross-over* genetico (da cui il nome). Ossia, si crea un nuovo insieme di stringhe frutto del mescolamento degli elementi delle stringhe vincenti insieme con una modesta quantità di stringhe casuali. Si selezionano nuovamente le stringhe che raggiungono il miglior risultato e se ne ottengono di nuove dal loro "accoppiamento". Il processo si itera sino a trovare la stringa "evoluzionisticamente adatta" a risolvere il problema.

Le *reti neurali* in certo qual modo imitano il comportamento del cervello umano e il loro funzionamento può essere spiegato alla luce di due teoremi i quali affermano che 1) le reti neurali approssimano qualunque funzione lineare e non, purché continua [Kolmogorov] e che 2) le reti neurali approssimano qualunque funzione continua e la sua funzione derivata [Cybenko]. In tal modo le reti neurali possono essere considerate come "approssimanti" universali.

Le reti neurali sono sistemi adattivi che imparano a risolvere il problema che viene loro posto dopo un adeguato periodo di addestramento. Si sono sviluppate di pari passo con le ricerche in campo fisiologico del cervello umano. Le prime reti neurali altro non erano che modelli matematici del comportamento, a livello di attività sinaptica e quindi di trasmissione di informazioni, dei neuroni biologici. La ricerca sulle reti neurali si è poi svincolata dalla sua indagine in campo fisiologico (che comunque prosegue) e ha cominciato ad abbracciare un vasto campo di applicazioni industriali che ha portato a risultati incoraggianti, tanto da essere oramai considerate uno strumento di lavoro al pari dei tradizionali sistemi di processo delle informazioni.

Dall'avvento del primo computer elettronico digitale (ENIAC) nel 1946 sino alla fine degli anni '80 del secolo scorso, ogni applicazione di elaborazione dati ha in genere utilizzato un approccio di calcolo di tipo programmato. Tale approccio implica la definizione a priori di algoritmi per la risoluzione di un problema e la loro esatta codifica in programmi. Talora questo approccio comporta notevoli investimenti di risorse per l'analisi del problema, l'implementazione del programma e la sua verifica, e spesso per un processo, soprattutto se innovativo, non si può ottenere la necessaria pianificazione e un adeguato controllo.

Le reti neurali rappresentano un nuovo approccio alla elaborazione dei dati. Esse non richiedono lo sviluppo di nuovi algoritmi per il trattamento dei dati e possono ridurre drasticamente le risorse da investire.

L'addestramento cui sono sottoposte le reti neurali porta alla definizione, al loro interno, di funzioni che processano le informazioni.

La differenza sostanziale tra un sistema classico di processo delle informazioni e una rete neurale risiede nel fatto che nel primo le funzioni di analisi e di classificazione sono conosciute a priori e immesse dall'operatore nel sistema, mentre nel secondo caso esse si formano durante l'addestramento e sono ignote all'operatore, anzi il più delle volte l'operatore non è in grado di prevederle la struttura né può accedervi successivamente.

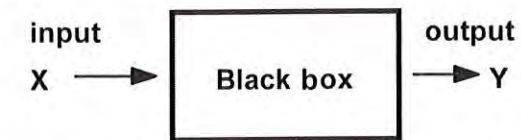


Figura 13.1 Schema di una black box. È un oggetto che riceve un input ed emette un output. Non si sa nulla della sua struttura interna.

Per ora soffermiamoci sul loro utilizzo operativo, senza entrare nel dettaglio della loro struttura, e consideriamo una generica rete neurale come una "black box" (Figura 13.1). Essa, una volta addestrata, è in grado di fornire un output a ogni input immesso.

Un esempio generico di applicazione può essere il seguente: si immagini di avere 25 dati costituiti ognuno da una coppia di valori e si voglia tentare una divisione in classi degli stessi. Ogni dato può essere rappresentato come un vettore in uno spazio bidimensionale. Consideriamo un piano cartesiano e rappresentiamo i dati in nostro possesso con punti le cui coordinate sono costituite dai valori di ogni coppia (Figura 13.2). Si vede dalla figura che i dati possono essere facilmente suddivisi in cinque classi di appartenenza.

Ora immaginiamo di voler creare una rete neurale in grado di classificare i nostri dati: si deve scegliere il tipo di rete e il tipo di addestramento. Poniamo di aver scelto la rete e soffermiamoci sul tipo di addestramento. La rete, appena creata, è incapace di classificare alcunché. Sarà in grado di adempiere al suo compito solo dopo un adeguato periodo di addestramento. Esistono due generi di addestramento, essi sono:

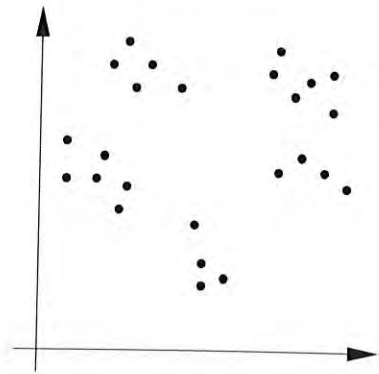
- addestramento non supervisionato;
- addestramento supervisionato.

Il primo, l'addestramento non supervisionato, consiste nell'immettere nella rete solamente i dati in nostro possesso. Una volta esaurita la procedura di addestramento la rete sarà in grado di classificare i dati, ossia una volta immesso un vettore di input  $X$  (che rappresenta una coppia di valori) nella rete, si avrà un output  $Y$  che indicherà la classe di appartenenza del dato di input.

Tutto ciò, e questa è forse la cosa più interessante, avverrà anche se il vettore di input  $X$  non appartiene al gruppo dei 25 iniziali utilizzati per l'addestramento.

Le classi vengono create dalla rete e contengono dati con caratteristiche simili. La rete è stata in grado di generalizzare alcune proprietà che contraddistinguono i dati appartenenti alle varie classi e di valutare la presenza e la consistenza di simili proprietà nel dato di input, in modo da poterli assegnare una classe.

Il secondo tipo di addestramento, l'addestramento supervisionato, comporta l'immissione nella rete, durante l'addestramento, oltre che del gruppo di dati in possesso, anche delle corrispettive classi di appartenenza. Le classi di appartenenza dei dati devono dunque essere note in precedenza e non si lascia alla rete la libertà di sceglierle. Questo tipo di addestramento, se si utilizza una rete neurale per classificare



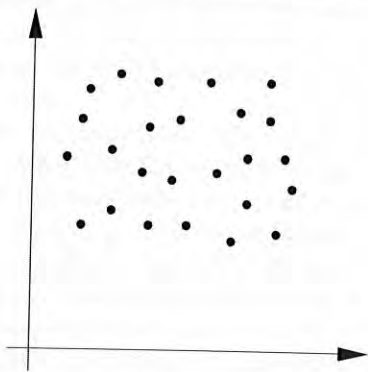
**Figura 13.2** Rappresentazione cartesiana di 25 vettori. Essi sono facilmente suddivisibili in 5 classi di appartenenza.

dati, come nel corrente esempio, è utile quando le classi siano definite a priori e si conosca la classe di appartenenza di ogni dato. Difatti può darsi che i dati siano omogeneamente sparsi sul piano e un apprendimento non supervisionato opererebbe una classificazione che potrebbe risultare arbitraria (Figura 13.3), oppure i dati in possesso potrebbero essere disposti in maniera tale da indurre l'apprendimento non supervisionato a una errata classificazione (Figura 13.4).

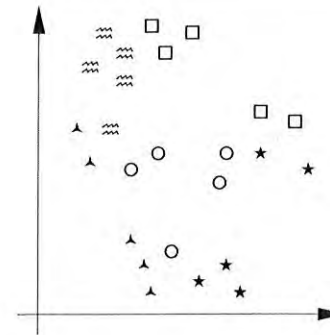
Anche in questo caso, una volta esaurita la procedura di addestramento, la rete è in grado di assegnare a un vettore  $X$  una classe di appartenenza  $Y$ , sia che esso faccia parte del gruppo di dati già noto alla rete sia che risulti completamente nuovo per essa.

L'esempio che si è appena visto è inerente all'utilizzo di una rete neurale al fine di classificare un gruppo di dati e all'eventuale classificazione di ulteriori nuovi dati.

Il lettore, a questo punto, si porrà dubbi sull'effettiva utilità di questo sistema, in quanto i dati potevano essere classificati molto più semplicemente rappresentan-



**Figura 13.3** Dati omogeneamente sparsi. Un addestramento non supervisionato può condurre a una classificazione imprevedibile.



**Figura 13.4** Dati appartenenti a varie classi (▲ ★ ☞ ○ □). La loro disposizione può indurre una rete neurale a una classificazione errata.

sul piano cartesiano e tracciando i confini delle classi. Ciò è vero per questo semplice esempio con 25 vettori bidimensionali, ma si immagini se avessimo avuto qualche migliaio di vettori pluridimensionali (le cui coordinate possono rappresentare le più svariate grandezze, come temperatura, posizione, velocità, entropia, energia... In tal caso si sarebbe apprezzata immediatamente l'utilità di un simile sistema).

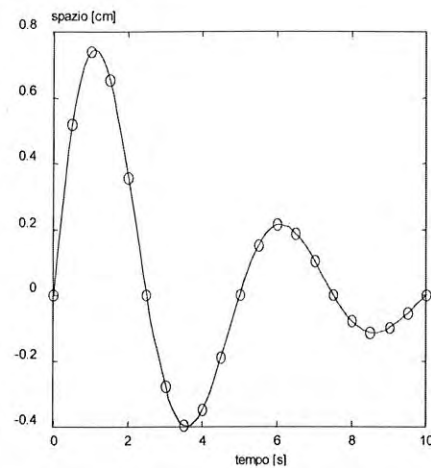
Una rete neurale può essere utilizzata anche per la modellizzazione di un sistema, per esempio un sistema meccanico. In questo caso si utilizza un addestramento supervisionato. Si immagini di avere un sistema meccanico e di aver campionato nel tempo la posizione di un elemento del sistema. Si avranno allora due gruppi di valori: il primo gruppo rappresenta i tempi a cui è avvenuto il campionamento e il secondo gruppo rappresenta le rispettive posizioni rilevate (Tabella 13.1).

Addestrando una rete neurale opportunamente scelta con questi due gruppi di dati, di cui uno rappresenta gli input (i tempi) e l'altro i corrispettivi output (le posizioni) si può ottenere un modello del sistema (Figura 13.5).

Ciò significa che immettendo nella rete un tempo si ha in uscita una posizione, anche se il tempo immesso non appartiene al gruppo di addestramento (ma deve essere interno all'intervallo di tempo considerato). Naturalmente vi è un errore tra la posizione calcolata dalla rete e quella reale. Il compito di chi crea e addestra la rete è quello di minimizzare tale errore. Ciò si ottiene, come si vedrà, agendo su vari fattori:

- scelta del tipo di rete neurale e sua architettura;
- scelta del tipo di addestramento;
- scelta dei parametri di addestramento.

Si intuisce quale possa essere il vantaggio dell'utilizzo di una rete neurale per prevedere il comportamento di un sistema. Infatti, si può rappresentare anche il sistema in esame come una "black box" che restituisce output in risposta a input, proprio come si è fatto inizialmente con la rete neurale. Addestrando la rete neurale con un gruppo di input e i relativi output, ottenuti da una campagna di sperimentazione sul sistema da studiare, si può ottenere una rete neurale che simula il comportamento del sistema. Tutto questo *senza dover fare ipotesi sulla struttura delle funzioni che nel sistema trasformano l'input e restituiscono l'output*.



**Figura 13.5** Modello del sistema. La curva è ricavata interrogando una rete neurale addestrata con i dati della Tabella 13.1. I cerchietti rappresentano i dati di addestramento.

**Tabella 13.1** Dati di campionamento (tempo, posizione) di un sistema meccanico

$t$	$x$
0.0 s	0.00 cm
0.5 s	0.52 cm
1.0 s	0.74 cm
1.5 s	0.65 cm
2.0 s	0.36 cm
2.5 s	0.00 cm
3.0 s	-0.28 cm
3.5 s	-0.40 cm
4.0 s	-0.35 cm
4.5 s	-0.19 cm
5.0 s	0.00 cm
5.5 s	0.15 cm
6.0 s	0.21 cm
6.5 s	0.19 cm
7.0 s	0.10 cm
7.5 s	0.00 cm
8.0 s	-0.08 cm
8.5 s	-0.11 cm
9.0 s	-0.10 cm
9.5 s	-0.05 cm
10.0 s	0.00 cm

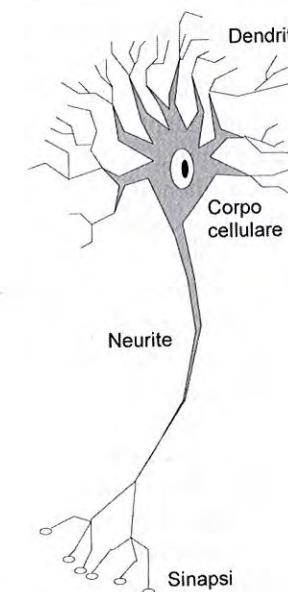
Tutto ciò può però dare adito a facili entusiasmi. Infatti, nell'illustrare queste due possibili applicazioni, allo scopo di introdurre il lettore nel campo delle reti neurali, si è deliberatamente sorvolato sui gravosi problemi inerenti alla scelta del tipo e della struttura delle reti neurali, nonché su quelli della scelta dell'algoritmo di apprendimento e dei numerosi parametri che governano quest'ultimo.

Il problema principale è che non sempre è assicurato l'apprendimento della rete in tempi finiti. Numerosi sono gli studi che sono stati effettuati e che sono tuttora in corso sulla convergenza degli algoritmi di apprendimento, ma il più delle volte, nelle scelte che devono essere compiute, bisogna affidarsi alla "sensibilità" dell'operatore, sensibilità che matura con l'esperienza e con un adeguato periodo di "addestramento" con le reti neurali.

### 13.1 Il neurone biologico

Il sistema nervoso umano è composto da circa  $10^{10}$  cellule neurali, chiamate neuroni. Esistono cinque tipi differenti di neuroni, ma qui è sufficiente descriverne uno solo per i nostri fini. Nella Figura 13.6 è rappresentato un tipico neurone del complesso motorio. In esso si distinguono il corpo cellulare, contenente il nucleo, e due tipi di propaggini che da esso dipartono le dendriti e il neurite.

Le dendriti ricevono i segnali provenienti da altri neuroni e sono in numero elevato, nonché estremamente ramificate ed estese. Esse sono caratterizzate da una grande superficie atta a ricevere i segnali dagli altri neuroni (circa  $0.25 \text{ mm}^2$ ).



**Figura 13.6** Neurone del complesso motorio.

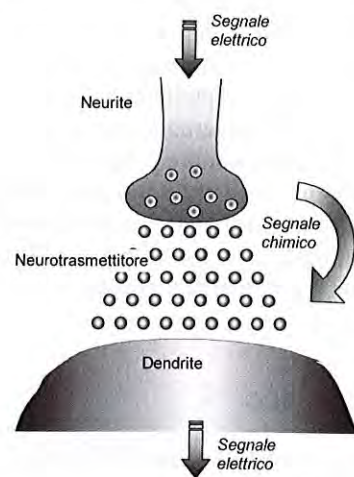


Figura 13.7 Passaggio del segnale tra due neuroni biologici.

I neuriti, anch'essi ramificati, trasmettono i segnali agli altri neuroni. Essi terminano in sinapsi che sono in contatto con le dendriti o il corpo di altri neuroni. Un neurone del complesso motorio ha migliaia di sinapsi che impegnano più del 40% della superficie totale della cellula.

Il trasferimento dei segnali dai neuriti alle dendriti di uno stesso neurone è elettrico, avvenendo per trasporto di ioni, mentre il trasferimento dei segnali dai neuriti alle dendriti di due neuroni adiacenti è di tipo chimico, attraverso le sinapsi. Infatti per trasmettere il segnale la membrana presinaptica del neurite rilascia, da alcune vesciche in essa presenti, una sostanza chimica detta neurotrasmettitore. Tale sostanza, diffondendosi nello spazio tra sinapsi e dendrite, raggiunge quest'ultima dove genera un nuovo segnale elettrico che percorre il corpo del secondo neurone (Figura 13.7).

La trasmissione del segnale da un neurone all'altro impiega un certo tempo che dipende dal percorso che esso deve compiere. Di conseguenza i segnali che afferiscono a un singolo neurone non giungono contemporaneamente.

Le sinapsi sono in grado di cambiare l'intensità del segnale che le attraversa. Il cambiamento dipende dalla forza della sinapsi.

Nei neuroni artificiali la forza della sinapsi è chiamata *peso della sinapsi* ed è generalmente indicata con la lettera  $w$  (Figura 13.8). Senza entrare nella fisica e nella chimica della membrana, si può dire che la forza della sinapsi determina la quota parte dell'intensità del segnale che "entra" nel neurone. La forza di una sinapsi può variare, modificando così il peso e l'importanza che il segnale che la attraversa assume nei confronti dei segnali transitanti nelle altre sinapsi. La variazione della forza delle sinapsi, insieme con la variazione della topologia dei collegamenti, costituisce l'essenza dell'apprendimento. Lo psicologo canadese Donald Hebb postulò nel suo libro *Organization of Behavior* un meccanismo plausibile per l'apprendimento a livello cellulare nel cervello. In sintesi egli asserisce che quando un segnale entrante



Figura 13.8 Passaggio del segnale tra due neuroni artificiali.

nel neurone attraverso una sinapsi provoca l'emissione di un impulso da parte del neurone ricevente stesso, allora la forza della sinapsi aumenta, ossia aumenta la sua capacità di far emettere un impulso al neurone ricevente. Tale modello di apprendimento è noto con il nome di *legge di apprendimento di Hebb*. È importante notare che questo modello riduce l'effetto dell'apprendimento a una azione puramente locale sul neurone e non contempla una riorganizzazione della rete. Per la sua intrinseca semplicità esso è stato adottato come modello per numerosi algoritmi di apprendimento.

## 13.2 Il modello del neurone artificiale

Il neurone ha un gran numero di coppie dendriti/sinapsi e ciò implica che esso può ricevere simultaneamente molteplici segnali da altri neuroni. Ognuno di questi segnali viene filtrato dal peso della sinapsi. Si può ammettere che i vari segnali pesati che giungono al neurone contemporaneamente in un determinato istante possano indurre un effetto cumulativo nel neurone che chiameremo "effetto di rete" o "input di rete" (*net input*). Non sappiamo come si formi questo effetto collettivo e quanto sia grande rispetto a tutti i segnali ricevuti, quindi faremo delle drastiche semplificazioni. L'input di rete, chiamato *Net*, è una funzione di tutti i segnali giungenti in un determinato intervallo di tempo e di tutti i pesi delle sinapsi (Figura 13.9).

La funzione che unisce queste quantità è una semplice somma dei prodotti dei segnali  $s_i$  per i rispettivi pesi  $w_i$ .

$$Net = w_1s_1 + w_2s_2 + \dots + w_ns_n \quad (13.1)$$

L'effetto cumulativo *Net* genera l'*Output* del neurone (che verrà inviato agli altri neuroni tramite il neurite). L'effetto cumulativo *Net* può calcolarsi come il prodotto scalare tra i due vettori  $W (w_1, w_2 \dots w_n)$  e  $S (s_1, s_2 \dots s_n)$ :

$$Net = WS \quad (13.2)$$

Sinora abbiamo analizzato un neurone singolo. Talvolta, però, in relazione alla natura dei problemi che si vogliono affrontare, è possibile collegare i neuroni per formare una rete neurale più complessa. Per far ciò si legano i neuroni artificiali in paralle-

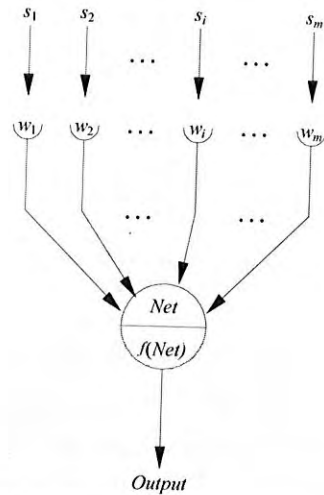


Figura 13.9 Modello di neurone artificiale. I segnali affluenti dalle sinapsi generano l'input di rete Net.

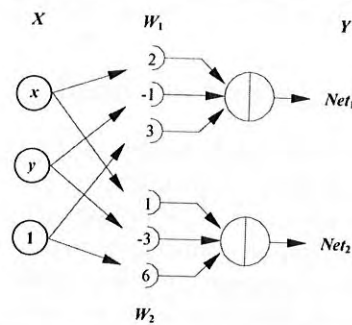


Figura 13.10 Due neuroni artificiali in parallelo.

lo (Figura 13.10) e/o in serie (Figura 13.11) a formare quello che viene chiamato uno strato di neuroni.

Bisogna notare, inoltre, che sino a ora abbiamo trattato neuroni che hanno come segnale di uscita il *Net*, l'“effetto cumulativo”. I neuroni in uso nella maggior parte delle reti neurali hanno come segnale di uscita un *Output*, che è definito da una *funzione di trasferimento*, che ha come argomento il *Net*.

La funzione di trasferimento ha lo scopo di rendere non lineare la rete neurale. D'altronde il valore di *Net* potrebbe essere molto elevato ed è difficile pensare che l'intensità del segnale che due neuroni biologici si scambiano possa avere valori non limitati. Per questi motivi è stata introdotta la funzione di trasferimento, il cui scopo è quello di limitare il segnale in uscita a un preciso intervallo continuo di valori. Ci sono molte funzioni di trasferimento che rispondono a questi requisiti. Le più usate sono:

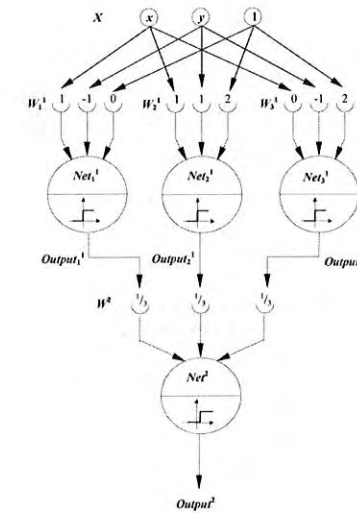


Figura 13.11 Neuroni in serie.

- *Hard-limiter* (Figura 13.12)

$$Output = 2 \cdot \text{sgn}(Net + \vartheta) - 1 \quad (13.3)$$

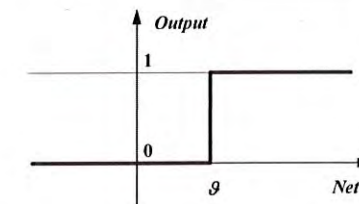


Figura 13.12 Funzione hard-limiter.

- *Threshold logic* (Figura 13.13)

$$Output = \max\{0, \min[1, \alpha(Net + \vartheta)]\} \quad (13.4)$$

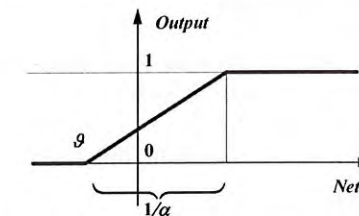


Figura 13.13 Funzione threshold-logic.

- Sigmoidal function (Figura 13.14)

$$Output = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(Net+\vartheta)}} \quad (13.5)$$

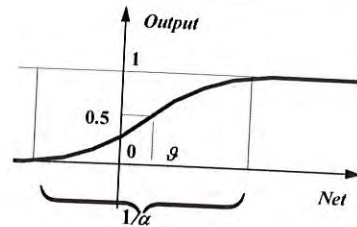


Figura 13.14 Sigmoidal function.

- Tangente iperbolica (Figura 13.15)

$$Output = \tanh(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (13.6)$$

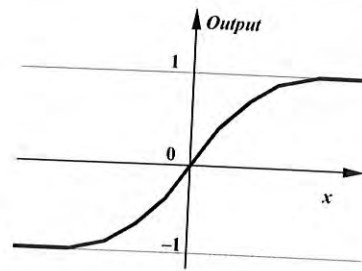


Figura 13.15 Tangente iperbolica.

Per aumentare la flessibilità di un neurone nel risolvere un problema decisionale, infine, è stata introdotta una grandezza chiamata *bias*. Questa corrisponde matematicamente a una componente aggiuntiva del vettore dei pesi delle sinapsi. Durante la procedura di apprendimento anche il bias viene modificato.

### 13.3 Le architetture neurali

Le operazioni basilari che un neurone compie sono sempre le stesse: elaborare il *Net* e calcolare l'*Output*. Dunque le reti neurali differiscono solamente per come questi neuroni sono collegati.

Queste sono le informazioni che definiscono una rete neurale:

- il numero dei segnali di input e di output;
- il numero di strati;
- il numero di neuroni in ogni strato;

- il numero di pesi in ogni neurone;
- il collegamento tra i pesi di uno strato o di più strati;
- quali neuroni ricevono i segnali di correzione.

Per studiare più facilmente le reti neurali è pratica comune imporre restrizioni alle possibilità di collegamento esistenti tra i neuroni, così da ottenere strutture comparabili su cui agire intervenendo su un minor numero di gradi di libertà.

Tali restrizioni sono:

- tutti i neuroni prendono come input gli stessi segnali, compreso quello aggiuntivo connesso al *bias*;
- il numero dei pesi in ogni neurone di uno stesso strato è fissato dal numero di segnali prodotto dallo strato superiore.

Di seguito è riportato l'esempio della struttura di una rete neurale a due strati (Figura 13.16).

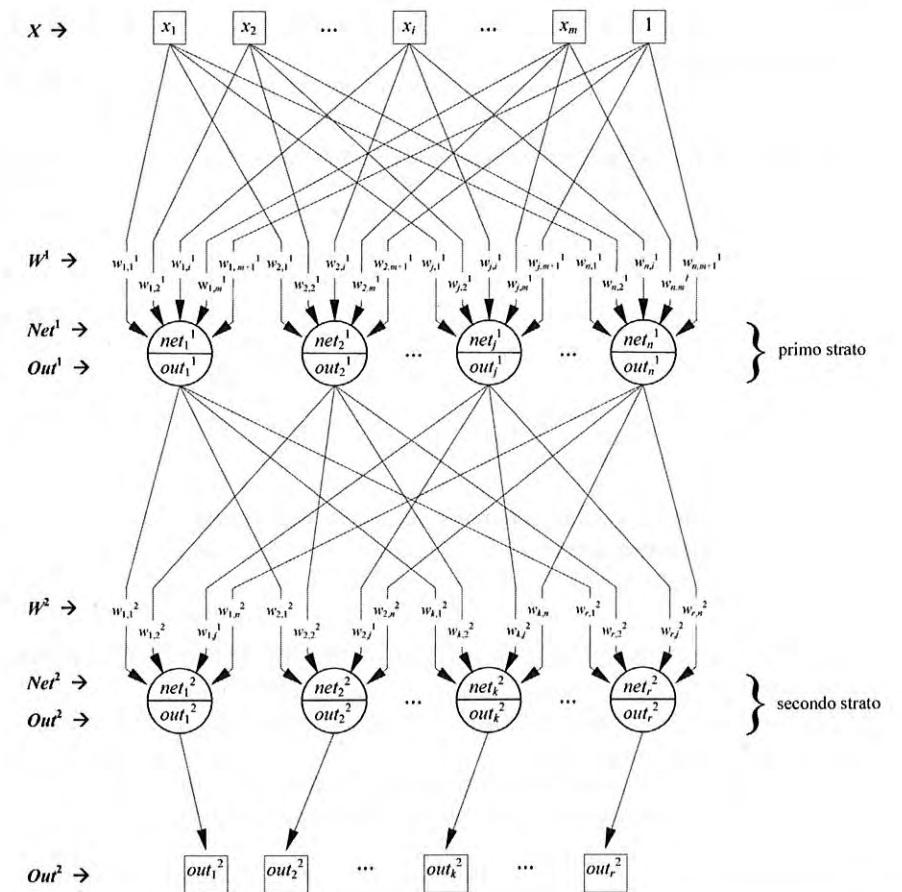


Figura 13.16 Struttura di una rete neurale a due strati.

Da esso si vede bene quale sia il flusso dei dati e la correlazione esistente tra la formulazione matematica della rete e la sua veste grafica. Seguiamo tutte le elaborazioni:

1. La rete riceve in ingresso un vettore di segnali  $X$ :

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m, 1) \quad \text{con } i = 1 \dots m \quad (13.7)$$

2. I segnali  $x_i$  vengono elaborati tramite i pesi delle sinapsi  $w_{j,i}^1$ , dove gli indici hanno il significato illustrato in Figura 13.17, con  $j = 1 \dots n$ , dove  $n$  è il numero di neuroni del primo strato.

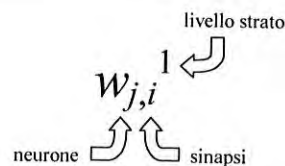


Figura 13.17 Significato degli indici.

3. Vengono elaborati i valori  $net_j^1$ , costituenti il vettore  $Net^1$ :

$$Net^1 = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,i} & \dots & w_{1,m} & w_{1,m+1} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,i} & \dots & w_{2,m} & w_{2,m+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ w_{j,1} & w_{j,2} & \dots & w_{j,i} & \dots & w_{j,m} & w_{j,m+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ w_{n,1} & w_{n,2} & \dots & w_{n,i} & \dots & w_{n,m} & w_{n,m+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13.8)$$

4. Tramite la funzione di trasferimento si calcolano i valori  $out_j^1$ , che compongono il vettore  $Out^1$  del primo strato.

$$Out^1 = f(Net^1) \quad (13.9)$$

5. Il secondo strato prende in ingresso il vettore  $Out^1$  (non è stato inserito il valore unitario per il *bias*, per non rendere troppo complesso lo schema).
6. I segnali  $out_j^1$  vengono elaborati tramite i pesi delle sinapsi del secondo strato.
7. Vengono elaborati i valori  $net_k^2$ .
8. Con la funzione di trasferimento si calcolano i valori  $out_k^2$ , che compongono il vettore  $Out^2$  del secondo strato e costituisce l'Output della rete.

In sintesi:

$$Out^2 = f(W^2 \cdot f(W^1 \cdot X)) \quad (13.10)$$

## 13.4 I campi di applicazione

Le reti neurali sono uno strumento estremamente flessibile. Esse possono apprendere da sole le regole che le guideranno nel loro impiego operativo senza il bisogno di conoscere a priori le leggi che legano i dati che esse saranno chiamate a elaborare. La rete neurale, durante l'addestramento, fa esperienza e impara a correlare i dati che riceve in ingresso con quelli richiesti in uscita. Questa capacità le rende uno strumento ottimale lì dove si voglia un'applicazione che sia in grado di modellare un sistema complesso governato da leggi non perfettamente note, o la cui conoscenza impegnerebbe eccessive risorse. I principali campi di applicazione sono i seguenti.

- *Classificazione.* Riconoscimento e classificazione di dati. Per esempio il riconoscimento dei caratteri degli scritti o il riconoscimento vocale.
- *Modellizzazione.* Simulazione di un sistema complesso. Per esempio le applicazioni che simulano i sistemi dinamici.
- *Previsione.* Previsione dell'elemento successivo di una successione di dati.

Lo stato della conoscenza delle reti è ormai maturo per essere utilizzato come tecnologia. Si sta ora assistendo a un loro utilizzo combinato con altre tecnologie. Per esempio, combinato con la realtà virtuale, può dar vita a sistemi CAD, ovvero ad applicazioni di analisi dei dati in grado di compiere scelte intelligenti. Osservando lo sviluppo delle reti è facile pensare che presto ci ritroveremo, a detta di Nick Ryman-Tubb<sup>1</sup>, ad avere a che fare con raffinerie neurali o con apparati neurali per l'aria condizionata e che i sistemi di soft-computing verranno presto adottati in massa dal mercato, per creare interfacce che possano permettere alle persone di comunicare con facilità con televisori, automobili e computer.

Viene di seguito riportata una panoramica su alcune applicazioni correnti e su altre ancora in fase di studio. Con ciò si intende mostrare quale sia la loro varietà e l'interesse che esse suscitano nell'industria.

Alcune applicazioni delle reti neurali attualmente in uso sono le seguenti.

- Predizione delle proprietà dei prodotti di una industria di filati.
- Previsione della corrente per la guida delle imbarcazioni nel porto di IJmuiden (Olanda).
- Automazione nella scelta della frutta da inviare ai supermarket.
- Riconoscimento di pozzi di petrolio e gas naturale sfruttabili.
- Previsione della vendita di giornali e riviste.
- Pianificazione della produzione dei trasformatori elettrici.
- Diagnosi della saldatura a punti.
- Riconoscimento automatico dei caratteri su manoscritti.
- Controllo del rifornimento dell'acqua potabile.
- Previsione della vendita di articoli nei supermarket.
- Controllo automatico della qualità delle tegole prodotte.
- Classificazione dei difetti nelle tubazioni.
- Sensori intelligenti per le colonne di distillazione.

<sup>1</sup> Nick-Ryman-Tubb è il fondatore e dirigente della Neural Technologies Limited.

- Previsione a breve termine per il carico di centrali elettriche.
- Monitoraggio di una diga.

Si approfondisce la conoscenza di alcune delle applicazioni menzionate, interessanti per il campo della manutenzione.

#### Diagnosi della saldatura a punti

La saldatura a punti è una tecnica che si basa sul riscaldamento e raffreddamento locali del fuso tra due lamiere metalliche. Tale saldatura non è ispezionabile visivamente, se non tramite prove distruttive su campioni. Per avere un efficace controllo di qualità della produzione nasce la necessità di realizzare un metodo di ispezione on-line non distruttivo. L'analisi a ultrasuoni ben si presta a ciò. Essa è comunemente utilizzata nelle ispezioni off-line e fornisce indicazioni agli operatori esperti. La TNO, una organizzazione governativa olandese, ha addestrato una rete neurale con i dati ricavati da indagini svolte con l'ausilio di una sonda a ultrasuoni. È ora in discussione la possibilità di introdurre la tecnica negli sviluppi della tecnologia produttiva automobilistica.

#### Controllo automatico della qualità delle tegole prodotte

Fino a oggi il controllo della qualità delle tegole prodotte avveniva valutando visivamente la superficie e testandone il suono alla ricerca di piccole crepe. Con tale procedura un operaio è capace di controllare 45 tegole al minuto.

Utilizzando una rete neurale nel test acustico è stato possibile velocizzare l'operazione e rilevare con semplicità difetti di piccola entità che possono sfuggire a un test condotto manualmente.

#### Classificazione dei difetti nelle tubazioni

Il rilevamento dei difetti nelle tubazioni è reso difficoltoso dal gran numero di immagini che devono essere controllate da personale esperto.

La Pipetronix GmbH con sede in Lingen, Germania, utilizza una rete neurale per localizzare i difetti delle tubature di petrolio e gas partendo dalle immagini trasmesse da una sonda a ultrasuoni che percorre internamente la tubatura.

#### Sensori intelligenti per le colonne di distillazione

Per regolare la purezza del prodotto delle colonne di distillazione è necessario avere informazioni in tempo reale sul processo in corso. La soluzione ideale consiste nell'uso di analizzatori, ma il loro costo e i loro lunghi tempi di risposta ne limitano l'utilizzo. Le reti neurali sono una soluzione a questo problema poiché permettono di correlare il risultato delle analisi con le pressioni e le temperature della colonna, fornendo risultati con errori inferiori allo 0,2%.

#### Monitoraggio di una diga

Una diga è soggetta a deformazioni causate da vari fattori, tra i quali i più importanti sono il livello del battente dell'acqua e la temperatura. Per salvaguardare la diga è importante creare un modello e monitorare le deformazioni. In caso di significative differenze tra le misure effettuate e i dati ricavati dal modello è necessario eseguire approfonditi controlli sulla diga.

La Tauernkraftwerke AG con sede a Salisburgo, Austria, ha implementato un modello su base neurale in grado di prevedere le deformazioni della diga. L'errore rilevato si mantiene in un campo variabile fra 0,1% e 1%, di molto inferiore al 2 ÷ 3% fornito dal modello convenzionale a regressione multipla precedentemente adottato. L'adozione del modello implementato con le reti neurali ha così ridotto i costosi interventi di verifica sulla diga.

Fra le applicazioni delle reti neurali attualmente in fase di studio vi sono le seguenti.

- Sviluppo di un nuovo standard per l'analisi polisonnografica del sonno.
- Previsione a breve termine delle precipitazioni atmosferiche per il controllo delle acque di scolo.
- Sistema di interpretazione del linguaggio parlato con continuità.
- Monitoraggio delle macchine rotanti per la manutenzione predittiva.
- Memoria spaziale per robot mobile.
- Diagnostica delle macchine tramite reti neurali.

Si approfondiscono le applicazioni in fase di studio più interessanti per il campo della manutenzione.

#### Monitoraggio delle macchine rotanti per la manutenzione predittiva

La manutenzione dei macchinari è una delle voci più gravose nel bilancio di un'industria. L'efficiente monitoraggio delle macchine può ridurre drasticamente tale voce. L'obiettivo del progetto Neural-Maine<sup>2</sup> è quello di creare uno strumento in grado di prevedere con sufficiente anticipo le condizioni critiche del macchinario. Tale strumento si avvale dei segnali di molti sensori che vengono elaborati da una rete neurale. Essa deve essere poi in grado di giudicare lo stato di salute del macchinario.

#### Diagnostica delle macchine tramite reti neurali

Il progetto<sup>3</sup> si propone di sviluppare un sistema flessibile per il monitoraggio e la diagnostica delle macchine con il fine di attuare una manutenzione predittiva. Tramite sensori si analizzerà lo spettro delle vibrazioni della macchina, temperature e pressioni locali e posizioni delle parti in movimento. Tali dati dovranno essere classificati da una rete che sarà in grado di classificare la condizione di operatività della macchina e definire quali siano le condizioni di guasto. Successivamente sarà possibile definire quali siano le condizioni di "buona salute" della macchina. Questo progetto è supportato da otto industrie.

#### Telemanutenzione intelligente di impianti tecnici

La ricerca<sup>4</sup> si pone come obiettivo principale la progettazione e la realizzazione in

<sup>2</sup> Centre for Neural Computing Applications – Faculty of Technology, Brunel University – Runnymede Campus, Englefield Green, Egham, Surrey, United Kingdom.

<sup>3</sup> Delft University of Technology, Faculty of Applied Sciences, Subfaculty of Applied Physics, The Netherlands.

<sup>4</sup> Dipartimento di Meccanica e Aeronautica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".



forma prototipale di un sistema di tele-manutenzione basato su logiche di tipo preventivo intelligente (mediante l'impiego di una rete neurale specificamente progettata per lo scopo) per la gestione di un parco numeroso di impianti tecnici dislocati sul territorio.

La gestione e la manutenzione degli impianti tecnici installati negli edifici (per esempio, impianti ascensore) e nelle industrie (per esempio impianti in pressione) richiedono significative azioni di pianificazione e, successivamente, di controllo, rese complicate, per esempio, quando tali impianti siano dislocati sul territorio, ove lo spostamento delle squadre di manutenzione è reso maggiormente difficile dalle distanze e dal traffico veicolare. Tali condizioni, unitamente alla circostanza per cui una impresa di manutenzione si trova a gestire e mantenere parchi impianti anche molto numerosi (dell'ordine delle centinaia e più), rendono difficile l'attuazione di logiche di tipo preventivo, determinando, così, livello di rischio suscettibili talvolta di sensibile miglioramento.

Al fine di rendere più efficaci le azioni gestionali e manutentive sugli impianti tecnici, in particolare rendendo più tempestivi gli interventi o, addirittura, prevenendo il verificarsi di guasti, si propone un sistema di manutenzione a distanza (tele-manutenzione), che consenta la rilevazione, registrazione, analisi ed elaborazione a distanza di grandezze significative relativamente al funzionamento degli impianti.

Si concepisce tale sistema costituito dalle seguenti parti principali: a) sub-sistema di rilevamento delle grandezze di interesse, b) sub-sistema di trasporto e conversione dei segnali, c) sub-sistema di registrazione e segnalazione, d) sub-sistema di elaborazione intelligente delle grandezze monitorate.

L'adozione di sistemi di tele-manutenzione per impianti tecnici risulta agevolata dal fatto che sugli impianti ascensore di nuova costruzione, per esempio, è prevista per legge l'installazione di un sistema di comunicazione bidirezionale che colleghi costantemente gli utenti dell'impianto con un punto di risposta. Il medesimo sistema, dunque, può oggi essere ragionevolmente impiegato anche per il trasferimento di segnali relativi allo stato di funzionamento dell'impianto.

L'elaborazione delle informazioni relative al funzionamento dell'impianto, inoltre, può essere agevolmente attuata per mezzo di reti neurali, ovvero strumenti informatici ispirati alle logiche dell'intelligenza artificiale, in grado di assicurare la previsione di fenomeni qualsivoglia, anche non lineari, ovvero consentire l'attuazione delle auspiccate logiche di tipo preventivo nella manutenzione degli impianti tecnici.

### 13.5 Software per reti neurali

Attualmente esiste un numero elevato di prodotti software che si basano sulla tecnologia delle reti neurali. Essi sono classificabili in ragione del loro obiettivo come segue:

- prodotti per lo studio delle reti neurali;
- prodotti per l'utilizzo applicativo delle reti neurali.

I prodotti software per lo studio delle reti neurali sono strumenti che servono a

creare e addestrare diverse tipologie di reti, fornendo degli strumenti per analizzare il tempo di apprendimento e l'efficacia dello stesso. La maggior parte di essi sono gratuiti o poco costosi. Con una semplice ricerca di tali programmi su Internet si rimane sommersi, in poco tempo, da una grande quantità di software distribuito con licenza shareware o freeware. Molti dei programmi gratuiti provengono dai lavori delle università di tutto il mondo, altri dal lavoro di esperti e appassionati del settore e il loro scopo è essenzialmente di carattere educativo, con l'intento di introdurre il pubblico nel mondo delle reti neurali. Non mancano, comunque, programmi complessi per lo studio approfondito delle reti, il cui costo non è certo trascurabile.

I prodotti software che utilizzano le reti neurali come strumento, al fine di realizzare applicazioni concrete, sono per lo più creati e commercializzati da aziende specializzate. Esistono varie tipologie di questi prodotti, che vanno dalle librerie di procedure a uso dei programmatori a programmi specializzati (come quelli che operano complesse correlazioni tra dati o il riconoscimento di suoni o immagini), fino ad arrivare ai programmi di interfaccia tra computer e processori neurali, cui è delegato il compito di implementare le reti per ottenere una elaborazione più veloce. L'interesse dell'industria per questi prodotti sembra in continua ascesa e di pari passo lo è il numero dei prodotti e delle aziende produttrici.

### 13.6 Hardware per reti neurali

I prodotti hardware basati sulla tecnologia delle reti neurali sono ancora pochi rispetto a quelli software. L'operazione di implementazione software delle reti è sicuramente più economica di quella hardware, in quanto essa si basa sulla "semplice" stesura di un programma che dovrà girare su computer già presenti in commercio. Offre anche una maggior flessibilità in fase di stesura del lavoro, perché il costo di modifica del programma è basso e impiega poche risorse. D'altro canto, i prodotti hardware, nonostante l'alto costo di progettazione e di impianto della produzione, offrono una notevole velocità di esecuzione, indispensabile per applicazioni, quali il riconoscimento vocale e di immagini in tempo reale.

I prodotti hardware sono per lo più processori neurali, ossia microprocessori che implementano reti neurali. Al loro interno esistono tanti neuroni che, tramite i segnali che giungono ad alcuni piedini dell'integrato, possono essere collegati tra loro in modi differenti per realizzare varie configurazioni di reti neurali.

### 13.7 Creare un controllo neurale

Le reti neurali possono essere utilizzate efficacemente anche per la creazione di controlli. Si riporta qui un semplice esempio che illustra quale sia la strada da percorrere per creare un controllo neurale.

Si prenda il sistema massamollasmorzatore di Figura 13.18; oltre alla forza sollecitante  $F(t)$ , sia applicata anche una forza  $C(t)$ , il cui scopo sia di smorzare le oscillazioni provocate dalla forza sollecitante  $F(t)$ . L'ampiezza e la direzione della forza  $C(t)$  vengono decise da una rete MLP (*Multi Layer Perceptron*) a due strati, con 5 neuroni nel primo strato.

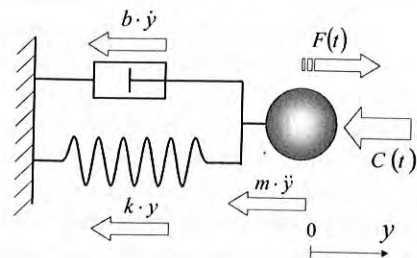


Figura 13.18 Schema del sistema massa-molla-smorzatore e forze in gioco.

La rete prende come input solamente gli spostamenti  $y$  e ignora quale sia la forza  $F$ . Per creare il set di dati dell'apprendimento si utilizza il sistema "molla" implementato sul tool Simulink di Matlab (Figura 13.19).

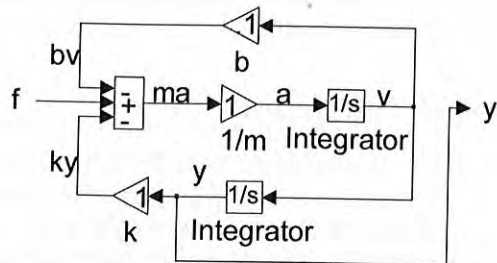


Figura 13.19 Il sistema massa-molla-smorzatore implementato su Simulink. Il modello riceve in ingresso il segnale della forza  $F(t)$  e restituisce in uscita lo spostamento  $y$ .

Con esso viene creata una matrice (Figura 13.20) nella quale a ogni colonna corrisponde un istante di campionamento  $t$  (la frequenza di campionamento è pari a 10 campioni al secondo) le righe, dalla prima alla sesta, corrispondono rispettivamente ai valori di  $y(t), y(t-1), y(t-2), F(t), F(t-1)$  e  $F(t-2)$ .

$t$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	...
$y(t)$													
$y(t-1)$													
$y(t-2)$													
$F(t)$													
$F(t-1)$													
$F(t-2)$													

Figura 13.20 Schema della matrice  $Y$  creata dal sistema "molla" da cui si traggono i dati per l'addestramento.



Figura 13.21 Schema degli input e degli output che la rete deve imparare a correlare.

$t$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	...
$y(t+1)$													
$y(t)$													
$y(t-1)$													
$t$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	...
$F(t)$													

Figura 13.22 Dati per l'addestramento (provengono dai dati della matrice  $Y$ . Rispetto a essi vi è stata una trasposizione degli indici per cui  $y(t) \rightarrow y(t+1), y(t-1) \rightarrow y(t) \dots$  e così via. È stata evidenziata una delle 500 coppie di dati utilizzate per l'addestramento).

La rete, nel suo funzionamento operativo, deve prevedere qual è la forza di controllo da applicare all'istante  $t$  per ottenere un valore dello spostamento  $y(t+1)$  assegnato.

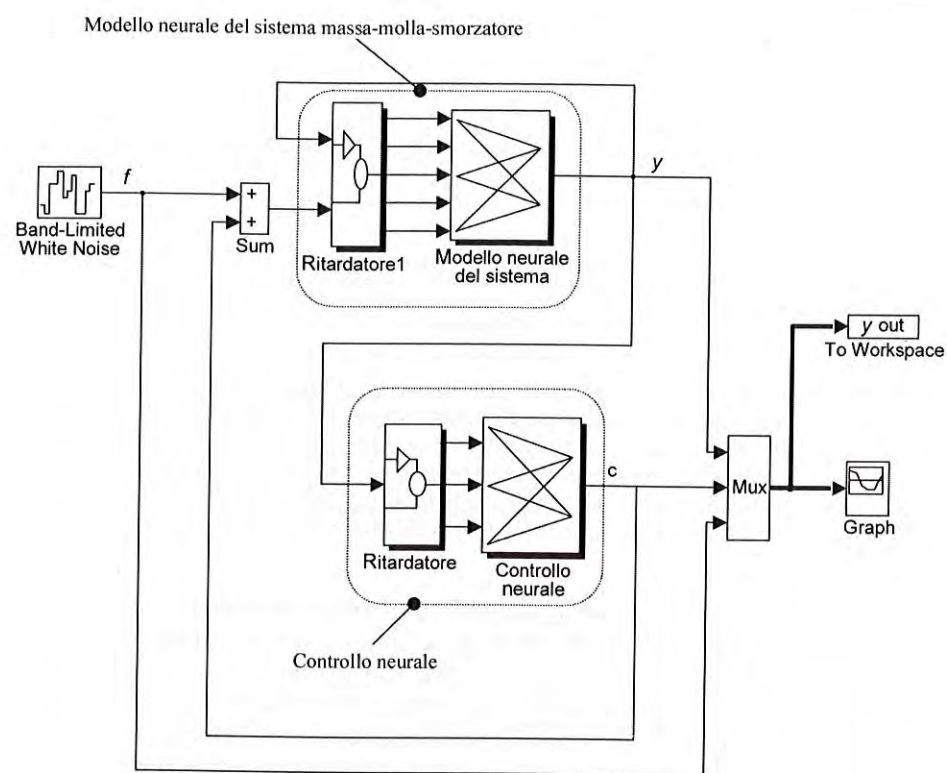
Per ottenere tale risultato bisogna che la rete impari a correlare i dati dello spostamento  $[y(t+1), y(t), y(t-1)]$  con la forza  $F(t)$  che li ha causati. I dati per l'addestramento provengono dalla matrice  $Y$  (Figura 13.21). Vengono prese 500 coppie non consecutive di dati  $\{[y(t+1), y(t), y(t-1)], F(t)\}$  (Figura 13.22).

La rete viene addestrata con l'algoritmo di *Levenberg-Marquardt* e dopo 1011 epoche viene raggiunto un errore di recalling pari a  $SSE = 0,0179$ .

La rete, dopo l'addestramento, è in grado di correlare gli spostamenti con le forze applicate al sistema. Se viene imposto un valore  $y(t+1) = 0$  nei dati di ingresso, la rete è in grado di restituire il valore della forza da applicare al sistema per riportare lo spostamento  $y$  a un valore nullo (Figura 13.23).

Tramite Simulink è stato creato un modello del sistema massa-molla-smorzatore sollecitato da una forza eccitatrice  $F$  e da una forza di controllo  $C$  generata dalla rete addestrata. Lo schema è riportato in Figura 13.24. Nella Figura 13.25 è riportato lo schema del blocco ritardatore. In figura 13.26 è riportato il risultato della simulazione. Si può fare un confronto con le oscillazioni del sistema non controllato.





**Figura 13.28** Schema del modello neurale completo del sistema massa-molla-smorzatore controllato.

Per finire, si riporta in Figura 13.28 lo schema del modello neurale del sistema massa-molla-smorzatore controllato. È simile allo schema di Figura 13.24, tranne per il sistema "molla", sostituito con il suo modello neurale, ottenendo così un modello neurale completo.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] P. Cappa, L. Fedele, V. Naso: "A new device for the evaluation of the batteries state of charge", *Experimental Techniques*, vol. 23, n. 5, September October 1999.
- [2] R. Carotenuto, L. Fedele: *An innovative neural networks model for bench testing hybrid means of transport*, IV NEURAP, Marseilles, France, March 11-12-13, 1998.
- [3] R. Carotenuto, L. Fedele, M. Tronci: *A new device for the evaluation of the batteries state of charge based on neural networks modelization*, IV NEURAP, Marseilles, France, March 11-12-13, 1998.

- [4] G. Cybenko, *Approximation by superpositions of a sigmoidal function*, *Mathematics of control, signals and systems*, vol. 2, pp. 303-314, 1989.
- [5] L. Fortuna, G. Rizzotto, M. Lavorgna, G. Nunnari, M.G. Xibilia, R. Caponetto, *Soft computing e valenze applicative*, Cavallotto edizioni, 1999.
- [6] S. Haykin, *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*, Macmillan Publishing Company, 1994.
- [7] R. Hetch-Nielsen, *Neurocomputing*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [8] A.N. Kolmogorov, *On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition*, *Doklady Akademii Nauk SSR*, vol. 114, pp. 953-956, 1957.
- [9] R. Masini, E. Padovani, M.E. Ricotti, E. Zio, "Dynamic solution of a steam generator by neural networks", *Nuclear engineering and design*, 187, pp. 197-213, 1999.
- [10] M. Ricotti, E. Zio, "Neural network approach to sensitivity and uncertainty analysis, reliability engineering and system safety", *Nuclear engineering and design*, 64, pp. 59-71, 1999.
- [11] P. Smith-Churchland, *Neurophysiology: Towards a Unified Science of the Mind-Brain*, Chapter 2, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1986.
- [12] P.D. Wasserman, *Neural Computing: Theory and Practice*, Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [13] J. Zupan, J. Gasteiger, *Neural Networks for Chemists: an Introduction*, VCH, 1993.

# 14

## La logica fuzzy

Lo scopo principale della logica fuzzy è quello di suggerire una via matematica per la rappresentazione delle imprecisioni che caratterizzano i processi umani e agevolare, in particolare, le possibilità effettive di ottenere una descrizione per quanto possibile precisa di qualsivoglia sistema, a prescindere dalla sua complessità, e all'aumentare di quest'ultima.

Un modo semplice per avvicinarsi alla logica sfumata è quello di fare uso di variabili linguistiche, anziché di quelle numeriche a cui si è più abituati nel mondo dell'ingegneria.

Se si definisce un insieme sfumato come l'insieme di tutti i concetti linguistici (che si possono esprimere) caratterizzati dall'aver una proprietà in comune, e la funzione di appartenenza come quella che pone in relazione ogni elemento di un insieme sfumato con l'intervallo numerico continuo  $[0, 1]$ , si può affermare che tale funzione di appartenenza rappresenta, appunto, il grado di appartenenza di un singolo elemento dell'insieme, ovvero, di un dato concetto linguistico a un determinato insieme di concetti. Si supponga, per esempio, di definire la variabile linguistica temperatura. Un concetto che si può esprimere a partire da tale variabile potrebbe essere il seguente: "la temperatura del cuscinetto ( $T$ ) della macchina è circa pari a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ". Tale concetto, che perfeziona la gamma di valori che la variabile linguistica è suscettibile di assumere, può essere espresso sotto forma matematica attraverso il ricorso a una particolare funzione di appartenenza, il cui diagramma potrebbe essere, per esempio, quello rappresentato nella Figura 14.1.

Nel principio della complessità di Zadeh, si afferma che all'aumentare della complessità di un sistema diminuisce la capacità di interpretazione corretta e precisa del suo comportamento, fino al raggiungimento di una soglia oltre la quale la precisione e la rilevanza diventano due caratteristiche quasi mutuamente escludentesi.

Verma e Knezevic hanno esaminato da un punto di vista ingegneristico il ruolo della incertezza nel ciclo di vita di un prodotto (Figura 14.2).

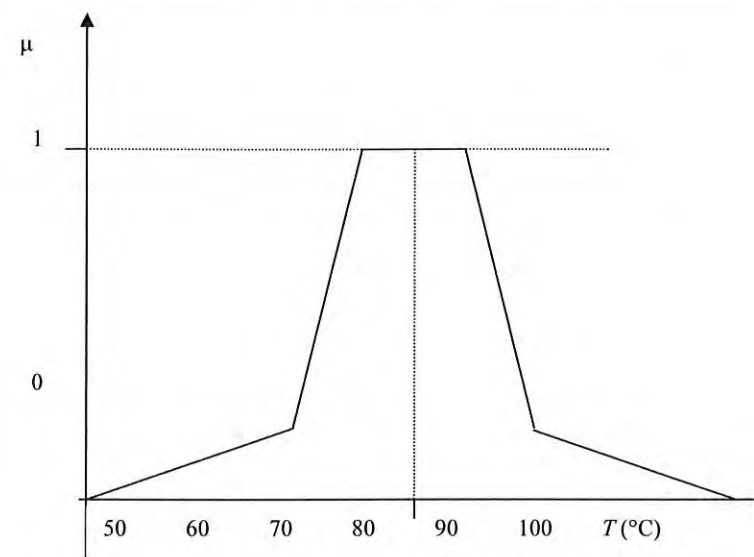


Figura 14.1 Esempio di funzione di appartenenza.

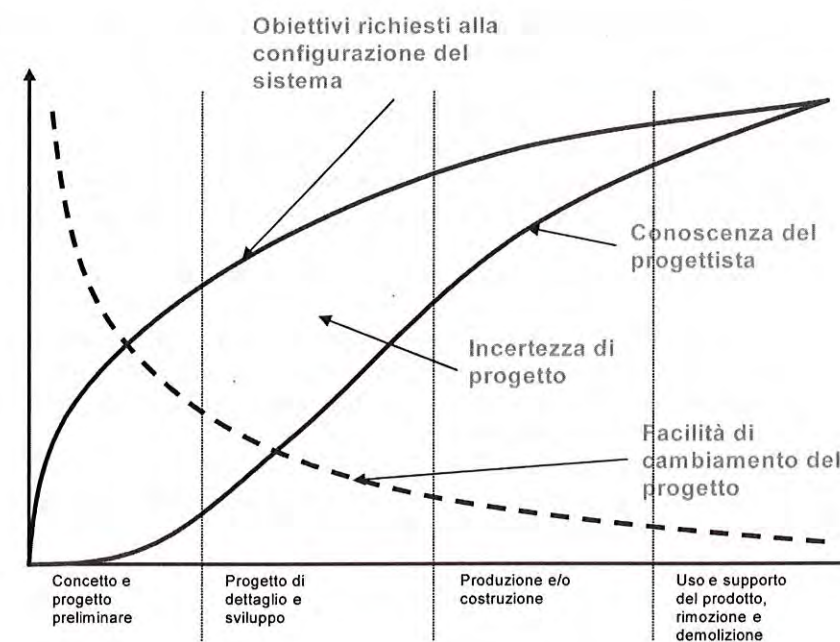


Figura 14.2 Andamento dell'incertezza.

Nel caso della affidabilità [2], l'incertezza è anche dovuta al fatto che i guasti sono comunque eventi rari, e quindi una raccolta di dati sufficienti su cui poter basare statisticamente una probabilità di guasto risulta spesso difficoltosa. Inoltre, nel caso dell'inizio di un progetto, mancando i dati da campo, i tassi di guasto possano essere solamente stimati, spesso in base a un principio di analogia con prodotti similari.

La logica fuzzy, tenendo conto della imprecisione comunemente presente e delle approssimazioni fatte nelle analisi, aiuta a ristabilire l'integrità nelle analisi ingegneristiche, accettando l'incertezza come proprietà del sistema e non forzando la precisione laddove questa non sia possibile.

## 14.1 Gli insiemi fuzzy

Un insieme  $A$  di oggetti in un universo  $X$  è definito come l'insieme degli elementi di  $X$  che soddisfano la proprietà di appartenenza stabilita per  $A$ . Gli elementi di un insieme fuzzy possono variare con continuità il loro grado di appartenenza all'insieme, passando dalla totale appartenenza alla non appartenenza.

Il tipo di funzione di appartenenza è del tutto soggettivo, nel senso che dipende dal tipo di fenomeno che si sta descrivendo. Come costruire tale funzione, dunque, va valutato caso per caso: in alcuni frangenti si usa ricorrere all'esperienza maturata in un dato settore, oppure si possono porre a base della definizione della funzione taluni vincoli o regole; va detto che in alcuni casi può essere un'operazione alquanto complessa, tanto da scoraggiare il ricorso alla logica sfumata e suggerire, viceversa, altre modalità di valutazione del fenomeno.

La funzione di appartenenza  $\mu(x)$ , dà il grado di appartenenza per ogni elemento  $x \in X$ . Si indica con  $\mu(x) \in [0, 1]$  dove 0 implica l'appartenenza nulla e 1 l'appartenenza totale all'insieme  $A$ .

La letteratura fuzzy dà un nome a questi ultimi tipi di insiemi limite in cui la funzione appartenenza assume i valori 0 e 1, essi sono detti *insiemi crisp* e conseguentemente la logica fondata su di essi si chiama *logica crisp*. L'idea che segue da queste prime definizioni è che gli insiemi crisp rappresentino un caso particolare della più generale logica fuzzy.

Un insieme fuzzy  $A$  è contenuto in un insieme fuzzy  $B$ ,  $A \subseteq B$ , se  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  per ogni  $x \in X$ .

L'uso di una scala numerica per il grado di appartenenza costituisce una rappresentazione utile, infatti un grado esatto di appartenenza in genere non esiste; inoltre in molte applicazioni, fra cui certe analisi del rischio, questo ordine risulta essere più importante del valore esatto di appartenenza.

Nella definizione degli insiemi fuzzy, risulta importante allora la conoscenza degli *insiemi  $\alpha$ -cut*, ovvero quel sottoinsieme di elementi di un insieme fuzzy che hanno un grado di appartenenza maggiore o uguale ad  $\alpha$ :

$$A_\alpha = \{x | x \in X \text{ e } \mu(x) \geq \alpha\}$$

Un insieme fuzzy è costituito dunque da tutti i suoi  $\alpha$ -cut.

È possibile definire alcuni operatori specifici per gli insiemi fuzzy, analogamente a quanto si ha per la teoria generale degli insiemi (Tabella 14.1).

Tabella 14.1 Operatori insiemi fuzzy

Nome	Operatore
Minimo	$i(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Massimo	$u(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Prodotto algebrico	$i(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x)\mu_B(x)$
Somma algebrica	$u(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)$
Differenza confinata	$i(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \max(0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1)$
Somma confinata	$u(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(1, \mu_A(x) + \mu_B(x))$
Prodotto drastico	$i(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \begin{cases} \mu_A(x) & \text{se } \mu_B(x) = 1 \\ \mu_B(x) & \text{se } \mu_A(x) = 1 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$
Somma drastica	$u(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \begin{cases} \mu_A(x) & \text{se } \mu_B(x) = 0 \\ \mu_B(x) & \text{se } \mu_A(x) = 0 \\ 1 & \text{altrimenti} \end{cases}$

Si può notare che quanto vale per gli insiemi vale anche per le proposizioni, quindi si può "sfumare" anche il grado di verità di una affermazione, e a questo è legato uno degli elementi maggiormente noti della logica fuzzy.

## 14.2 Aritmetica fuzzy

Per semplicità i numeri fuzzy sono spesso rappresentati con una funzione di appartenenza triangolare. La larghezza della funzione di appartenenza, mostra il range dei valori possibili, per esempio in Figura 14.3 si trova che il numero rappresentato può essere interpretato come variabile fra 3 e 7 e maggiormente vicino a 5.

La difficoltà può essere legata alla possibilità di definire la funzione caratteristica di appartenenza, che è anche caratterizzata da una componente di soggettività.

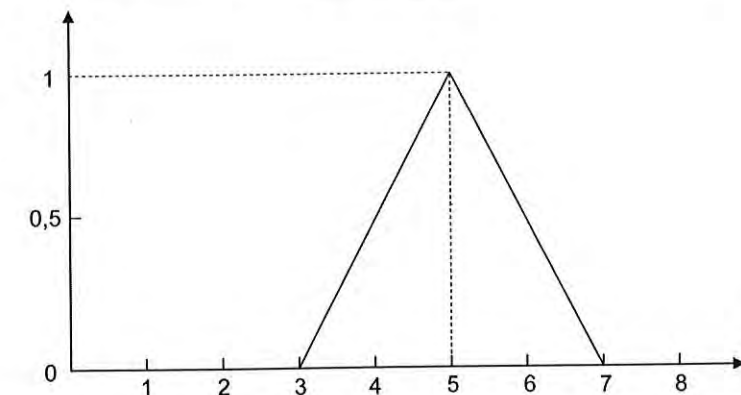


Figura 14.3 Rappresentazione numero fuzzy vicino a 5.

Di seguito si riportano alcune operazioni aritmetiche di base, tenendo presente che tali operazioni, fatte su numeri fuzzy sono valide e riferibili a un qualunque  $\alpha$ -cut.

$$A_\alpha + B_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] + [b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [a_1^\alpha + b_1^\alpha, a_2^\alpha + b_2^\alpha] = [c_1^\alpha, c_2^\alpha]$$

$$A_\alpha - B_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] - [b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [a_1^\alpha - b_2^\alpha, a_2^\alpha - b_1^\alpha] = [c_1^\alpha, c_2^\alpha]$$

$$A_\alpha \times B_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] \times [b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [\min(a_1^\alpha b_1^\alpha, a_1^\alpha b_2^\alpha, a_2^\alpha b_1^\alpha, a_2^\alpha b_2^\alpha), \max(a_1^\alpha b_1^\alpha, a_1^\alpha b_2^\alpha, a_2^\alpha b_1^\alpha, a_2^\alpha b_2^\alpha)] = [c_1^\alpha, c_2^\alpha]$$

$$A_\alpha / B_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] / [b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [\min(a_1^\alpha / b_1^\alpha, a_1^\alpha / b_2^\alpha, a_2^\alpha / b_1^\alpha, a_2^\alpha / b_2^\alpha), \max(a_1^\alpha / b_1^\alpha, a_1^\alpha / b_2^\alpha, a_2^\alpha / b_1^\alpha, a_2^\alpha / b_2^\alpha)] = [c_1^\alpha, c_2^\alpha]$$

$$1/B_\alpha = 1/[b_1^\alpha, b_2^\alpha] = [\min(1/b_2^\alpha, 1/b_1^\alpha), \max(1/b_2^\alpha, 1/b_1^\alpha)] = [c_1^\alpha, c_2^\alpha]$$

$$A_\alpha \pm k = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] \pm k = [a_1^\alpha \pm k, a_2^\alpha \pm k] = [c_1^\alpha, c_2^\alpha]$$

$$A_\alpha \times k = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] \times k = [\min(ka_1^\alpha, ka_2^\alpha), \max(ka_1^\alpha, ka_2^\alpha)] = [c_1^\alpha, c_2^\alpha]$$

Nell'ipotesi in cui  $a_1^\alpha, a_2^\alpha, b_1^\alpha, b_2^\alpha, k \geq 0$ , si possono fare le seguenti semplificazioni

$$A_\alpha \times B_\alpha = [a_1^\alpha b_1^\alpha, a_2^\alpha b_2^\alpha]$$

$$A_\alpha / B_\alpha = [a_1^\alpha / b_2^\alpha, a_2^\alpha / b_1^\alpha]$$

$$1/B_\alpha = [1/b_2^\alpha, 1/b_1^\alpha]$$

$$A_\alpha \times k = [ka_1^\alpha, ka_2^\alpha]$$

Spesso la moltiplicazione, divisione e inversione di numeri fuzzy aventi una distribuzione triangolare non danno un risultato triangolare.

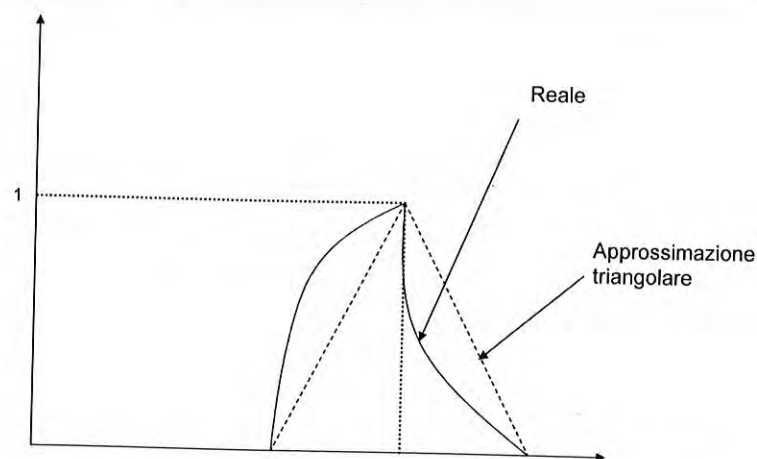


Figura 14.4 Approssimazione dei numeri fuzzy con distribuzione triangolare.

Il risultato comunque può essere di solito approssimato da un numero fuzzy triangolare avente lo stesso valore nominale (corrispondente a  $\mu = 1$ ) e che copre lo stesso range del valore reale; soltanto il grado di appartenenza di alcuni punti all'interno dell'intervallo risulta cambiato. Questa approssimazione semplifica l'aritmetica fuzzy, specialmente se questo calcolo deve essere fatto manualmente (Figura 14.4).

Nel caso di numeri fuzzy rappresentanti delle probabilità, così come avviene negli studi affidabilistici, tali numeri saranno molto vicini a 0, e pertanto sarà utile una scala delle ascisse di tipo logaritmico. Questa trasformazione però rende semilogaritmiche le funzioni di appartenenza e complica la fase di calcolo.

Quando le operazioni aritmetiche vengono effettuate su numeri fuzzy a distribuzioni non triangolari, è di solito necessario prendere una serie di  $\alpha$ -cut per poter determinare il risultato.

### 14.3 Probabilità di eventi fuzzy

La probabilità di un guasto può essere una variabile linguistica, che assume i valori *remoto*, *basso*, *moderato*, *alto* e *molto alto*. Ognuno di questi termini può essere definito come un insieme fuzzy i cui membri sono probabilità di guasto.

Dalla Figura 14.5 si può notare come anche siano possibili sovrapposizioni fra i vari numeri corrispondenti ai valori delle variabili.

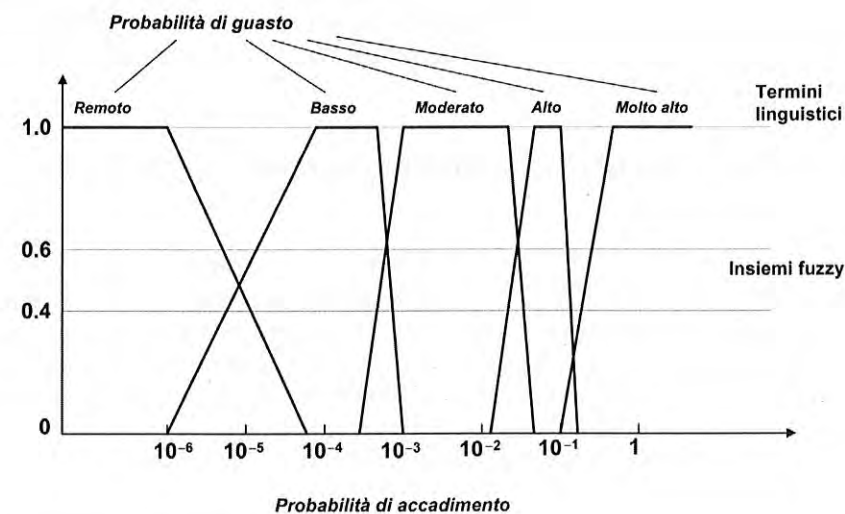


Figura 14.5 Definizione delle probabilità di guasto.

### 14.4 La logica fuzzy applicata all'analisi di affidabilità

È noto che l'affidabilità di sistemi può essere determinata a partire da una schematizzazione secondo configurazioni serie e parallelo.

Un sistema costituito da componenti in parallelo, funziona fino a che almeno uno dei componenti funziona; si indica allora con  $F_i$  la probabilità di guasto di un componente, con  $R_i$  la sua affidabilità, con  $F_{sys}$  la probabilità di guasto del sistema e con  $R_{sys}$  l'affidabilità del sistema.

Nell'ipotesi in cui i componenti siano in questa configurazione e il sistema presenti due stati: funzionante o guasto, la probabilità di guasto del sistema  $F_{sys}$  è il prodotto delle singole probabilità di guasto dei componenti:

$$F_{sys} = F_1 \times F_2 \dots \times F_n$$

Nel caso di un sistema costituito da componenti in serie, invece affinché il sistema funzioni occorre che ogni singolo componente sia funzionante. Come noto dunque la probabilità di guasto del sistema assume la seguente forma:

$$F_{sys} = 1 - [(1 - F_1)(1 - F_2) \dots (1 - F_n)]$$

Sebbene l'equazioni siano esatte, non risultano esatti i valori che vi compaiono e pertanto la logica fuzzy fornisce un modo intuitivo per tenere conto della incertezza, trattando la probabilità di guasto come un numero fuzzy.

Questo consente all'analista di specificare un intervallo avente un range di valori con associata una certa distribuzione di probabilità di guasto. Se per esempio legghiamo una funzione di appartenenza triangolare con l'intervallo, assumiamo in questo modo che l'analista ha una maggiore confidenza e che il parametro vero si trova vicino al centro dell'intervallo piuttosto che alle sue estremità.

Le operazioni aritmetiche da utilizzare nell'ambito di questi calcoli sono quelle viste in precedenza e possono essere estese anche agli altri metodi comunemente utilizzati nelle analisi affidabilistiche e nelle quali entrano in gioco stime probabilistiche e grandezze statistiche poco precise.

## 14.5 Un sistema di controllo diagnostico basato sulla logica fuzzy

La definizione di un algoritmo fuzzy può servire a modellizzare un fenomeno, per esempio per la previsione dei segnali, per la diagnostica dei sistemi, per la valutazione dei rischi, per il monitoraggio puntuale del funzionamento dei sistemi ecc. Applicazioni già commercializzate si hanno nel campo della produzione del cemento, delle telecomunicazioni, della gestione dei processi produttivi, degli impianti solari, degli impianti ascensore, della raffinazione dei combustibili ecc.

I passi che si prevede di dovere percorrere allo scopo di realizzare un modello fuzzy sono i seguenti:

1. definizione dell'insieme di regole che influenzano lo sviluppo del fenomeno, ovvero la cosiddetta base di conoscenza del modello;
2. individuazione dei fenomeni che interessa monitorare e/o modellizzare;
3. sintesi delle conclusioni che influenzano le decisioni;
4. programmazione del modello fuzzy (modulo fuzzy, motore fuzzy, modulo defuzzy).

A titolo di esempio, si consideri il caso in cui si intenda sottoporre a controllo dia-

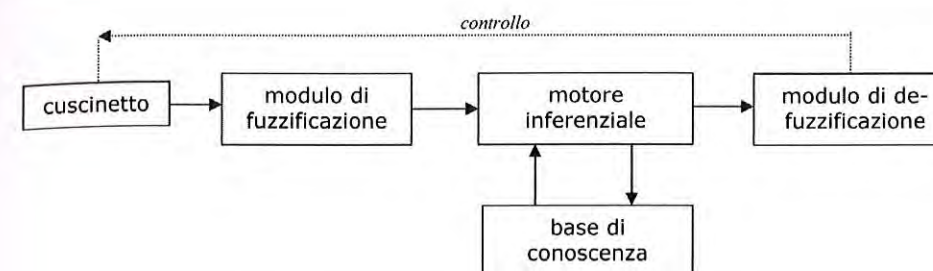


Figura 14.6 Esempio di sistema di controllo fuzzy.

gnostico fuzzy il funzionamento di un cuscinetto volvente, al fine di prevenire opportunamente il verificarsi di condizioni critiche di funzionamento, attraverso il monitoraggio di due parametri tipici, come la temperatura,  $T$ , e la velocità di esercizio,  $V$ .

Lo schema a blocchi del controllore è rappresentato nella Figura 14.6.

Innanzitutto, come anticipato, occorre definire la base di conoscenza che influenza il comportamento del componente meccanico inserito in un dato sistema, ovvero le regole. Si supponga, per esempio, che la temperatura  $T$  sia una variabile fuzzy suscettibile di assumere valori numerici nell'intervallo  $[0, 100]$  e che, dal punto di vista linguistico, ovvero della logica sfumata, possa assumere i valori "temperatura bassa" ( $TB$ ), "temperatura media" ( $TM$ ) e "temperatura alta" ( $TA$ ). Analogamente, la velocità  $V$  può essere riguardata come una variabile sfumata suscettibile di assumere valori numerici nell'intervallo  $[0, 80]$  e i seguenti valori linguistici: "velocità ridotta" ( $VR$ ), "velocità nominale" ( $VN$ ) e "velocità superiore" ( $VS$ ). L'andamento delle funzioni di appartenenza delle due variabili potrebbe essere quello rappresentato nelle Figure 14.7 e 14.8. La terza variabile fuzzy che si introduce, in-

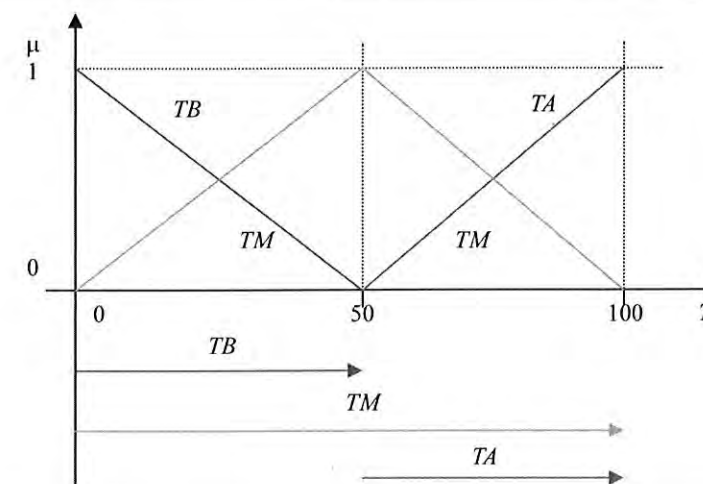


Figura 14.7 Membership function ( $\mu$ ) della temperatura  $T$ .



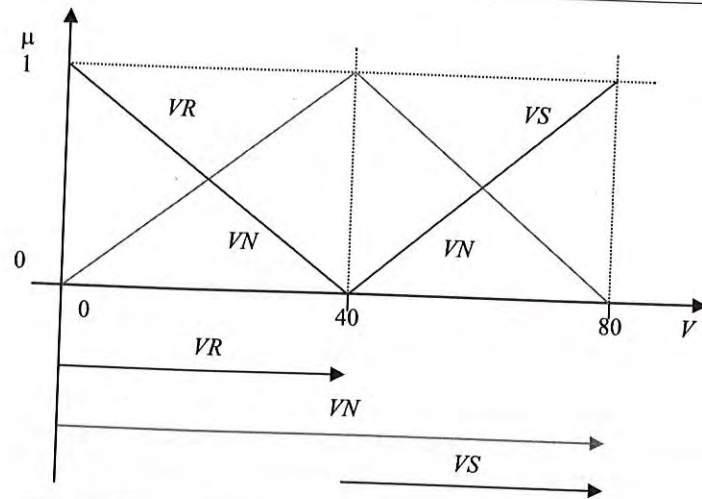


Figura 14.8 Membership function ( $\mu$ ) della velocità  $V$ .

fluenzata dalla due precedenti, è quella che descrive lo stato del cuscinetto, suscettibile di assumere i valori linguistici “cuscinetto molto sotto-utilizzato” ( $CMS$ ), “cuscinetto sotto-utilizzato” ( $CS$ ), “cuscinetto nella norma” ( $CN$ ), “cuscinetto in condizioni critiche” ( $CC$ ) e “cuscinetto in condizioni iper-critiche” ( $CSC$ )

Per definire lo stato del cuscinetto e il relativo diagramma della funzione di appartenenza, occorre, a questo punto, definire la regola che lega i tre parametri. Allo scopo, si può fare riferimento alla matrice di correlazione presentata nella Tabella 14.2; da questa segue il diagramma della funzione di appartenenza di Figura 14.9, nel quale si è supposto che l'indice di stato del cuscinetto,  $C$ , possa assumere valori nell'intervallo  $[0, 60]$ .

Tabella 14.2 Matrice di correlazione per la definizione della regola fuzzy

Velocità \ Temperatura	VR	VN	VS
TB	CMS	CS	CN
TM	CN	CN	CC
TA	CC	CC	CSC

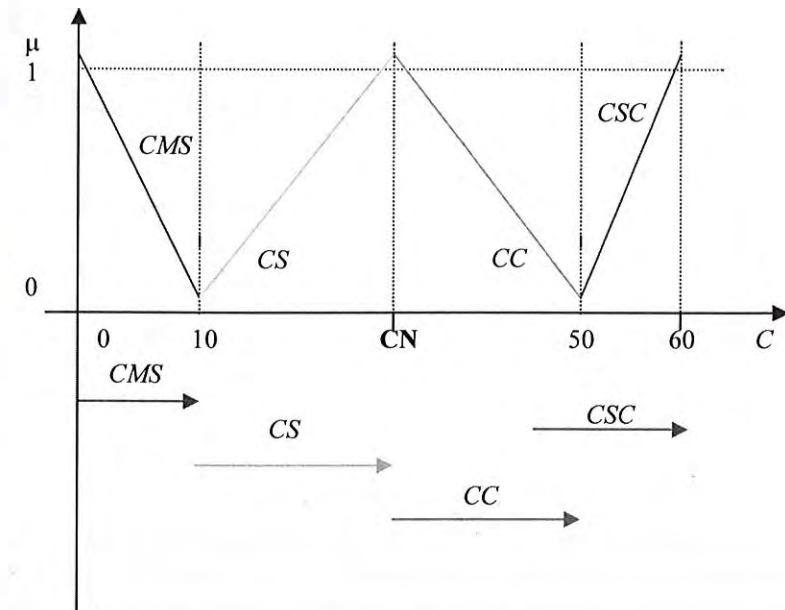


Figura 14.9 Esempio di membership function ( $\mu$ ) per l'indice di stato del cuscinetto  $C$ .

Riferimenti bibliografici

- [1] The MathWorks, *Fuzzy Logic Toolbox*.
- [2] J. B. Bowles, *Applying Fuzzy Logic to the Design Process*, 2002 Annual Reliability and Maintainability Symposium.
- [3] L.A. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Information and control*, n. 8 pp. 338-353, 1965.
- [4] L.A. Zadeh, “Making computers think like people”, *Spectrum IEEE*, pp. 26-32, 1984.
- [5] M. Marseguerra, E. Zio, P. Baraldi, A. Oldrini, *Early fault detection by fuzzy logic*, SMORN VIII A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics, Goteborg, Sweden, 27-31 May 2002.

# 15

## Algoritmi genetici

La teoria evuzionistica dei sistemi biologici lega le possibilità di sopravvivenza di un individuo principalmente alla sua capacità di adattamento all'ambiente (*fitness*). I mezzi che in ciascun individuo caratterizzano tale capacità risiedono nel suo patrimonio genetico, cioè in un insieme di informazioni ereditate anzitutto da padre e madre e successivamente sottoposte parzialmente a un processo di cambiamento casuale (mutazione genetica) per far in modo che ognuno abbia una identità propria, distinta da quella dei genitori.

In natura gli individui più deboli, meno idonei a far fronte all'ambiente, muoiono in genere prima degli altri e perciò si riproducono di meno; quelli più forti sopravvivono generalmente più a lungo e si riproducono maggiormente trasmettendo il loro patrimonio genetico.

L'effetto di questo processo è una più diffusa trasmissione delle caratteristiche migliori che, su tempi lunghi, porta automaticamente all'evoluzione della specie e all'esistenza di generazioni in possesso di capacità di adattamento all'ambiente sempre maggiori.

Gli individui della popolazione più idonei avranno la possibilità di generare altri individui con le caratteristiche del padre e della madre, ma comunque modificate dal processo di mutazione genetica. Quest'ultima potrà anche non essere migliorativa, ma in questi casi il nuovo individuo nato, sarà destinato a una minore proliferazione e a una morte precoce per effetto del principio della selezione naturale.

Questi principi sono tradotti in procedure informatizzate con le quali è possibile analizzare e progettare sistemi caratterizzati da una elevata complessità.

Gli algoritmi genetici sono algoritmi di ricerca, basati sulle regole della selezione e della genetica naturale. Essi combinano il principio di sopravvivenza del migliore con uno scambio strutturato e casuale di informazioni, in modo da costituire un algoritmo di ricerca di tipo innovativo.

Il principio si basa sul concetto che in ogni generazione, un nuovo insieme di creature artificiali (denominate *stringhe*), viene creato utilizzando pezzi e parti del migliore della vecchia generazione.

Sebbene si tratti di algoritmi casualizzati, gli algoritmi genetici non sono semplicemente percorsi random. Nella ricerca essi rappresentano uno strumento per la determinazione del massimo di una assegnata funzione a valori reali e non negativa, chiamata appunto *funzione obiettivo* o *fitness*.

La terminologia associata all'uso degli algoritmi genetici rispecchia quella utilizzata in biologia; infatti nel problema della massimizzazione di una funzione obiettivo, le soluzioni candidate sono chiamate *cromosomi* e sono formate da una stringa di variabili, proprio come in biologia gli individui sono identificati da cromosomi, formati da sequenze di basi; il cromosoma è suddiviso in geni che formano il genotipo e la cui decodifica in numeri reali, detti fattori di controllo, costituisce il *fenotipo* del cromosoma. Si può dunque affermare che il codice genetico presente in un individuo è chiamato genotipo, mentre la manifestazione dei caratteri codificati in tale codice è detta fenotipo. I fattori di controllo rappresentano i valori delle variabili da cui dipende la funzione obiettivo e consentono la valutazione di tale funzione in corrispondenza di un determinato cromosoma.

La fitness del cromosoma dà un'indicazione della bontà della soluzione codificata nel cromosoma, e quindi considerando gli  $n$  fattori di controllo di un individuo come variabili indipendenti, una popolazione può essere vista come una collezione di punti; a ciascun punto sono associati un numero e la fitness dell'individuo corrispondente, che ne indica la bontà della soluzione.

La ricerca della soluzione ottimale attraverso l'uso degli algoritmi genetici avviene attraverso l'esame di successive generazioni di popolazioni di cromosomi, che evolvono in modo tale che "sperabilmente" ogni generazione futura sia caratterizzata da una fitness maggiore rispetto alle precedenti.

Il parallelismo esistente [3] fra la ricerca biologica e le applicazioni ingegneristiche, riguardo al "calcolo evuzionistico", può essere riassunto con la Figura 15.1.

Gli algoritmi genetici sono stati sviluppati da John Holland e dai suoi colleghi e studenti dell'Università del Michigan.

Gli obiettivi della loro ricerca erano essenzialmente due:

- astrarre e spiegare in modo rigoroso i processi di adattamento dei sistemi naturali;
- progettare sistemi software artificiali per la riproduzione di importanti meccanismi di funzionamento dei sistemi naturali.

Tale approccio ha condotto a importanti scoperte sia nell'ambito delle scienze naturali sia in quello dei sistemi artificiali.

Una caratteristica dominante nello sviluppo degli algoritmi genetici è connessa al concetto di robustezza, ovvero all'equilibrio fra efficienza ed efficacia, necessario a un individuo per sopravvivere in molti ambienti differenti.

Se con l'uso di tecniche avanzate di ricerca come gli algoritmi genetici, i sistemi artificiali possono essere progettati più robusti, allora potranno essere ridotte o eliminate successive riprogettazioni, in genere molto costose; inoltre se i sistemi artificiali presentano anche una maggiore capacità di adattamento, allora saranno in grado di svolgere le proprie funzioni più a lungo e meglio.

Tutte queste caratteristiche sono presenti nei sistemi naturali e gli algoritmi genetici hanno l'obiettivo di riprodurli a seguito proprio di un'osservazione dei sistemi biologici.

<i>Biologia</i>	<i>Ingegneria</i>
Individuo	Soluzione di un problema
Popolazione	Insieme di soluzioni
Fitness	Qualità di una soluzione
Cromosoma	Rappresentazione di una soluzione
Gene	Componente di una rappresentazione
Crossover Mutazione	Operatori per la ricerca di soluzioni
Selezione Naturale	Riutilizzo di buone soluzioni

Figura 15.1 Confronto fra concetti di biologia e concetti di ingegneria.

In generale tutti gli algoritmi genetici si presentano semplici e rapidi da un punto di vista elaborativo, ma al tempo stesso molto potenti e per questo stanno iniziando a diffondersi in modo sempre più ampio anche nella ricerca finanziaria, tecnologica e industriale, anche perché essi non richiedono assunzioni restrittive circa lo spazio di ricerca (continuità, esistenza di derivate ecc.).

È possibile affermare che gli algoritmi genetici si distinguono dai metodi tradizionali di ottimizzazione per alcuni aspetti che possono essere così riassunti:

- non risentono del numero di variabili e per questo sono spesso utilizzati in problemi in cui la funzione obiettivo dipende da un numero elevato di parametri (maggiore di 5);
- la ricerca della soluzione non presuppone alcun tipo di non linearità, eventualmente anche sotto forma di vincoli;
- lavorano con i codici dell'insieme dei parametri e non direttamente con i parametri;
- ricercano una popolazione di punti e non un singolo punto;
- utilizzano una sola funzione di valutazione (funzione obiettivo) e non funzioni matematiche come le derivate o altre conoscenze ausiliarie;
- utilizzano regole di transizione probabilistiche e non regole deterministiche.

Gli algoritmi genetici necessitano unicamente di una valutazione del valore della funzione obiettivo, associato a ogni singola stringa. Il meccanismo di un semplice algoritmo genetico coinvolge unicamente operazioni di duplicazione e parziali sovrapposizioni di stringhe.

Un algoritmo genetico in grado di fornire risultati in molti problemi pratici è basato sull'uso di tre operatori fondamentali: *riproduzione*, *interazione* e *mutazione*.

Si consideri per esempio una popolazione di  $n$  stringhe definite su un certo alfabeto: in tale modo si codifica una idea completa o le prescrizioni per eseguire un particolare compito (in questa maniera ogni stringa rappresenta una idea completa). Le sottostringhe di ogni stringa, a loro volta, conterranno informazioni caratterizzanti il compito da svolgere.

Da questo punto di vista, la popolazione di  $n$  stringhe non contiene  $n$  stringhe, ma una moltitudine di nozioni e riarrangiamenti di nozioni relativamente a quel particolare compito.

Gli algoritmi genetici esplodono tale insieme di informazioni:

- riproducendo nozioni di alta qualità in accordo con le prestazioni o il compito da svolgere;
- mescolando queste nozioni con molte altre di alto livello associate ad altre stringhe.

La prima verifica è dunque relativa alla esistenza di similarità tra stringhe di una determinata popolazione, successivamente poi si rilevano le relazioni casuali tra tali similarità.

Un algoritmo genetico può essere realizzato attraverso una sequenza di passi corrispondenti a quelli indicati:

- creare una popolazione iniziale;
- valutare tutti gli individui di tale popolazione;
- selezionare una nuova popolazione da quella precedentemente costituita, basata sulla idoneità degli individui;
- applicare alcuni operatori genetici (incroci e mutazioni) ai membri della popolazione per creare nuove soluzioni.

## 15.1 Principi di base degli algoritmi genetici

Prima dell'avvento degli algoritmi genetici nell'ambito della ricerca nei sistemi artificiali, molti biologi utilizzavano computer digitali per effettuare simulazioni dei sistemi genetici.

Una prima applicazione di questa impostazione è riconducibile a Fraser, il quale simulò l'evoluzione delle generazioni di stringhe future e calcolò la percentuale di individui con fenotipi accettabili a seguito di successive generazioni [1]. A partire da questa applicazione di tipo prettamente biologico, Holland all'inizio degli anni '60 del secolo scorso pensò di utilizzare gli operatori di tipo genetico nello studio del fenomeno dell'adattamento dei sistemi artificiali.

Holland infatti affermò che:

*L'analisi dell'adattamento coinvolge lo studio sia di un sistema adattabile sia dell'ambiente all'interno del quale si trova. In altri termini si tratta di uno studio su come i sistemi possono generare procedure che consentano loro di adattarsi in modo efficiente al loro ambiente.*

*Se l'adattabilità non viene limitata in modo arbitrario, un sistema adattabile deve essere in grado di generare qualsiasi metodo o procedura capace di una soluzione efficace.*

Holland non si pose l'obiettivo unicamente di creare un altro metodo per la risoluzione di questo o di quel problema di ottimizzazione, ma riconobbe anche il ruolo fondamentale della *selezione innaturale* (sopravvivenza artificiale dei più adattabili), in qualunque tipologia di macchina, impianto o programma che possa essere progettato.

*L'adattamento è dunque basato su una selezione differenziata di programmi di supervisione. Questo significa che tanto più si può fare affidamento su un programma di supervisione, in merito alla capacità di produrre soluzioni da parte dei suoi programmi di risoluzione dei problemi, tanto più predominante diventerà (numericamente) in una popolazione di programmi di supervisione.*

In queste parole si trova fra l'altro quanto accennato in precedenza relativamente alla caratteristica degli algoritmi genetici: di essere non un approccio puntuale ma orientato all'analisi di una popolazione.

È interessante notare come in questi primi scritti di Holland sui sistemi adattabili vi sia solo un riferimento all'importanza di operatori come il crossover, o altri operatori di ricombinazione genetica.

Il primo riconoscimento della rilevanza di questi ultimi operatori, risale al 1965:

*Ci sono comunque molte tecniche generali oltre a quelle di Samuel per la generazione di sequenze successive di funzioni su un insieme di base. Dato un qualsiasi insieme di partenza, queste tecniche, strettamente legate ai fenomeni di interazione come il crossover, linkage, dominanza nei sistemi genetici, portano molto vicino all'ottimizzazione su una più ampia classe di ambienti.*

La prima menzione delle parole "algoritmi genetici" e la prima applicazione pubblicata del metodo, risale al 1967 e fu fatta da Bagley.

In quel periodo vi era un grande interesse nei programmi di giochi, e in quello spirito Bagley, partendo dal gioco di Hexapawn (un semplice gioco simile agli scacchi, il quale fu progettato da Martin Gardner e riportato in "Mathematical Games", *Scientific American*, nel marzo 1962) costruì gli algoritmi genetici per ricercare gli insiemi di parametri nella valutazione delle funzioni del gioco e le paragonò ad altre tecniche di ricerca risalenti al quel periodo (gli algoritmi di correlazione, le procedure di apprendimento modellizzate dopo gli algoritmi di cambiamento dei pesi).

Senza sorpresa, Bagley trovò che gli algoritmi di correlazione richiedevano un buon equilibrio, fra la non linearità del gioco e la non linearità dell'algoritmo di correlazione, ma dall'altro lato l'algoritmo genetico di Bagley era insensibile alla non linearità del gioco e funzionava bene per diversi ambienti.

Bagley costruì quindi gli operatori di riproduzione, crossover e mutazione; inoltre egli utilizzò anche la dominanza e l'inversione, ovvero operatori di tipo avanzato.

Inoltre Bagley utilizzò alfabeti non binari nella codifica delle stringhe; la cosa da fare notare è che comunque Bagley non ebbe alcun accesso alla teoria di Holland.

Un'area in cui fu focalizzato lo studio di Bagley fu la definizione degli operatori di riproduzione e selezione, in merito a questo infatti introdusse un meccanismo di *ordine dell'adattamento*, concetto ancora oggi utilizzato.

## 15.2 Principali settori di applicazione degli algoritmi genetici

L'utilizzo di questo metodo si è andato diffondendo in modo molto consistente, negli ultimi anni, grazie alla sua notevole flessibilità [8].

Alcune applicazioni possono risultare molto originali, altre invece costituiscono ormai quasi una prassi operativa:

- *musica*: in questo ambito, gli algoritmi genetici sono utilizzati in applicazioni anche molto differenti, per esempio si realizzano modelli di composizione musicale basati su algoritmi genetici per la determinazione di una base armonica e ritmica, a partire da una conoscenza delle interazioni fra strumenti differenti [9];
- *applicazione ai sistemi informatici*: le configurazioni delle reti di computer, distribuite sul territorio, sono spesso progettate attraverso l'adozione degli algoritmi genetici, utilizzando tre differenti funzioni obiettivo, per ottimizzare i parametri affidabilistici della rete, caratterizzati da diametro, distanza media e affidabilità della rete di computer. Algoritmi di questo tipo, sono stati testati per reti sull'ordine dei 100 nodi;
- *applicazioni finanziarie*: modelli per l'allocazione dell'assetto tattico e per la definizione di strategie di equilibrio internazionale sono stati migliorati attraverso l'impiego degli algoritmi genetici. In questi casi, la popolazione di individui può anche essere costituita da un insieme di operatori di Borsa, ciascuno differente dall'altro, la cui capacità di adattamento all'ambiente coincide con l'efficacia della sua strategia operativa;
- *previsione degli stock di mercato*: questi strumenti sono usati anche nella determinazione del livello di stock;
- *applicazioni in ambito militare*: in differenti settori militari gli algoritmi genetici sono stati impiegati, in particolare nella tecnologia radar.

## 15.3 Operatori principali

In una popolazione di  $N$  unità, sono destinati a morire sia gli individui che hanno raggiunto una certa età predefinita sia quelli la cui scarsa capacità di adattamento all'ambiente non è sufficiente ad assicurarne la sopravvivenza.

Quelli che sopravvivono si riproducono e quelli che vivono più a lungo, poiché più adattati all'ambiente, hanno una maggiore capacità di proliferare.

Supponiamo di considerare due individui genitori, ciascuno dei quali sia caratterizzato dalle seguenti caratteristiche genetiche:

$$\begin{aligned} &A_1, A_2, \dots, A_n \\ &B_1, B_2, \dots, B_n \end{aligned}$$

Il figlio con un processo casuale erediterà parte del patrimonio genetico dei genitori

$$A_1, B_2, B_3, \dots A_n$$

successivamente modificherà leggermente alcuni geni così che la sua personalità finale sarà diversa da quella corrispondente alla semplice "somma" di parte dei geni del padre e di parte dei geni della madre e ciò per effetto della mutazione che in questo caso sarà positiva.

Il figlio dovrà comunque confrontarsi con l'ambiente e sarà la sua specifica capacità di adattamento a decretare la sua sopravvivenza fino alla vecchiaia, e quindi la riproduzione o la morte prematura per effetto della selezione.

È opportuno a questo punto descrivere quelli che sono gli operatori genetici più comuni [7].

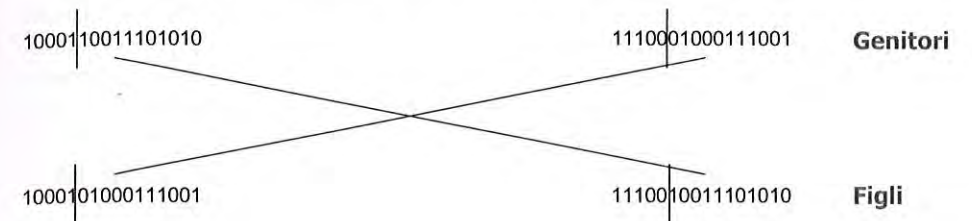
- **Riproduzione.** In una popolazione di  $M$  individui o soluzioni (generazione attuale) se ne scelgono (nei casi più comuni con probabilità proporzionale alla loro fitness) solo  $m < M$ , per la generazione successiva. In un algoritmo genetico, il gruppo selezionato per l'accoppiamento è chiamato mating pool; da questo gruppo vengono selezionate casualmente coppie di individui, che dovranno riprodursi. La selezione di individui in base alla loro fitness (probabilità di selezione proporzionale alla loro fitness), presenta alcuni aspetti negativi: se un individuo ha una fitness molto maggiore della media della popolazione, ma molto inferiore alla massima fitness possibile, tenderà a essere sempre selezionato, ma genererà una popolazione mediocre (convergenza prematura). Un secondo difetto è riconducibile al fenomeno della stagnazione in quanto dopo un certo numero di iterazioni tutti gli individui della popolazione avranno un buon valore di fitness e tenderanno a essere selezionati. Per ovviare a questi inconvenienti sono stati sviluppati altri criteri di riproduzione: *rank selection*, *tournament selection*, selezione elitista.
- **Mutazione.** Opera su una sola stringa  $A$  nel modo seguente: dopo aver scelto, in modo casuale, un indice  $k$  si sostituisce al simbolo corrispondente a tale posizione, un nuovo simbolo tratto in modo random dall'alfabeto dei geni. Si ottiene così per esempio la trasformazione.

$$001.011.101 \rightarrow 010.011.101$$

- **Crossover.** Questa operazione coinvolge due stringhe genitrici, dopo aver scelto in modo random un indice  $k$ , si effettua uno scambio di geni tale da produrre le stringhe figlie (*single point cross over*). Una variante di questa operazione sceglie in modo random due indici  $k$  e  $l$  ed effettua lo scambio (*two point crossover*). È possibile arrivare ad avere  $n$  - point cross over (Figura 15.2). Un terzo tipo di cross over che viene utilizzato nel caso di stringhe di tipo binario (contenenti cioè soltanto i valori 0 e 1) è costituito dall'*uniform cross over*

$$\begin{array}{ccc} 010.001.111 & & \\ \uparrow & \rightarrow & 010.100.111 \\ 010.100.101 & & \end{array}$$

### CROSSOVER SINGOLO PUNTO



### CROSSOVER DOPPIO PUNTO

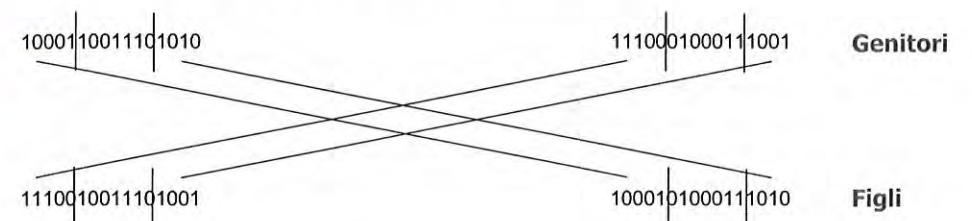


Figura 15.2 Esempi di single point e two point crossover.

Dopo avere definito alcuni operatori elementari, è possibile riepilogare un esempio di algoritmi genetici:

1. si ha una popolazione  $U$  di  $m$  stringhe, ordinate in funzione della loro fitness;
2. si sceglie con probabilità  $P_{mut}$  (molto piccola) un gene di una stringa e si opera la mutazione;
3. si scelgono due stringhe e si opera il cross-over;
4. si riordinano le stringhe in funzione della loro fitness e se ne scelgono  $m$ , con probabilità proporzionale alla fitness, costituendo così la nuova popolazione  $U$ ;
5. si ritorna al punto 1 fino a che non è stato soddisfatto un predefinito criterio di arresto (per esempio un numero massimo di iterazioni).

Un problema sarà dunque risolto con l'ausilio degli algoritmi genetici, nel caso in cui almeno una delle stringhe della popolazione finale costituisca una soluzione vicina all'ottimo assoluto.

Di fatto gli algoritmi genetici sono procedure di massimizzazione, quindi valori di fitness più alti sono associati a individui migliori.

## 15.4 Applicazione degli algoritmi genetici alle analisi affidabilistiche

In un progetto di ottimizzazione delle prestazioni tecnico-economiche di un sistema industriale complesso, entra in gioco un numero molto elevato di variabili e parametri caratteristici, per i quali sono presenti non linearità diffuse; in tali casi risulta molto difficile affrontare la determinazione della configurazione ottimale del sistema, per via analitica.

Nella ricerca di quest'ultima configurazione, si dovrà tenere conto delle prestazioni del sistema in diverse condizioni di progetto e di gestione logistica.

Come abbiamo visto l'impiego del metodo Monte Carlo, permette di analizzare il sistema modellizzato, prendendo in considerazione la modalità di invecchiamento dei componenti, le manutenzioni periodiche necessarie a contrastarne gli effetti, l'allocatione delle risorse rispetto alle priorità di intervento determinate.

Dal momento che i sistemi analizzati sono spesso caratterizzati da un valore molto alto della affidabilità, al fine di poter giungere a risultati statisticamente significativi, occorre simulare migliaia di storie. Per sistemi reali, tale soluzione può risultare di fatto impraticabile a causa della loro complessità e dimensione.

Un approccio proposto [6] è stato allora quello di ricorrere alle procedure di ricerca degli algoritmi genetici per esplorare in modo efficace lo spazio delle soluzioni.

La funzione obiettivo può essere rappresentata dal profitto, al netto delle spese di acquisto e gestione, ed è associata al funzionamento dell'impianto; essa risulta valutabile tramite la simulazione Monte Carlo.

Per ottenere risultati statisticamente significativi, in tempi contenuti, per ogni potenziale soluzione evidenziata dall'algoritmo genetico, si simula un numero limitato di storie Monte Carlo e si sfrutta il fatto che le soluzioni "buone" sono selezionate dagli algoritmi più volte durante l'evoluzione naturale della popolazione di soluzioni per accumulare risultati significativi da un punto di vista statistico.

## 15.5 Un esempio di codice

Gli algoritmi genetici si basano come si è visto su alcuni operatori di base molto semplici, con i quali è possibile andare a sviluppare processi di calcolo anche molto complessi.

A scopo di esempio sono riportati di seguito i listati di tre operatori principali: selezione, crossover, mutazione. Ciascuno di essi dipende da una scelta di tipo casuale; assumiamo l'esistenza di tre routine per la scelta casuale:

- *random*: fornisce un numero pseudorandom fra 0 e 1 (distribuzione uniforme sull'intervallo [0, 1]);
- *flip*: fornisce un valore booleano vero con una certa probabilità;
- *rnd*: fornisce un valore intero fra due limiti superiore e inferiore specificati.

A partire da questi listati è possibile impostare un algoritmo genetico di tipo generale, indipendentemente cioè dal suo campo di applicazione specifico.

```
function select (popsize: integer; sumfitness: real; var pop: population): integer
{ Select a single individual via roulette wheel selection }
var rand, partsum: real; { Random point on wheel, partial sum }
    j: integer; { population index }
begin
    partsum := 0.0; j := 0; { Zero out counter and accumulator }
    rand := random * sumfitness; { Wheel point calc. uses random number [0,1] }
    repeat { Find wheel slot }
        j := j+1;
        partsum := partsum + pop[j].fitness;
    until (partsum >= rand) or (j = popsize);
{ Return individual number }
    select := j;
end;
```

```
procedure crossover (var parent1, parent2, child1, child2, : chromosome; var lchrom, ncross, nmutation, jcross: integer; var pcross, pmutation: real);
```

```
{ Cross 2 parent strings, place in 2 child strings }
var j: integer;
begin
    if flip(pcross) then begin {Do crossover with p(cross)}
        jcross := rnd(1, lchrom-1); {Cross between 1 and 1-1}
        ncross := ncross + 1; {Increment crossover counter}
    end else {otherwise set cross site to force mutation}
        jcross := lchrom;
    {1st exchange, 1 to 1 and 2 to 2}
    for j := 1 to jcross do begin
        child1[j] := mutation(parent1[j], pmutation, nmutation);
        child2[j] := mutation(parent2[j], pmutation, nmutation);
    end
    {2nd exchange, 1 to 2 and 2 to 1}
    if jcross <> lchrom then {skip if cross site is lchrom-no crossover}
        for j := jcross + 1 to lchrom do begin
            child1[j] := mutation(parent2[j], pmutation, nmutation);
            child2[j] := mutation(parent1[j], pmutation, nmutation);
        end;
end;
```

```
function mutation (allelevel: allele; pmutation: real; var nmutation: integer): allele
{Mutate an allele w/ pmutation, count number of mutations}
var mutate: Boolean;
begin
    mutate := flip(pmutation); {Flip the biased coin}
    if mutate then begin
        nmutation := nmutation+1;
        mutation := not allelevel; {Change bit value}
    end;
```

```

end else
  mutation:= allelevel; {No change}
end;

```

### Riferimenti bibliografici

- [1] D.E. Goldberg, A. Wesley, *Genetic Algorithms*, New York, 1989.
- [2] Politecnico di Milano, *Ingegneria della conoscenza e sistemi esperti - Lez. 9 Evolutionary Computation*, 2001.
- [3] S. Cagnani, *Calcolo evoluzionistico*, Università di Parma, 2001.
- [4] B. Lazzerini, *Introduzione agli algoritmi genetici*, Università di Pisa, 2001.
- [5] D.W. Coit, A.E. Smith *Penalty guided genetic search for reliability design optimization*, University of Pittsburgh, 1996.
- [6] M. Marseguerra, E. Zio, *Algoritmi genetici e Monte Carlo: un connubio promettente per l'ottimizzazione di progetto e gestione logistica di impianto*, Politecnico di Milano, 1999.
- [7] C. Randieri, *Introduzione al Soft Computing*, Università di Catania, 2002.
- [8] Z. Javed, *Genetic Algorithms, a brief overview*, 2003.
- [9] A. Pazos, J. Dorado et al., *Genetic Music Compositor*, 2003.

Una delle aree di maggior sviluppo in intelligenza artificiale è lo studio e la progettazione di sistemi esperti (SE) (*Expert Systems o Knowledge-Based Systems*). La loro caratteristica fondamentale è la capacità di eseguire compiti, di solito eseguiti da una persona esperta, in un particolare dominio. L'esperto è colui che ha una notevole conoscenza ed esperienza in un ambito ben definito ed è in grado, in tale ambito, di dare risposte corrette. Il sistema esperto deve essere capace di emulare l'operato dell'esperto, in particolare deve essere in grado di compiere le stesse azioni, dare gli stessi giudizi, esibire le stesse spiegazioni.

In termini pratici, una delle caratteristiche più importanti di un sistema esperto è la capacità di spiegazione. Allo stesso modo in cui un esperto umano è capace di spiegare le proprie conclusioni e il ragionamento seguito, un sistema esperto dovrebbe essere capace di dare una spiegazione concisa o dettagliata che sia.

L'introduzione della espressione "sistema esperto" è datata 1977 a opera dello studioso Feigenbaum, che ne diede anche una definizione precisa:

*"Un sistema esperto è un programma di calcolatore, che usa conoscenze e tecniche di ragionamento per risolvere problemi che normalmente richiederebbero l'aiuto di un esperto. Un sistema esperto deve avere la capacità di giustificare o spiegare il perché di una particolare soluzione per un dato problema"*

### 16.1 Caratteristiche generali dei sistemi esperti

Le caratteristiche fondamentali di un sistema esperto sono riportate nella Tabella 16.1.

Le due caratteristiche principali che distinguono i sistemi esperti dai comuni programmi per calcolatore sono le seguenti:

- a) sono guidati dai dati e non da una procedura prefissata;
- b) fanno ricorso sistematico a tecniche euristiche.

**Tabella 16.1** Caratteristiche generali dei sistemi esperti

Caratteristica	Spiegazione
Possesso di conoscenza specifica	La bontà di un programma di intelligenza artificiale dipende non solo dal formalismo o dalla tecnica inferenziale utilizzata ma, principalmente, dalla conoscenza che il programma possiede. Come riportato da Waterman: "Per rendere un programma intelligente inserisci in esso molta conoscenza specifica, di alta qualità, riguardante un ben determinato dominio."
Capacità di ragionamento	La capacità di ragionamento sulla conoscenza è una delle caratteristiche dell'esperto. Egli ha una notevole perizia nell'usare le proprie conoscenze, effettua delle deduzioni e prende delle decisioni mediante un ragionamento basato sulla conoscenza.
Capacità di interazione con il mondo esterno	Un sistema esperto deve possedere un protocollo di comunicazione con il mondo esterno, per il reperimento di informazioni aggiuntive, necessarie per portare avanti il ragionamento, e per dare spiegazioni all'utente.
Capacità di delucidare il proprio operato	Il sistema deve essere in grado di spiegare il proprio comportamento. In particolare deve essere in grado di giustificare le proprie azioni e di esibire delle spiegazioni sulle conclusioni raggiunte.
Capacità di apprendimento	Questa caratteristica non è comune a tutti i sistemi esperti, ma è comunque interessante menzionarla. L'apprendimento di nuove esperienze e l'ampliamento della propria conoscenza sono alcune delle caratteristiche predominanti di un essere umano. L'esperto mediante il suo operato affina le proprie conoscenze e migliora la propria perizia nel raggiungimento della soluzione.
Aderenza del dominio alla realtà	Il dominio su cui il sistema esperto agisce non deve essere un modello semplificato del dominio reale ma deve rappresentarlo così com'è, pur ovviamente con alcuni limiti, ma mai ricorrendo a modelli eccessivamente astratti

Gli esperti usano in generale tecniche euristiche piuttosto che algoritmi. In un algoritmo si fissa lo scopo (o il tipo di risposta) e si compie una serie di passi che conduce al raggiungimento di quello scopo. Le tecniche di ragionamento, altresì, richiedono una soluzione che sia "adeguata" e non necessariamente "la risposta". Non ci sono regole per questo tipo di ragionamento. Il procedimento comporta la valutazione dei possibili output e il loro confronto con l'obiettivo; si riterrà, poi, vantaggioso perseguire quelle strade che sembrano portare a degli stati più vicini all'obiettivo. Se un percorso promettente porta in un vicolo cieco, può essere necessario tornare indietro (*back-track*) e provare un'alternativa diversa.

Tutti questi metodi di scelta basati sull'esperienza e la pratica sono appunto di tipo euristico.

In definitiva un SE simula l'esperto umano in modo più o meno grossolano, ma che si adatta comunque abbastanza bene a risolvere compiti ristretti, temporanei o secondari per i quali un professionista potrebbe impiegare tempi che vanno da alcu-

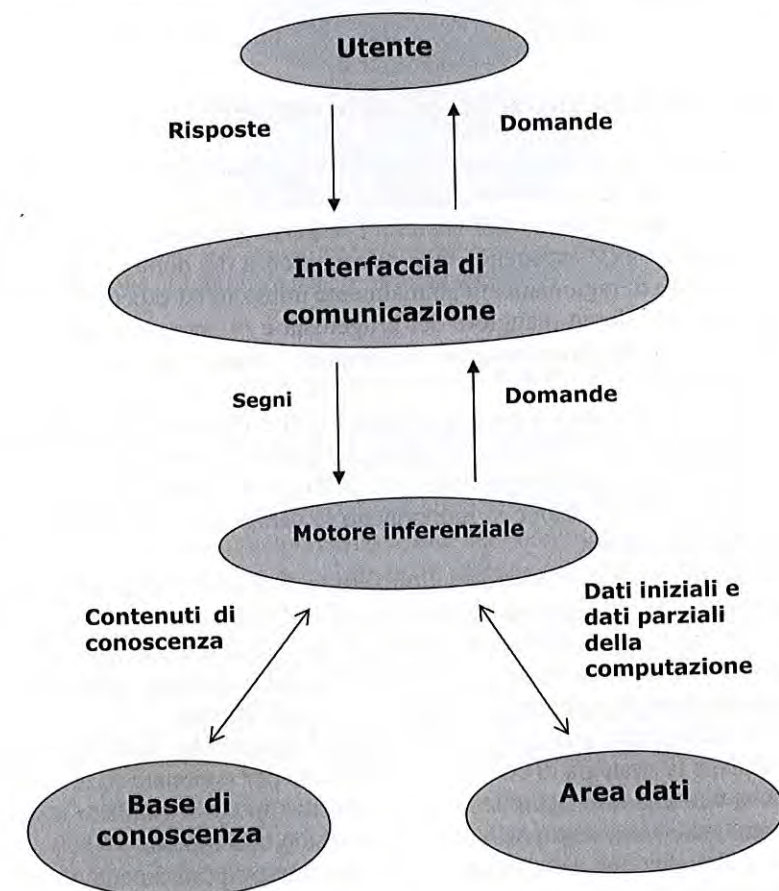
ni minuti ad alcune ore. In questa sede l'interesse rivolto verso tali sistemi è maggiore, rispetto agli altri cui si è accennato, in forza delle applicazioni già presenti in campo manutentivo, e per il ruolo di primo piano che queste tecniche cominciano a rivestire per la interpretazione dei dati nell'ambito della manutenzione predittiva e migliorativa.

## 16.2 Componenti di un sistema esperto

I componenti fondamentali di un sistema esperto sono (Figura 16.1):

- la base di conoscenza;
- il motore inferenziale.

Insieme racchiudono tutta l'esperienza del sistema: la conoscenza riguardante il dominio e il meccanismo di ragionamento.



**Figura 16.1** Componenti di un sistema esperto.



Nella base di conoscenza è immagazzinata tutta la conoscenza dell'esperto, mentre il motore inferenziale è la parte del sistema che lavora sulla conoscenza al fine di raggiungere le conclusioni. Esso porta avanti ragionamenti, seleziona le parti della conoscenza utili in un determinato momento, chiede l'interazione con l'utente. È la parte dinamica del sistema.

Tra le altre componenti di un SE vale la pena di menzionare i seguenti:

- a) l'area dati;
- b) l'interfaccia di comunicazione con l'utente.

Nell'area dati vengono memorizzate le informazioni di partenza, i risultati parziali della computazione nonché le informazioni aggiuntive che di volta in volta vengono richieste all'utente.

L'interfaccia di comunicazione offre la possibilità di interagire con l'utente. I moderni linguaggi di programmazione tra le altre cose, offrono gli strumenti per costruire interfacce grafiche *user friendly* semplici e chiare, idonee a una migliore comprensione da parte dell'utente.

### 16.3 Progettazione di un sistema esperto

La progettazione di un sistema esperto richiede una forte interazione tra il progettista e l'esperto. Lo scopo del primo è di riuscire a codificare nel sistema sia la conoscenza sia il meccanismo cognitivo dell'esperto. L'esperto deve individuare e definire in termini precisi la propria esperienza fatta di conoscenza del dominio, di regole euristiche, meccanismi di ragionamento abitualmente utilizzati ed espedienti per semplificare l'operato. Lo sforzo maggiore del progettista è di comprendere questa esperienza, attraverso un continuo scambio di domande e risposte con l'esperto, e di codificarla opportunamente.

Lo sviluppo di un sistema esperto (Figura 16.2) è un processo incrementale ed evolutivo in cui si individuano diverse fasi e che può essere riassunto in un processo di estrazione e in un altro di rappresentazione della conoscenza dell'esperto.

Nella fase di identificazione si individuano le caratteristiche del problema e gli elementi della conoscenza.

Nella fase di concettualizzazione, l'obiettivo è di identificare ed esplicitare i concetti chiave, e le relazioni tra gli elementi identificati nella prima fase. È la fase in cui il problema viene suddiviso in un insieme di moduli indipendenti.

La fase di formalizzazione comprende la scelta del linguaggio di rappresentazione e la progettazione di strutture per organizzare la conoscenza.

L'implementazione riguarda la formulazione di regole, che costituiscono la base di conoscenza, e la strategia di controllo da utilizzare per ragionare su di essa.

La quinta e ultima fase riguarda il test del sistema, in cui si valutano le prestazioni del sistema, che viene sottoposto al giudizio critico dell'esperto.

Tuttavia, l'evoluzione del sistema non è un processo rigorosamente lineare come può far credere quanto detto finora. Durante la fase di progettazione c'è un continuo processo di revisione del sistema, di riformulazione dei concetti, di riprogettazione della conoscenza che porta a un affinamento dello stesso. Questa suddivisione non

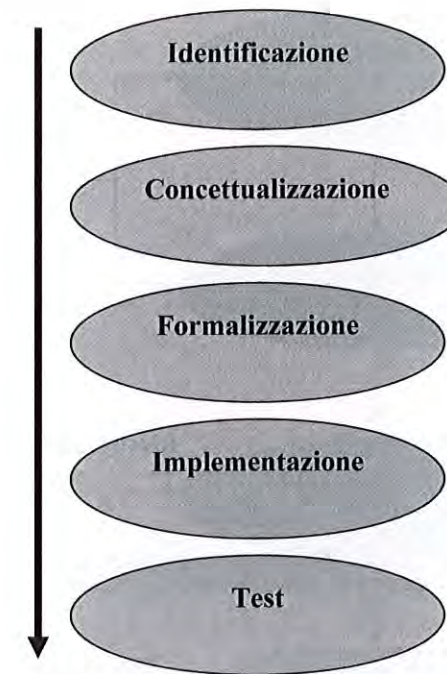


Figura 16.2 Fasi della progettazione di un sistema esperto.

vuole essere altro che una traccia della complessa attività che accompagna l'evoluzione di un sistema esperto (Figura 16.3).

Una ulteriore caratteristica di un sistema esperto è che esso non è mai completo (Figura 16.3). Tale caratteristica è comune a tutti i programmi di intelligenza artificiale, per i quali non esiste una ben definita specificazione del comportamento desiderato, ma viene richiesta una approssimazione del comportamento umano. In particolare nei sistemi esperti, sono due i principali motivi di questa incompletabilità:

1. la conoscenza dell'esperto è la principale fonte di informazione, per cui la base di conoscenza non è mai completa, ci sarà sempre la possibilità di aggiungere ulteriore conoscenza per migliorarne le prestazioni;
2. alcune volte il sistema dà risposte non corrette, per cui si ha la necessità di aggiungere nuove euristiche in modo da ottenere migliori risultati.

Il fatto che il sistema debba presentare un comportamento intelligente pone condizioni sulla rappresentazione della conoscenza. Generalmente nei sistemi esperti si richiede che la conoscenza sia rappresentata in maniera tale da avere una descrizione esplicita del dominio, che tra le altre cose rende il sistema estendibile e facilmente modificabile, in modo tale che un motore inferenziale riesca a inferire nuove conclusioni semplicemente manipolandone la struttura.

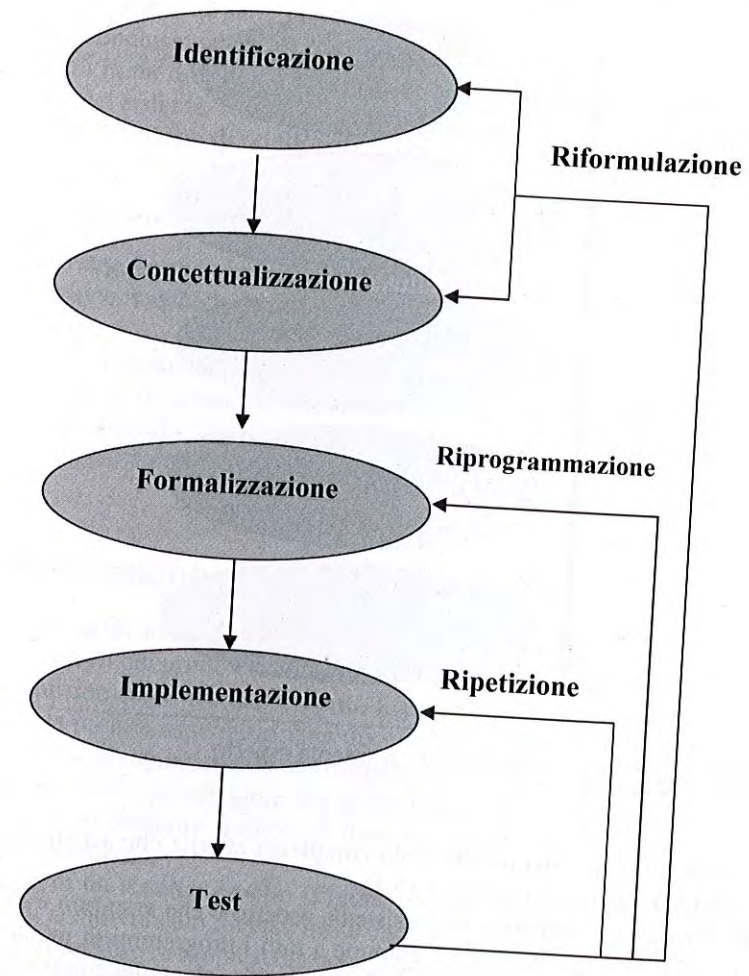


Figura 16.3 Processo evolutivo di un sistema esperto.

A ogni modo, non esiste una teoria della rappresentazione della conoscenza. Non esiste, infatti, una risposta a domande del tipo: "È una rappresentazione adeguata per quel problema?". Esistono solo criteri informali che orientano nella scelta e nella definizione di uno schema e di un formalismo per rappresentare la conoscenza.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] D. Babbo, L. Fedele, M. Tronci, *La Manutenzione: dalla manutenzione su guasto alla manutenzione migliorativa*, Ed. Esagrafica, Roma, febbraio 2001.

## PARTE TERZA

---

# 17

## Gestione dei piani di manutenzione

La pianificazione della manutenzione, costituisce uno dei processi aziendali più importanti, dal momento che una corretta pianificazione deve poter consentire la sistematica esecuzione degli interventi che sono stati previsti, in modo da poter assicurare il mantenimento di una elevata affidabilità del sistema, per tutta la durata del suo ciclo di vita, dalla installazione fino alla sua dismissione.

Questo processo può essere visto come un'applicazione combinata di moderni modelli di management e di tecniche reticolari, derivate in gran parte dalla teoria dei sistemi; una pianificazione adeguata presuppone l'esistenza di una struttura organizzativa ben impostata.

La pianificazione è un processo che si pone a cavallo fra la fase di progettazione della manutenzione e quella di esecuzione degli interventi.

Per essere ben preparata è necessario che la pianificazione abbia alcuni requisiti:

- deve presentare obiettivi precisi e realizzabili e deve contenere l'indicazione delle azioni necessarie per realizzarli, partendo dalla situazione ottimale;
- deve essere integrata e risultare dalla simultanea considerazione di tutte le attività gestionali;
- deve essere articolata sui vari livelli temporali (pluriennale, biennale, annuale, semestrale), in modo che ciascun piano di livello superiore fissi gli obiettivi che devono essere realizzati con il piano di livello inferiore.

Una possibile rappresentazione dello schema logico di pianificazione è riportato nella Figura 17.1.

La pianificazione è un processo aziendale trasversale a molti altri e coinvolge al suo interno molte funzioni:

- ingegneria di manutenzione, per la definizione delle strategie di manutenzione più adeguate;
- gestione sul lungo periodo delle risorse umane di manutenzione;
- uffici acquisti, per il reperimento di eventuali risorse particolari necessarie per l'esecuzione degli interventi;

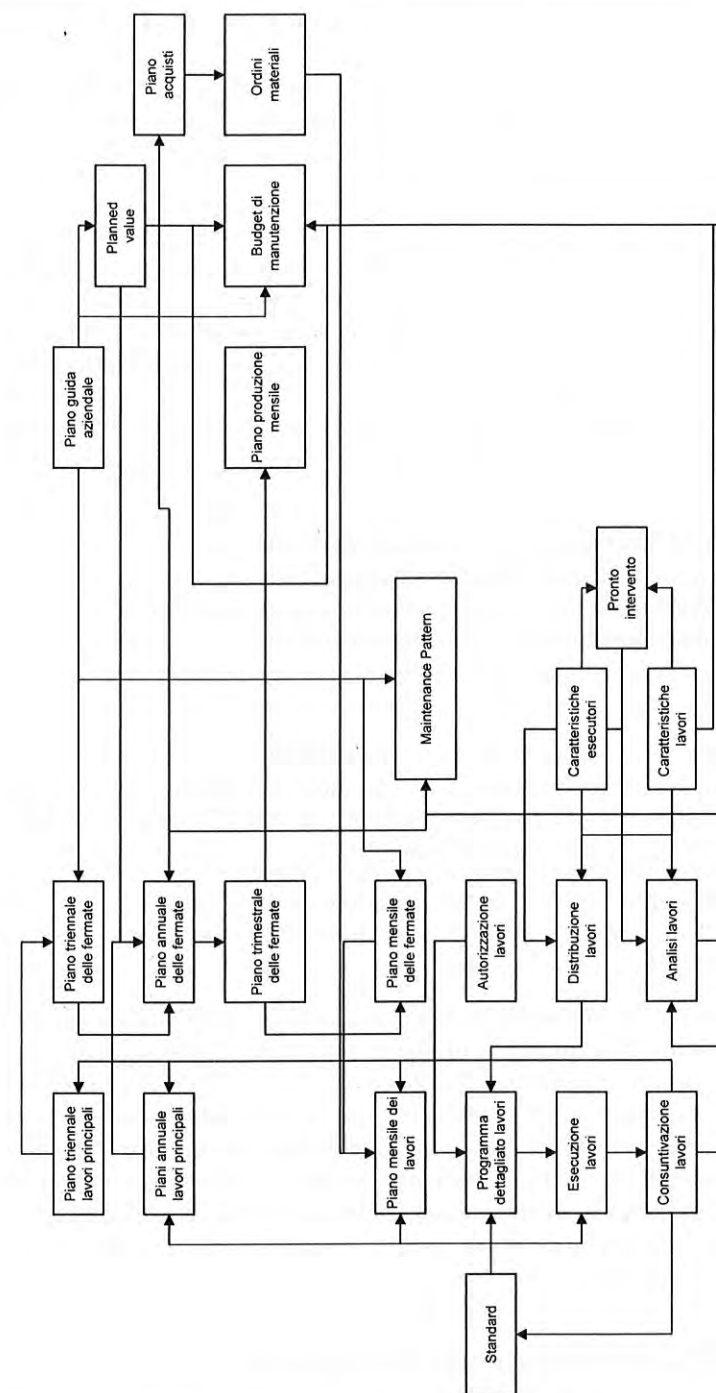


Figura 17.1 Schema logico della pianificazione in manutenzione.

- logistica dei materiali;
- uffici programmazione operativa e schedulazione della produzione, per concordare i periodi in cui gli interventi manutentivi possono essere svolti in condizioni di sicurezza, tenendo conto delle esigenze presenti sia nella produzione (per esempio produzione manifatturiera) sia nella erogazione di servizi (per esempio automezzi di un servizio di trasporto pubblico);
- formazione del personale.

La pianificazione è tipicamente un processo che ha come riferimento temporale il medio-lungo periodo, in quanto essa deve considerare e allocare nel tempo non soltanto le attività routinarie legate alla manutenzione preventiva ad alta frequenza (per esempio ispezione o lubrificazione settimanale), ma anche tutti gli interventi onerosi da un punto di vista delle risorse coinvolte (per esempio grandi sostituzioni, retrofitting dei sistemi produttivi).

In senso lato, il processo di pianificazione comprende anche attività che non riguardano strettamente la realizzazione del piano, ma che ne rappresentano un utile supporto:

- definizione delle politiche di manutenzione ottimali;
- individuazione delle parti d'usura delle macchine;
- standardizzazione e normalizzazione delle parti costituenti il sistema;
- definizione/aggiornamento del budget dei lavori;
- definizione/aggiornamento dei piani di manutenzione;
- analisi dei rinnovi.

La fase di pianificazione deve dunque cercare di organizzare con congruo anticipo, che dipenderà dal particolare contesto, i vari interventi manutentivi collocati in spazi temporali anche molto diversi, rispettando alcuni vincoli caratteristici del sistema e perseguendo al tempo stesso due obiettivi:

- efficienza degli interventi e quindi economicità del piano;
- efficacia degli interventi e quindi adeguatezza del piano rispetto alle reali esigenze emerse dal sistema.

Una proprietà che dovrà essere rispettata nella definizione di un piano di manutenzione, è la sua flessibilità, esprimibile in altri termini come la capacità di adattarsi a variazioni occorse nel breve periodo, e che di conseguenza richiedono un adeguamento.

Il processo di pianificazione prevede l'uso di alcuni strumenti, per poter pianificare e seguire le varie attività manutentive nel loro sviluppo, strumenti che sono propri in gran parte del project management; questo è possibile se si concepisce la pianificazione manutentiva relativa a un periodo prestabilito, come un progetto caratterizzato da una data di inizio e una di fine, al termine del quale devono essere raggiunti obiettivi prestabiliti.

### 17.1 La pianificazione dei fabbisogni

La pianificazione è come detto il processo di determinazione e attribuzione delle risorse su un lungo periodo.

Nello svolgimento degli interventi di manutenzione sarà fondamentale individuare e risolvere tempestivamente i problemi di capacità manutentiva, prima che si verifichi una emergenza o che il carico di lavoro diventi ingestibile e insostenibile.

L'obiettivo è arrivare a fare collimare la capacità disponibile con quella richiesta. Se infatti quest'ultima risulta maggiore della disponibile allora le sole cose da fare sono:

- ottenere maggiore capacità manutentiva (ricorrendo per esempio a risorse esterne);
- ridurre i fabbisogni e quindi gli interventi.

Se la capacità manutentiva necessaria sarà inferiore a quella disponibile, la direzione dovrà effettuare delle rettifiche per farle collimare.

Spesso nel calcolare la capacità manutentiva richiesta non si tiene conto del fatto che questa capacità sia effettivamente disponibile o no, si ipotizza cioè una capacità infinita.

La capacità manutentiva pianificata è dunque quella che ci si aspetta sia disponibile in uno specifico periodo di tempo futuro e in particolare la capacità manutentiva pianificata massima, sarà quella corrispondente al più elevato livello di capacità che potrebbe essere ottenuto se fossero considerati tutti gli straordinari, se si aggiungesse un turno o si cercassero altre risorse per fare eseguire tutti gli interventi.

Il concetto di capacità massima è però più affine con un ambito produttivo, in cui il massimo è dettato dalle prestazioni degli impianti di produzione.

## 17.2 Piani di manutenzione

Secondo quanto riportato nella normativa UNI 10366, il piano di manutenzione programma nel tempo gli interventi, individua e alloca le risorse necessarie.

Durante la stesura di un piano di manutenzione, si deve cercare di conciliare le esigenze che scaturiscono dall'esercizio del sistema, con le potenziali capacità dei beni chiamati a soddisfarle, cercando di minimizzare il costo globale di manutenzione.

La suddetta norma indica alcuni criteri per poter definire e quantificare le risorse necessarie, controllandone i costi.

### 17.2.1 Manodopera per mestiere e professionalità

La prima classificazione che è necessario fare è quella relativa alla distinzione fra gli interventi che possono essere svolti dagli stessi conduttori del bene, da quelli che devono essere svolti attraverso il ricorso a specifiche competenze. Ogni sistema dovrebbe avere le proprie schede di manutenzione preventiva, contenenti le attività che devono essere svolte su ogni asset, con riferimento alle caratteristiche di durata dell'intervento, frequenza, professionalità richieste ecc. A partire da tali informazioni è facilmente determinabile, attraverso l'uso di semplici operazioni aritmetiche:

- il totale delle ore-uomo da allocare su un sistema rispetto a un certo orizzonte temporale predefinito (anche suddivise per professionalità o specializzazione);
- l'elenco delle parti di ricambio e delle attrezzature che dovranno essere impiegate, su un certo orizzonte temporale.



Può essere considerato il seguente percorso logico.

1. *Selezione degli oggetti critici*: confronto fra il valore puntuale di un parametro dell'oggetto (o della famiglia di oggetti) con il valore medio di riferimento (ricavato da librerie in commercio o da dati storici, se disponibili). Gli oggetti che presentano uno o più valori dei parametri peggiori del valore medio di riferimento potranno essere considerati potenzialmente critici.
2. *Espressione delle soluzioni alternative*: per ciascuno degli oggetti critici saranno valutati i rapporti costi/benefici associati alle possibili alternative di intervento (per esempio modifica delle frequenze di manutenzione preventiva o sostituzione).
3. *Selezione dell'alternativa migliore e stima dei benefici in termini di incremento delle prestazioni affidabilistiche e di economicità*: tale determinazione potrà essere fatta attraverso il metodo del VAN (valore attuale netto).

## 17.4 Il budget di manutenzione

Lo strumento per la quantificazione delle previsioni di spesa e il controllo di tutte le variabili che influenzano il risultato operativo di una qualsiasi attività aziendale è il bilancio di previsione (budget).

Le finalità del budget sono quelle di valutare le previsioni di spesa per l'esercizio a venire e di fornire un sistema per controllare i risultati in corso di esercizio.

L'elaborazione del budget avviene tenendo conto del piano dei conti (contenente i costi relativi alle varie voci di spesa) e dei documenti per la raccolta delle informazioni (UNI 10366).

Le risorse coinvolte nel processo manutentivo sono costituite da quell'insieme di valori professionali, di beni e servizi che risultano essere necessari allo svolgimento ottimale dei compiti assegnati a tale funzione.

Gestire le risorse implica saperle impiegare in modo razionale, tenendo presente la necessità di sviluppare un miglioramento continuo, affinché il loro utilizzo possa risultare sempre più efficiente ed efficace. Lo strumento impiegato in modo più diffuso per poter prevedere la gestione delle risorse e di valutarne le caratteristiche è proprio il budget di manutenzione, il quale costituisce una frazione del più generale budget aziendale. Dunque proprio dalla formulazione del budget di manutenzione si partirà per impostare il problema della gestione delle risorse umane.

All'interno del budget di manutenzione ogni anno vengono previsti i piani di manutenzione e i relativi impegni di spesa e di risorse.

Il budget annuale di manutenzione infatti non rappresenta altro che la quantificazione economica delle esigenze espresse dal piano; è evidente che la corretta allocazione delle risorse e della definizione del budget è riconducibile alla modalità di stesura dei piani, la quale deve comunque prevedere anche un opportuno fattore correttivo.

Secondo quanto stabilito nella norma su indicata, la creazione di un budget avviene in due fasi distinte, delle quali la prima è tecnica e la seconda è economica.

*Fase tecnica*: richiede l'esame di tutti gli aspetti tecnici che derivano dai livelli di produttività previsti dai programmi per ogni impianto e necessita della soluzione di eventuali conflitti tra la disponibilità necessaria a soddisfare i programmi e quella realmente ottenibile dall'impianto, tenendo conto, a partire da basi stori-

co-statistiche, della criticità dei vari componenti, ricostruendola con l'analisi dei guasti e tenendo conto dell'età.

*Fase economica*: essa prevede di eseguire una valorizzazione economica delle scelte operate. Questa valorizzazione deve tenere conto dei fattori inflattivi dei costi unitari correnti, delle variazioni organizzative e in generale dei fattori economici che possono influenzare i costi.

## 17.5 Pianificazione e project management

Come si è detto la pianificazione è un processo dinamico presente all'interno dell'azienda, e ne costituisce un elemento essenziale, esteso a tutto il suo ciclo di vita.

Ogni processo aziendale deve poi presentare un "elemento di miglioramento", favorendo lo sviluppo di un percorso continuo o comunque continuativo, in cui il trend delle prestazioni risulta migliorare con il tempo e con le variazioni dell'ambiente in cui il processo è inserito.

Lo sviluppo della pianificazione può avvenire adottando una logica di project management evolutivo, nel quale cioè le modalità di gestione di progetti caratterizzati da una data di inizio e una di fine sono estese a tutta la vita del sistema aziendale e non limitate a una sua fase.

In base quindi a questo assunto la pianificazione è concepibile come un grande progetto, al quale saranno associati determinati ruoli, figure definite e particolari metodi. Nel caso della pianificazione di interventi onerosi, si pensi per esempio al re-vamping di impianti petrolchimici o di condotte per oil&gas, si andrà a effettuare una pianificazione di progetti (Figura 17.4) nella quale cioè i grandi progetti di intervento sono pianificati e posizionati sul calendario. Ogni progetto avrà poi una propria struttura di dettaglio (*Work Breakdown Structure - WBS*).

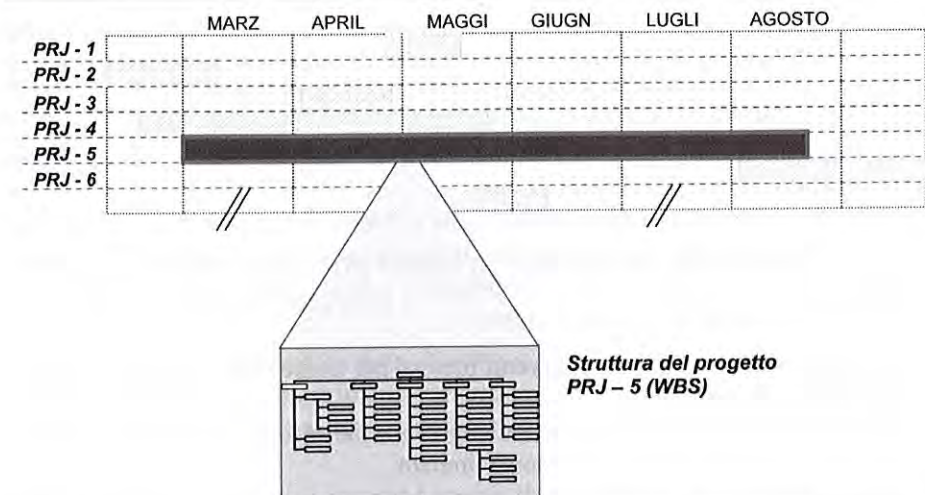


Figura 17.4 La pianificazione di interventi molto onerosi implica una pianificazione fatta con i criteri del PM.

In questo senso è dunque possibile affermare che il processo di pianificazione deve impiegare anche le tecniche e gli strumenti che sono propri del project management. Ogni progetto sarà poi caratterizzato da:

1. una data di inizio e una di termine dei lavori;
2. una pianificazione e una schedulazione di dettaglio;
3. una quantificazione del budget necessario (derivante dall'allocazione delle risorse);
4. alcuni stati di avanzamento;
5. un sistema di controllo dei costi rispetto al budget prestabilito.

Il project management di un grande intervento manutentivo (per esempio la sostituzione di almeno il 30% di una centrale elettrica), inserito nel processo di pianificazione, per essere efficace, richiede buoni metodi e buone procedure per la pianificazione, la schedulazione, la stima, la preventivazione, l'autorizzazione dei lavori, il monitoraggio, il rendiconto e la valutazione del progetto e dei singoli sottoprogetti che lo costituiscono; ciò che realmente conta è che tali metodi e strumenti siano effettivamente utilizzati.

Il periodo del progetto e conseguentemente il rispetto della pianificazione viene facilitato attraverso:

- una determinazione collettiva degli obiettivi e dei traguardi;
- una definizione dei compiti da eseguire;
- una pianificazione e schedulazione dei compiti, sulla base delle risorse necessarie e di quelle disponibili;
- una misurazione dell'avanzamento e delle performance con una metrica precisa;
- un'attuazione di misure correttive adeguate da parte di ciascun partecipante al progetto qualora l'avanzamento non corrisponda ai piani;
- una verifica di compatibilità della schedulazione relativamente all'allocazione delle risorse, in modo da evitare conflitti.

L'obiettivo del lavoro di pianificazione e controllo di un progetto è pertanto quello di documentare i piani, le schedulazioni e i budget; di raffrontare i risultati effettivi a quelli previsti, di prevedere tempi e costi totali, fino al completamento.

È interessante considerare un prospetto (Tabella 17.1) che riepiloga gli strumenti e le funzioni per la pianificazione e il controllo di un progetto, inserito all'interno di un più generale processo di pianificazione.

Alcuni degli strumenti indicati nella tabella suddetta saranno mostrati nel seguito.

La pianificazione può essere pertanto interpretata in un contesto di tipo multiprogetto, in cui i singoli progetti corrispondono a interventi manutentivi onerosi e per i quali si evidenziano i seguenti obiettivi:

- il completamento di tutti gli interventi previsti per conseguire al meglio i fini generali dell'organizzazione;
- la determinazione delle priorità sia a lungo sia a breve termine, per poter prendere decisioni nell'allocazione di risorse limitate;
- l'acquisizione e il mantenimento di risorse adeguate al complesso di interventi e lavori previsti e approvati;
- lo sviluppo di schemi organizzativi e di sistemi di gestione che soddisfino le mutevoli esigenze dei progetti e assicurino al tempo stesso una stabilità.

**Tabella 17.1** Alcuni esempi di strumenti utilizzabili nel processo di pianificazione di un progetto

Funzioni	Esempi di strumenti
Definizione e controllo degli obiettivi del progetto e della data prevista di completamento	DCF (Discounted Cash Flow) e altri metodi di analisi finanziaria. Richiesta di autorizzazione del progetto (Par).
Definizione degli elementi da consegnare e dei compiti principali	Project Breakdown Structure (PBS). Matrice compiti/responsabilità. Schedulazione generale o piani delle fasi più importanti.
Pianificazione e schedulazione del lavoro	Procedure di definizione dei compiti. Tecnica reticolare (Pert, Cpm, Pdm). Sistemi di controllo dell'avanzamento lavori.
Valutazione delle risorse necessarie (manodopera, capitali, materiali, attrezzature)	Procedure di pianificazione/lavoro. Procedure di valutazione della manodopera e dei materiali. Procedure di valutazione dei costi e di pricing.
Budgeting delle risorse	Procedure di budgeting.
Assegnazione e autorizzazione dei lavori (interno ed esterno)	Specifiche di contratto. Ordinativi. Procedure per gli appalti e gli acquisti.
Valutazione degli stati avanzamento	Procedure per rendiconto. Sistemi informativi contabili. Procedure per l'amministrazione del contratto. Procedure per la misurazione della qualità tecnica.
Valutazione integrata dei tempi, dei costi e della qualità tecnica	Procedure e tecniche per la valutazione del progetto.

In sede di pianificazione è spesso difficile prevedere tutti i problemi e tutte le circostanze che si possono verificare durante le fasi operative. Per valutare e controllare i cambiamenti che possono essere avvenuti durante un certo periodo, è necessario utilizzare delle procedure apposite.

## 17.6 La pianificazione degli approvvigionamenti di materiali tecnici

Aspetto essenziale nell'ambito della pianificazione degli interventi di manutenzione, sul lungo periodo, è quello dell'approvvigionamento dei materiali che saranno utilizzati e che possono essere classificati in due macrocategorie:

- parti di ricambio
- materiali di consumo

Le classificazioni dei materiali sono comunque numerose ma una trattazione più diffusa dell'argomento esula dal presente contesto.

La gestione delle parti di ricambio dovrà essere caratterizzata da valori noti di alcuni parametri caratteristici (per esempio tempi di evasione dell'ordine di acquisto, tempi di consegna, costi di immobilizzo) i quali devono essere considerati nel processo di pianificazione, in modo da produrre un piano che sia realistico.

Laddove si rendano necessari interventi di manutenzione straordinaria (per esempio il revamping degli impianti), allora la gestione delle richieste di acquisto di materiali diventerà un'attività ancora più fondamentale, soprattutto in quei casi in cui i capitolati di appalto prevedano un gran numero di voci o oggetti che hanno una difficile reperibilità.

Nella pianificazione degli approvvigionamenti di materiali entrano in gioco due proprietà (e relative scale ordinate di riferimento) che possono essere associate al particolare materiale tecnico e che possiamo definire nel modo seguente.

- *Criticità funzionale - f*: tiene conto dell'importanza che una parte di ricambio ha all'interno del ciclo produttivo (sia esso manifatturiero, di processo o di servizio). Tale stima può derivare per esempio da una analisi FMECA di processo.
- *Criticità logistica - l*: tiene conto della reperibilità di un certo oggetto ed è basata su alcuni fattori quali per esempio il tempo di consegna, la necessità di realizzare su misura la parte richiesta, numero dei possibili fornitori ugualmente qualificati.

La coppia (*f, l*) permette di effettuare una prima classificazione del materiale tecnico e porta alla associazione di un ordine di priorità al particolare materiale che deve essere richiesto.

Mutuando il concetto di *Master Production Schedule* (MPS), associato alla pianificazione della produzione, si può ipotizzare di adattare le politiche e i criteri di gestione dei materiali anche all'ambito della manutenzione, definendo in altri termini un *Master Maintenance Schedule* (MMS). Ciò è possibile soltanto a seguito di una pianificazione degli interventi manutentivi, eseguita con tempistiche che risultino compatibili con i tempi di approvvigionamento.

La conoscenza del piano principale di manutenzione consente di stabilire un programma di impiego dei materiali tecnici e di definire la pianificazione dei fabbisogni di materie prime e di parti componenti, necessari per l'esecuzione dei programmi di manutenzione.

La gestione dei materiali tecnici ha tre obiettivi principali:

- garantire la disponibilità riducendo i tempi di mancata produzione;
- contenere le giacenze di materiali;
- contenere i costi logistici.

In altre parole, nella pianificazione dei fabbisogni dei materiali risulta fondamentale trovare la soluzione gestionale che permetta di avere tali materiali dove sono necessari, quando sono necessari e nelle quantità richieste.

Il problema è riconducibile dunque a fornire un'adeguata risposta alle seguenti domande:

- quando emettere un ordine di approvvigionamento;
- quale deve essere la dimensione dell'ordine.

I sistemi di gestione dei materiali, possono essere classificati in due macrocategorie:

- *gestione a fabbisogno*: in modo da ridurre la giacenza delle scorte e i relativi costi associati;
- *gestione a scorta*: in modo da evitare rotture di stock.

La gestione dei materiali tecnici è una funzione estremamente dinamica che può risentire di molte variazioni nel corso del tempo. Per questo motivo si deve effettuare periodicamente una analisi critica delle scorte per verificare ed eventualmente adeguare le politiche di approvvigionamento e di gestione alle effettive necessità.

Un'ultima osservazione deve essere fatta in merito alla possibilità di integrazione fra le politiche di manutenzione con quelle di approvvigionamento: tanto maggiore infatti sarà l'adozione di politiche preventive (ciclica, predittiva e on-condition), tanto più risulterà possibile orientarsi verso politiche di gestione a fabbisogno dei materiali, anche arrivando all'utilizzo di un "just in time manutentivo".

## 17.7 I conflitti potenziali di una pianificazione

Il processo di pianificazione può comportare l'insorgere di alcuni conflitti, i quali devono essere opportunamente trattati per arrivare a un piano consolidato, che possa essere effettivamente seguito da una programmazione operativa dei lavori e dei progetti previsti.

I conflitti in generale hanno origini ben diverse:

- conflitti sulla priorità dei progetti e interventi previsti nella pianificazione;
- conflitti sulle procedure gestionali, le quali possono essere di tipo sia manageriale sia amministrativo, e riguardanti la definizione delle responsabilità, i rapporti di interfaccia, le procedure amministrative, e altro ancora;
- conflitti su compromessi tecnici, sulle specifiche di performance, su soluzioni e sui mezzi per ottenere risultati tecnici soddisfacenti;
- conflitti sulle risorse umane, sul modo di reclutare il personale e di impiegarlo sul progetto;
- conflitti sui costi e sui budget parziali richiesti;
- conflitti sulla durata degli interventi e sulla loro sequenza.

Tutti questi tipi di conflitto possono essere risolti singolarmente, per ciascuna fase del progetto pianificato.

Le modalità con cui tali conflitti possono essere superati sono:

- confronto diretto ed esplicito fra le posizioni in disaccordo in modo da trovare un punto di incontro;
- compromesso, in modo da soddisfare entrambe le parti;
- attenuazione dei punti di disaccordo ed esaltazione degli elementi condivisi;
- pressione, in modo da fare prevalere la propria visione a scapito delle altre;
- rinuncia, recedendo da un disaccordo reale o potenziale.

## 17.8 Le tecniche reticolari

La pianificazione è come detto una situazione multi-progetto, la quale implica decisioni ordinate in base alle priorità dei singoli progetti, da considerare solo quando si



manifestano conflitti tra attività veramente critiche, riferibili a due o più progetti. Questa considerazione è importante proprio perché i grandi progetti di manutenzione coincidono con le fermate periodiche durante le quali sono realizzati lavori di manutenzione preventiva e migliorativa.

Quando due o più progetti vengono pianificati con l'uso delle tecniche reticolari, si possono ottenere informazioni che consentono l'applicazione di norme di classificazione dell'importanza a vari livelli più bassi. Con le tecniche reticolari si possono ottenere vantaggi significativi nelle situazioni di progetti multipli sia grandi che piccoli:

- migliore pianificazione e successiva schedulazione delle attività e previsione del fabbisogno di risorse;
- identificazione di schemi ripetitivi di pianificazione validi per diversi progetti, in modo da semplificare il processo di pianificazione;
- possibilità di aggiornare il calendario delle attività secondo le dipendenze fra i diversi progetti e i vincoli sulle risorse, applicando regole di precedenza prestabilite;
- possibilità di ottenere informazioni tempestive e valide per una pianificazione multi-progetto.

In una pianificazione della manutenzione e più in generale di una situazione multi-progetto, le interdipendenze di progetti e delle loro attività costituenti possono derivare da:

- precedenze obbligate fra attività appartenenti anche a progetti diversi;
- ricorso alle medesime risorse sia umane sia materiali, sempre e comunque limitate.

In una pianificazione multi-progetto sono trascurati ai fini di una maggiore utilizzabilità del modello reticolare, tutti i compiti e le attività indirette questo perché:

- se i reticoli sono troppo dettagliati, il reticolo integrato della pianificazione che ne deriva può risultare eccessivamente oneroso e difficilmente aggiornabile in tempo reale;
- in genere sono necessarie procedure per eseguire una elaborazione elettronica dei dati; è necessario un software adeguato e flessibile e si deve assicurare una elaborazione dei risultati che dia una risposta rapida;
- tutti i responsabili di attività e gli altri utenti devono essere ben addestrati;
- per evitare un eccesso di dettaglio può essere utile la tecnica della "finestra mobile" (con la quale si elaborano piani dettagliati solo per periodi di pochi mesi).

### 17.8.1 Project Evaluation and Review Technique - PERT

Il metodo PERT è una tecnica di progettazione, pianificazione e controllo che serve a evidenziare le varie fasi che compongono un piano, le loro reciproche influenze e a localizzare tali fasi nel tempo. Il metodo non è in grado di sostituire le funzioni aziendali preposte a queste attività, ma consente di collegare tutti i fattori del problema in modo da renderlo più chiaro.

Il PERT si avvale di una rappresentazione grafica in cui vengono evidenziate le varie attività collegandole con legami tecnici e logici.

La pianificazione del progetto consiste nella distribuzione delle sue attività costituenti che dovranno:

- essere omogenee;
- essere finite nel tempo;
- non essere ripetitive, in quanto il metodo non gestisce i loop;
- essere complesse o elementari a seconda del grado di dettaglio con cui bisogna studiare il progetto;
- essere legate da vincoli temporali o logici.

L'analisi dei legami è molto importante, in quanto tralasciare qualche legame potrebbe significare falsare completamente il progetto.

Ciascuna attività inserita all'interno del diagramma reticolare sarà caratterizzata da una certa durata, per la quale dovrà essere scelta una opportuna unità di tempo, in modo da avere un dettaglio commisurato alla dimensione del progetto.

Un'altra proprietà caratteristica di una attività è data dalla rappresentazione delle precedenze, ovvero dell'ordine con cui le varie attività devono essere svolte.

Ogni attività di durata  $D$  (Figura 17.5) può inoltre presentare uno scorrimento in avanti o indietro nel tempo, tali grandezze sono determinabili definendo:

- primo inizio  $ES$  (minimo possibile)
- prima fine  $EF$  (minima possibile)
- ultimo inizio  $LS$  (massimo ammissibile)
- ultima fine  $LF$  (massima ammissibile)

Di conseguenza si possono definire gli scorrimenti (*slack*) come  $LS - ES = LF - EF$ .

All'interno di un diagramma reticolare si potranno individuare attività che non ammettono scorrimenti, le quali vengono chiamate attività critiche la cui sequenza dall'inizio della prima attività alla fine dell'ultima determina il percorso critico del progetto.

Tutte le attività al di fuori dal percorso critico possono avere scorrimento vincolato o libero, a seconda che influiscano o meno sullo scorrimento delle altre attività.

Il ritardo di una attività critica produce un ritardo di tutto il progetto.

Intervenendo sulle durate delle attività costituenti il percorso critico si può ridurre la durata totale del progetto; a ogni attività e a ogni sua variazione è comunque associabile un costo, dal calcolo del quale è possibile determinare anche il corrispettivo costo totale del percorso.

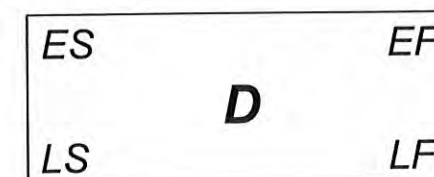


Figura 17.5 Rappresentazione di una attività.

### 17.8.2 Critical Path Method - CPM

Questo metodo è stato sviluppato da Kelly e Walker proprio per la gestione delle manutenzioni degli impianti chimici. Esso è orientato verso la gestione del percorso critico e alla riduzione della sua durata totale.

Esiste una forte somiglianza fra il metodo PERT e il CPM e ciò è dovuto a uno scambio di elementi che vi è stato dall'uno all'altro.

Per maggiori chiarimenti rimandiamo a testi specificamente dedicati all'argomento.

### 17.9 Teoria dei rinnovi

Nell'ambito della pianificazione degli interventi manutentivi grande rilevanza è attribuita agli interventi di sostituzione di asset, all'interno dei sistemi di produzione o di erogazione dei servizi.

Si tratta di interventi molto onerosi, sia in termini di risorse coinvolte sia in termini di valore economico.

La durata di vita di un sistema può essere valutata sotto tre forme consuete:

- *durata fisica*: corrisponde alla durata consentita dai processi di degrado fisico, valutata in relazione alla capacità dell'item di erogare le prestazioni richieste all'origine;
- *durata funzionale*: corrisponde alla durata consentita da un lato dalla durata fisica e dall'altro dai processi di obsolescenza valutati in relazione alla capacità dell'item di rispettare il rapporto dinamico tra prestazioni e requisiti;
- *durata economica*: valutata sulla capacità dell'item di garantire un reddito e/o di possedere un valore economico.

La sostituzione in un oggetto avviene quindi per due motivi principali:

- *ragioni tecniche*: degrado fisico e obsolescenza;
- *ragioni economiche*: costi globali del ciclo di vita, comprensivi dei livelli di prestazione, troppo elevati.

In questi casi si devono pertanto prevedere alcune regole o modelli per eseguire le sostituzioni in modo conveniente, da un punto di vista sia tecnico sia economico.

A questo proposito nel corso degli anni sono stati sviluppati alcuni criteri di sostituzione, i quali si basano su poche ed essenziali informazioni che dovrebbero essere presenti in ogni sistema aziendale, ma che in realtà sono spesso assenti.

Gli esperti di manutenzione sono concordi sul fatto che la sostituzione di un asset prima che esso sia guasto (sostituzione preventiva), in alcune circostanze che devono comunque essere verificate, possa essere più conveniente che sostituirlo quando questo sia guasto. Tutto sta dunque nello stabilire se la sostituzione preventiva di un certo asset è appropriata e, in caso affermativo, nell'identificare l'istante ottimale di sostituzione.

Esistono due requisiti fondamentali per poter determinare il momento ottimale di sostituzione.

Prima di tutto, la manutenzione preventiva ha senso quando l'asset si deteriora nel corso del tempo sia nel suo stato sia nelle prestazioni che può fornire; in altre pa-

role, l'asset presenta un fenomeno di wear-out e ha un tasso di guasto che aumenta nel tempo.

Il secondo requisito è che il costo della manutenzione preventiva deve essere minore del costo di manutenzione correttiva. Se entrambe questi requisiti sono soddisfatti, allora la manutenzione preventiva è conveniente e si può calcolare un istante ottimale (corrispondente al costo minimo) per l'esecuzione della sostituzione.

Per determinare l'istante ottimale di sostituzione di un asset, l'analista deve partire da una modellizzazione del tasso di guasto, considerando per esempio una distribuzione di Weibull, per la quale si indica il fattore di forma  $\beta$  (che in questo caso dovrà essere maggiore di 1) e il fattore di scala  $\eta$  (nel caso di una distribuzione a 2 parametri  $W(\beta, \eta)$ ).

Come detto la seconda cosa da verificare è che il costo  $C_P$  di una sostituzione preventiva, sia inferiore al costo di sostituzione a guasto  $C_U$ .

Se queste due condizioni sono soddisfatte, allora si può rappresentare il costo per unità di tempo operativo rispetto al tempo operativo (Figura 17.6).

All'aumentare del tasso di guasto, allora aumenteranno anche i costi di manutenzione correttiva, perché gli interventi diventano più probabili, viceversa se aumenta l'intervallo di tempo fra un intervento preventivo e il successivo, il costo unitario di tale tipologia di interventi si riduce.

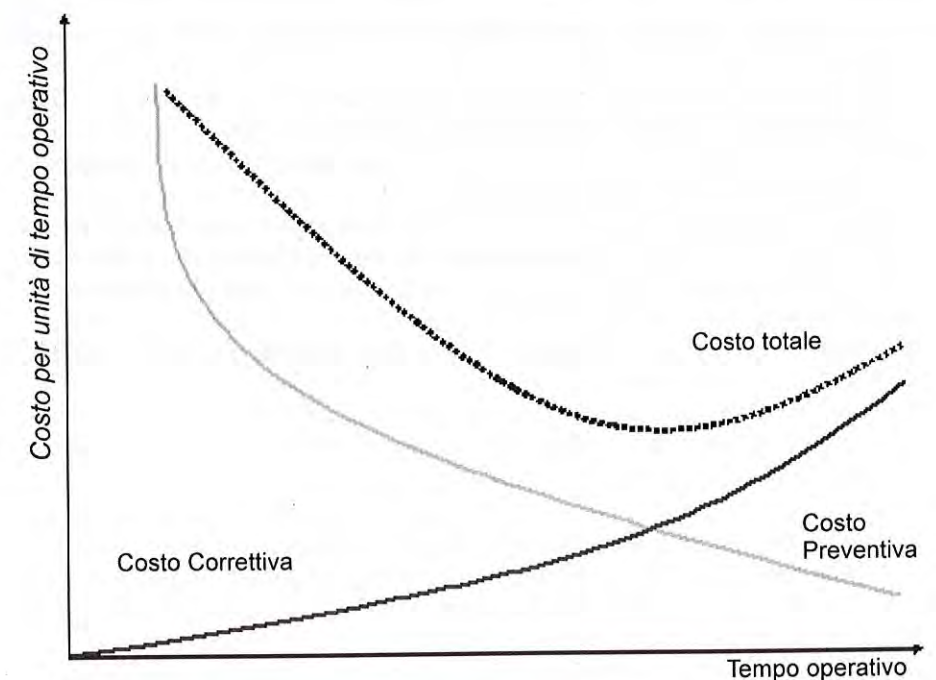


Figura 17.6 Andamento dei costi di manutenzione correttiva e preventiva al variare del tempo.

Il costo unitario totale sarà dato dalla somma dei due contributi di costo, e nel caso siano state rispettate le due condizioni suddette, la funzione del costo totale presenterà un minimo corrispondente all'istante ottimale.

Questo risultato può essere chiarito con alcuni passaggi matematici:

$$\begin{aligned} CPUT(t) &= \frac{\text{Total Expected Replacement Cost per Cycle}}{\text{Expected Cycle Length}} = \\ &= \frac{C_P \times R(t) + C_U \times [1 - R(t)]}{\int_0^t R(s) ds} \end{aligned}$$

dove  $R(t)$  è la funzione dell'affidabilità dell'asset e  $CPUT(t)$  è il costo unitario totale variabile rispetto al tempo. Dalla determinazione del minimo della espressione precedente, si individua l'istante ottimale di sostituzione:

$$\frac{\partial[CPUT(t)]}{\partial t} = 0$$

#### Riferimenti bibliografici

- [1] L. Furlanetto, *Manuale di manutenzione degli impianti industriali e servizi*, Franco Angeli, Milano, 1998.
- [2] Reliasoft Corporation, *Optimum Preventive Maintenance Replacement Time for a Single Component*, volume 1, Issue 1, Quarter 2, 2000.
- [3] R.D. Archibald, *Project Management. La gestione di progetti e programmi complessi*, Franco Angeli, Milano, 2002.
- [4] W. Iannacone, *Ingegneria di manutenzione. Innovazione tecnologica e reingegnerizzazione del processo manutentivo*, Franco Angeli, Milano, 1998.
- [5] J.G. Correll, N.W. Edson, *Capacity management e schedulazione*, Franco Angeli, Milano, 1990.
- [6] A. Pareschi et al., *Logistica integrate e flessibile*, Progetto Leonardo, 2002.

## Criteri e strumenti per la schedulazione

Il termine schedulazione può essere trovato in un'ampia gamma di problemi, anche molto diversi fra di loro per tipologia di applicazione e livello di complessità. Molti tentativi sono stati fatti per cercare di effettuare una sistematizzazione e una sintesi dell'ampio corpo metodologico che si è andato costituendo negli ultimi quarant'anni.

Una definizione generale vede la schedulazione come quella funzione che si occupa di coordinare tutte le risorse logistiche e produttive necessarie, associandole alle fasi di realizzazione dei lavori; riguarda quindi aspetti a prevalente carattere operativo.

Da un punto di vista organizzativo, è possibile affermare che il processo di schedulazione, così come quello propedeutico di pianificazione, seppur caratterizzati da orizzonti temporali di riferimento diversi, ha come obiettivo principale quello di rendere realmente eseguibile quello che è stato concepito.

Al ruolo del programmatore dei lavori e delle attività è dunque per questo motivo attribuibile una importante responsabilità all'interno delle aziende; in particolare l'individuazione di risorse umane aventi competenze adeguate per coprire il ruolo di schedulatore e dotate di una conoscenza di base che sia trasversale a molti dei processi aziendali, associabile al processo di schedulazione, risulta non sempre facile.

Nell'ambito della schedulazione sono stati sviluppati molti modelli applicativi, legati ad alcuni specifici approcci e algoritmi.

Va comunque precisato che, a differenza di quanto accade per altri campi a cui si possono applicare tecniche di ottimizzazione, per quanto concerne problemi di scheduling caratterizzati da una elevata complessità, non è di fatto possibile indicare un solo approccio che sia distintivo e preferibile rispetto agli altri da utilizzare per la risoluzione, ma di volta in volta risulterà più appropriato fare ricorso a metodi euristici, algoritmi di enumerazione, algoritmi approssimati.

Effettuare una schedulazione delle risorse (manodopera, risorse finanziarie e materiali) significa quindi associare tali risorse alle attività di qualunque genere esse siano, su un orizzonte temporale non troppo esteso.

In generale potrà risultare che le risorse siano:

- *non divisibili*;
- *multiservizio*;
- *divisibili*.

Tale classificazione è alla base della definizione di un qualsiasi problema di schedulazione perché questo costituisce un aspetto essenziale nella costruzione di un modello.

Una prima precisazione che è fondamentale fare e in base a cui si possono distinguere due grandi famiglie diverse di algoritmi di risoluzione, è quella fra *programmazione a capacità infinita* e *programmazione a capacità finita*.

- *Programmazione a capacità infinita*: operare a capacità infinita significa programmare gli ordini di lavoro prescindendo da considerazioni sulla effettiva disponibilità degli impianti e delle risorse (tempo finito).
- *Programmazione a capacità finita*: allocare gli ordini di lavoro tenendo conto della reale capacità disponibile, prescindendo dal vincolo temporale (tempo infinito).

La programmazione operativa o di breve periodo, e dunque la schedulazione, si inserisce a posteriori della fase di pianificazione dei fabbisogni e ha lo scopo di tradurre gli ordini di lavoro pianificati (intesi come richieste di effettuare determinati lavori, su certe entità destinatarie, in periodi fissati) in ordini di lavoro operativi da rendere esecutivi.

Nella schedulazione si possono distinguere tre fasi concettualmente diverse, anche se fra di loro sono strettamente correlate:

- fase di allocazione delle operazioni sulle singole risorse disponibili;
- fase di allocazione delle operazioni nel tempo;
- fase di sequenziamento dei lavori sulle macchine, da affrontare tenendo conto delle caratteristiche intrinseche dei lavori, delle caratteristiche dell'impianto ecc.

Soprattutto nell'ambito della programmazione operativa della produzione, negli ultimi anni sono stati condotti molti studi e ricerche sulle problematiche legate a questo tema; questi lavori hanno portato a numerose tecniche di varia natura, applicabili a differenti situazioni produttive, che comunque hanno trovato solo in minima parte una applicazione nella realtà industriale; questo fenomeno è spiegabile se si fanno alcune considerazioni:

- i dati di cui occorre tenere conto nella realtà per arrivare a un programma di produzione soddisfacente sono estremamente numerosi e di natura diversa (cicli tecnologici, tempi di esecuzione dei lavori e di approvvigionamento dei materiali, tempi di macchina, capacità produttive delle macchine, disponibilità delle macchine ecc.);
- molti dati sono soggetti a variare nel tempo e per questo motivo adottare soluzioni di tipo statico per la schedulazione può risultare troppo limitativo o addirittura un errore;
- il fattore umano risulta, seppur inserito in un processo di standardizzazione, un elemento ulteriore di forte aleatorietà;

- una schedulazione soddisfacente deve mirare al conseguimento di diversi obiettivi (saturazione delle risorse, rispetto dei vincoli temporali, minimizzazione dei costi ecc.) che spesso possono risultare conflittuali fra di loro, per cui ogni volta dovrebbe cambiare il peso che viene assegnato a ciascuno di essi.

Sia nella schedulazione della produzione sia in quella di ogni altra tipologia (fra cui la manutenzione) vi è sempre stata la propensione da parte del personale responsabile a prediligere le soluzioni empiriche, basate spesso soltanto sul buon senso e sulle esperienze maturate negli anni, senza fare ricorso a tecniche troppo analitiche e complesse da un punto di vista elaborativo.

Un'altra distinzione che risulta fondamentale nel trattamento dei problemi di scheduling prevede:

- schedulazione *ammissibile*: è quella che rispetta tutti i vincoli (per esempio una non contemporaneità degli eventi);
- schedulazione *ottima*: è quella che minimizza un certo criterio, qualunque esso sia.

Va detto che l'approccio pratico e tradizionale al problema della schedulazione, consiste nel non dedicare eccessive risorse alla sperimentazione e applicazione di complicate procedure.

In realtà si è coscienti della complessità del problema e della imperfezione dei risultati raggiungibili e ciò porta a prevedere in modo cautelativo costose condizioni di protezione (ampliamenti di capacità, decentramento a terzi di parte delle attività ecc.) le quali rendono il sistema più sicuro. In altri termini si tende ad adottare un coefficiente di sicurezza molto ampio, senza valutare opportunamente gli sprechi.

A partire dall'ambito produttivo, negli ultimi quindici anni si è assistito alla diffusione di un sempre maggiore grado di automazione e flessibilità, unito a uno sviluppo di sistemi informativi di tipo ERP sempre più integrati, e in molti casi dotati di moduli per l'esecuzione della raccolta dati; a seguito di questo scenario sono diventate concrete le condizioni preliminari necessarie a una adozione di tecniche e strumenti dedicati alla programmazione operativa, in quanto vi è una maggiore disponibilità di informazioni aggiornate sullo stato del sistema, unite a una maggiore capacità di prevederne il comportamento, elementi questi essenziali per un'adeguata attività di schedulazione.

## 18.1 Alcuni problemi di scheduling

Allo scopo di avere una visione generale della tipologia di problemi legati alla schedulazione possiamo considerare alcuni esempi caratteristici.

- Un'azienda produce alcuni tipi di prodotti differenziati. La materia prima è costituita da rotoli di carta e il processo produttivo consiste di tre fasi, per ciascuna delle quali l'operazione è effettuata da un operaio. Ogni ordine di produzione consiste di un certo numero di prodotti da consegnare entro una data prefissata. L'eventuale costo di ritardo dipenderà dall'entità del ritardo e dall'importanza dell'ordine. Conoscendo i tempi richiesti per ciascuna delle operazioni, per ciascun ordine, un obiettivo della schedulazione della produzione è quello di orga-

- nizzare le operazioni in modo da minimizzare i costi di ritardo ovvero le penali.
- In un'industria meccanica i centri di lavoro devono effettuare alcune lavorazioni su vari pezzi che vengono montati sui centri stessi. Ogni operazione richiede tempi differenti, diverse tipologie di utensili e conseguenti tempi di attrezzaggio delle macchine differenti, in funzione della lavorazione. In questo caso il problema di schedulazione può essere legato alla determinazione dell'ordinamento dei pezzi in modo da terminare tutte le lavorazioni prima possibile.
- Un sistema operativo installato su un elaboratore ha come funzione quella di fornire una regola di accesso alla CPU da parte dei vari programmi di calcolo. A ogni programma può essere attribuita una certa priorità. In questo caso la schedulazione eseguita da parte del sistema operativo avrà come obiettivo quello di minimizzare il tempo complessivo di attesa dei programmi di calcolo, tenendo conto della loro importanza relativa. In questa particolare applicazione il sistema operativo potrà fare in modo di interrompere certi programmi per consentire il completamento di altri, tale modalità operativa prende il nome di *preemption*.
- In un'officina di carrozzeria ci sono quattro stazioni, dedicate rispettivamente a messa in forma, ribattitura, verniciatura ed essiccazione a forno. In ogni stazione è attivo un operaio che opera su una sola vettura per volta. In una giornata di lavoro, un numero di auto danneggiate deve essere riparato, e ognuna richiede il servizio da parte di alcune stazioni secondo una sequenza precisa di lavorazione. In questo caso il problema di schedulazione consiste nel gestire le varie operazioni in modo da terminare tutte le lavorazioni nel minor tempo possibile.

Da questi esempi si comprende dunque come i problemi di schedulazione siano legati da un obiettivo generale dato dalla possibilità di allocare le risorse nella quantità e nella sequenza più giusta, rispetto a un obiettivo prefissato generale di prestazione del sistema.

## 18.2 Classificazione della schedulazione

I principi che stanno alla base della schedulazione della manutenzione possono essere mutuati da quelli che si trovano nella schedulazione della produzione; per questo motivo può risultare interessante ripercorrere brevemente le caratteristiche di alcune tipologie di schedulazione, che rappresentano casi molto ricorrenti presenti in letteratura nell'ambito della produzione.

Prima di tutto va precisato che la collocazione di ciascun modello all'interno di uno schema ordinato, ovvero la determinazione della sua categoria, ha una grande rilevanza pratica in quanto permette di conoscere immediatamente in quali realtà produttive il modello è potenzialmente utilizzabile.

La classificazione di seguito riportata è basata sulla complessità del sistema produttivo considerato, i vari metodi possono essere pertanto classificati nel modo seguente.

- A macchina singola*: in questo caso la programmazione riguarda una sola risorsa; è possibile affermare che questa classe comprende tutte le situazioni in cui l'impianto (o una sua parte ritenuta più rilevante) è schematizzabile come una singola macchina. Varie realtà possono essere, con opportune ipotesi semplificative, ri-

condotte a questa schematizzazione (industria chimica, farmaceutica ecc.) dove, scelta una tecnologia e un impianto, il ciclo tecnologico è obbligato. In generale si può affermare che questo modello di riferimento è valido in tutte quelle situazioni in cui uno degli stadi è il più critico (in genere per quanto riguarda la capacità necessaria). Per i sistemi modellizzabili a macchina singola, il problema dello scheduling è riconducibile a un problema di sequenziamento.

- A macchine parallele*: nel caso di macchine parallele la schedulazione non è più limitata soltanto a una attività di sequencing, infatti in questo caso si aggiunge il problema di scegliere le macchine sulle quali allocare le operazioni. Nel caso di macchine parallele identiche, queste potranno compiere le medesime operazioni sui prodotti impiegando lo stesso tempo, mentre nel caso di macchine parallele diverse anche le prestazioni saranno eterogenee e quindi il tempo di lavorazione su un prodotto dipende dalla macchina a cui esso viene associato.
- Open shop*: il sistema è costituito da diverse macchine ciascuna delle quali compie una particolare lavorazione e impiega un certo tempo. In questo modello si suppone che l'ordine delle lavorazioni compiute su ogni lotto non sia rilevante e quindi che il prodotto possa essere indirizzato indifferentemente verso una qualunque delle macchine per subire la corrispondente lavorazione prevista dal ciclo.
- Flow shop*: si tratta di modelli di schedulazione contenenti più macchine in serie. Nel caso del flow shop, e per tutti i modelli di job shop, ogni job è caratterizzato da una determinata sequenza di operazioni (routine) che richiede l'intervento di più risorse diverse (macchine e personale). Nell'ambito produttivo il flow shop è caratterizzato da un flusso dei materiali unidirezionale in modo che alla  $j$ -esima operazione corrisponda la  $j$ -esima macchina; inoltre la sequenza delle operazioni è la stessa per tutti i jobs. Un esempio reale di flow shop è dato dall'assemblaggio di componenti su schede elettroniche per il quale, in molti casi, tutte le schede visitano le macchine nello stesso ordine. Esiste un flow shop più generico per il quale ogni job può avere meno di  $m$  operazioni e quindi vi sono alcuni job che non visitano tutte le  $m$  macchine del sistema.
- Job shop*: i classici problemi di job shop differiscono da quelli di flow shop, per un aspetto molto importante: il flusso dei materiali e delle operazioni non risulta essere unidirezionale. Gli elementi del problema sono dati da un set di macchine e una collezione di job da schedulare; ogni job è dato da un insieme di operazioni con la stessa struttura di precedenza lineare che caratterizza i modelli di flow shop. Un esempio interessante di job shop è quello dei reparti di fabbricazione dei pezzi meccanici, in cui i diversi tipi di pezzi visitano le macchine utensili secondo un loro particolare routing. Sebbene sia possibile ammettere un qualsiasi numero di operazioni per ogni job, nella maggior parte dei casi si ha che ogni job deve avere esattamente una operazione su ogni macchina. Dato che il flusso di lavoro di un job shop non è unidirezionale, ogni macchina può essere caratterizzata da un flusso in ingresso e uno in uscita.

## 18.3 Caratterizzazione della schedulazione

Quando ci si avvia ad affrontare un problema di schedulazione, di qualunque tipo esso sia, è opportuno andare a descriverne le caratteristiche. In generale queste sa-

ranno riconducibili a uno schema di riferimento generale, sulla base del quale sarà poi possibile effettuare una contestualizzazione al caso specifico.

Fra i principali elementi di una schedulazione si hanno:

- *vincoli*
  - restrizioni temporali: ordinamento delle attività, date prefissate per l'esecuzione di un lavoro;
  - capacità delle risorse: diverse tipologie di risorse (denaro, personale, materiali), risorse consumabili o rinnovabili;
- *criteri di ottimizzazione utilizzabili*
  - makespan (lunghezza della schedulazione);
  - livellamento delle risorse;
  - ritardo sui tempi di consegna;
  - costo dell'allocazione delle risorse.

I problemi di schedulazione, nell'ambito della ricerca operativa, sono forse stati quelli che hanno avuto i migliori risultati con l'adozione della programmazione a vincoli (*constraint programming*) per ragioni di flessibilità degli applicativi, generalità dei concetti e relativa facilità della codifica.

In generale un qualunque problema di schedulazione dovrà presentare un elenco di attività a cui possono essere associate alcune informazioni connotative, che saranno utilizzate dall'algoritmo durante la fase di assegnazione:

- istante iniziale dell'attività;
- istante finale delle attività (oppure durata);
- risorse;
- attività alternative (routing alternativi);
- attività precedenti e seguenti;
- shift di attività consentiti.

Le attività possono essere poi suddivise in tre categorie:

- attività di intervallo;
- attività frazionabile mediante pause;
- attività frazionabile mediante altre attività.

In una schedulazione un aspetto essenziale è rappresentato dal *timetabling*, ovvero dalla definizione dei tempi e degli orari; le restrizioni temporali costituiscono vincoli al momento in cui viene definito il periodo di riferimento che sarà considerato durante la schedulazione.

La scelta poi dell'unità temporale minima di riferimento, consente di stabilire il livello di dettaglio della schedulazione. A questo proposito per esempio può risultare inutilmente gravoso scegliere il turno lavorativo come unità temporale di riferimento, perché nella pratica operativa esistono comunque sempre variazioni e aggiustamenti, spesso fatti manualmente, e conseguenti a eventi non controllabili e imprevedibili.

In generale quando si affronta un problema di ottimizzazione della schedulazione, frequentemente si possono sfruttare le informazioni sui costi per definire una buona strategia di ricerca della soluzione.

Un altro argomento che può essere considerato in un problema di schedulazione è rappresentato dal *routing*, noto tradizionalmente come il problema di ricerca di un insieme di percorsi coperti da un gruppo di veicoli che partono e terminano allo stesso deposito.

I vincoli associati a questo specifico tema sono:

- restrizioni temporali (finestre temporali, durata massima di un viaggio);
- capacità del veicolo;
- domanda dei clienti.

Analogamente a quanto già detto in precedenza per il caso generale, nel caso di un routing i criteri di ottimizzazione sono basati su:

- numero di veicoli;
- costo di viaggio;
- tempo di viaggio.

Il routing è stato già risolto con varie tecniche di ricerca operativa di seguito citate:

- Branch & Bound;
- Programmazione dinamica;
- Ricerca locale;
- Branch & Cut;
- Column generation.

Nell'ambito della ricerca delle soluzioni di schedulazione, risorse e attività sono indicate spesso con i termini rispettivamente di *task* e macchina, mentre il termine *job* si riferisce in genere a insiemi di task tecnologicamente legati tra di loro.

Tradizionalmente a un certo job, possono essere associate varie informazioni.

- *Tempo di processamento o durata  $p_{ij}$* : è il tempo deterministico che il job  $j$ -esimo richiede alla macchina  $i$ -esima per essere eseguito. In genere esso corrisponde a uno dei task ( $i$ -esimo) che compongono il job  $j$ .
- *Tempo di rilascio  $r_j$* : indica l'istante di tempo, rispetto a un tempo iniziale 0, prima del quale non è possibile iniziare l'esecuzione del job  $j$ . Un esempio si può avere considerando il caso di materie prime per effettuare il job  $j$  che arrivano un certo giorno prima del quale il job  $j$  non può iniziare.
- *Tempo di consegna  $d_j$* : indica l'istante di tempo, rispetto a un tempo iniziale 0, entro cui l'esecuzione del job  $j$  dovrebbe essere terminata. Spesso la violazione di una delle date comporta costi.
- *Peso  $w_j$* : indica l'importanza relativa del job  $j$  rispetto agli altri. Per esempio questo peso rappresenta il costo di mantenere nel sistema il job  $j$ .

Ulteriori specifiche necessarie per una corretta e completa definizione del problema dello scheduling [5] sono le seguenti.

- *Tempi di set up*: questa caratteristica è presente soprattutto nei problemi a singola macchina e indica se si vuole fare seguire il job  $k$  al job  $j$ : in tal caso tra il completamento del job  $j$  e l'inizio del job  $k$  si deve configurare la macchina, con un tempo richiesto  $s_{jk}$ . Si può eventualmente ipotizzare una dipendenza di  $s_{jk}$  dai job precedenti  $j$  e seguenti  $k$ .

- **Vincoli di precedenza:** in alcuni casi si devono impostare vincoli di precedenza fra i task di un job. Tali vincoli sono espressi con l'uso di un grafo orientato in cui i nodi corrispondono al job e gli archi esprimono i vincoli di precedenza, per esempio un arco da  $j$  a  $k$  indica che il job  $k$  non può iniziare prima del termine di  $j$  (Figura 18.1).

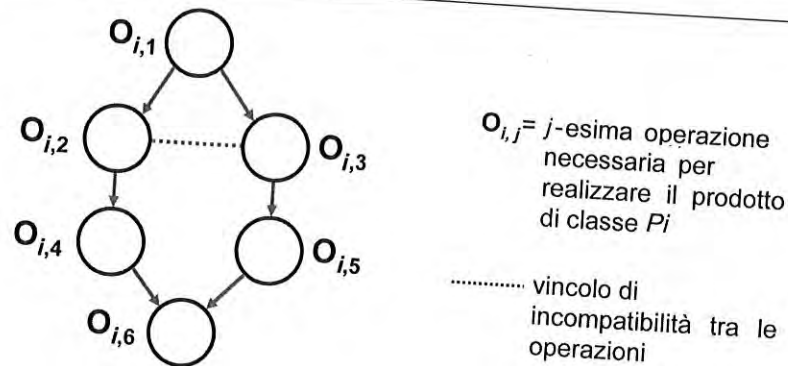


Figura 18.1 Vincoli di precedenza.

- **Condizioni di blocking e no wait:** queste condizioni si verificano per esempio nel caso del flow shop, dove i job in attesa di essere eseguiti da una macchina sono in genere posti in un buffer. Se il buffer della macchina  $i$  è pieno, un job terminato sulla macchina  $i - 1$  non può trovare posto nel buffer della macchina  $i$ , ed è quindi costretto a tenere bloccata la macchina  $i - 1$ , che non può avviare un nuovo task, fino a che non viene liberata: questa è la condizione di blocking. Nel caso invece in cui a un job non sia consentito di attendere su una macchina, e invece occorre garantire che all'istante di completamento di un task su una macchina, la macchina successiva sia già libera per processare il job, si parla di condizione di no wait.

Altre condizioni di vincolo che risulta opportuno impostare nella definizione di un problema di scheduling sono basate per esempio sul fatto che una macchina non può eseguire due job contemporaneamente o che uno stesso job non può essere eseguito da due macchine contemporaneamente.

Per caratterizzare in modo formale un problema di schedulazione si deve infine giungere alla definizione di alcuni obiettivi che dovranno essere considerati dall'algoritmo di risoluzione individuato.

Questi obiettivi possono essere espressi ricorrendo a alcune funzioni associabili ai vari job [3]:

- **tempo di completamento  $C_j$ :** è il tempo a cui l'ultimo task del job  $j$  termina;
- **lateness  $L_j$ :** è la differenza tra il tempo di completamento e la data di consegna del job  $j$ . Si noti che se questa grandezza è positiva allora essa indica un ritardo, se invece è negativa corrisponde a un anticipo rispetto alle due date. Si ha dunque che  $L_j = C_j - d_j$ ;

- **tardiness  $T_j$ :** coincide con la lateness quando questa è positiva, ed è zero altrimenti, ossia  $T_j = \max\{0, L_j\}$ .

A partire dalle funzioni precedentemente definite si possono ottenere le funzioni obiettivo della schedulazione.

- **Massimo tempo di completamento o makespan  $C_{max}$ :** data una schedulazione  $S$  questo obiettivo è definito come  $\max\{C_1, \dots, C_n\}$  ovvero il tempo di completamento del job che termina per ultimo. Esso rappresenta la misura del tempo necessario a completare tutta l'attività.
- **Massima lateness  $L_{max}$ :** data una schedulazione  $S$ , questa funzione è definita come  $\max\{L_1, \dots, L_n\}$ , ossia il ritardo del job che termina in maggior ritardo rispetto alla propria data di consegna.
- **Massima tardiness  $T_{max}$ :** è definita come  $\max\{0, L_{max}\}$ .
- **Somma pesata dei tempi di completamento:** data una schedulazione  $S$ , questa è definita come  $\sum_{j=1}^n w_j C_j$ . Nel caso i pesi siano tutti uguali tra di loro, questa grandezza rappresenta il tempo complessivamente trascorso nel sistema dai job (dall'istante 0 al loro completamento), ovvero è una misura del livello di servizio offerto dal sistema.

Si noti che in generale un problema di schedulazione potrà essere impostato in modo da determinare una soluzione multi-obiettivo; per esempio non soltanto effettuare la consegna di una commessa al minimo costo possibile, ma anche effettuare tale consegna in maniera equilibrata, bilanciando quanto più possibile i carichi di lavoro dei veicoli; questo consente a una azienda che ha una propria flotta di veicoli di limitare il ricorso ai corrieri esterni.

Un approccio che è comunemente seguito nella risoluzione di problemi multi-obiettivo, consiste nello scegliere fra gli obiettivi prefissati quello più importante, che diventerà l'obiettivo della risoluzione e nel considerare gli altri obiettivi come condizioni di vincolo.

Comunemente nei problemi di schedulazione viene utilizzata una notazione convenzionale che riportiamo [3], quella di Graham (Figura 18.2), con la quale è possibile indicare in modo sintetico quelli che sono gli aspetti essenziali del problema analizzato.

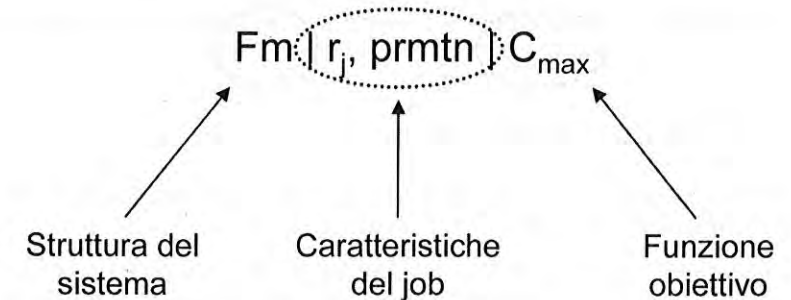


Figura 18.2 Notazione di Graham.

Consideriamo adesso un sistema produttivo costituito da  $m$  macchine che devono essere utilizzate per la produzione di  $n$  ordini di lavorazione distinti. Per ogni ordine  $j$  è assegnato un limite superiore  $d_j$  sulla data di consegna, e un tempo di lavorazione  $s_{jk}$  richiesto sulla  $k$ -esima macchina. Ipotizziamo inoltre che ogni prodotto debba subire una fase di lavorazione su ciascuna delle macchine, nell'ordine degli indici crescenti delle macchine: la prima lavorazione sulla macchina-1, la seconda sulla macchina-2 e così via.

Il problema di sequenziamento ottimale consiste dunque nel determinare la migliore sequenza di lavorazione degli ordini, in modo da minimizzare il tempo totale di completamento di tutti gli ordini, nel rispetto delle date di consegna di ciascuno di essi.

Introduciamo le seguenti variabili decisionali:

$t_{jk}$  = istante di inizio della lavorazione del prodotto  $j$  sulla macchina  $k$

$T$  = istante di completamento di tutte le lavorazioni

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se l'ordine } i \text{ viene svolto prima di } j \text{ sulla macchina } k \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

si pone  $M = \sum_j d_j$  e formuliamo il modello così descritto da:

l'obiettivo:

$$\min T$$

i vincoli:

$$t_{jm} + s_{jm} \leq T \quad \text{per qualunque } j$$

$$t_{jm} + s_{jm} \leq d_j \quad \text{per qualunque } j$$

$$t_{jk} + s_{jk} \leq t_{jk} + M(1 - y_{ijk}) \quad \text{per qualunque } i, j, k \quad i < j$$

$$t_{jk} + s_{jk} \leq t_{jk} + My_{ijk} \quad \text{per qualunque } i, j, k \quad i < j$$

$$t_{jk} + s_{jk} \leq t_{j,k+1} \quad \text{per qualunque } j, k = 1, 2, \dots, m-1$$

$$t_{jk} \geq 0, T \geq 0, y_{ijk} \in \{0, 1\}$$

I vincoli sopra riportati indicano rispettivamente il tempo di completamento  $T$  di tutti gli ordini, il rispetto delle date di consegna, vincoli di contemporaneità di due ordini sulla medesima macchina, ordine di esecuzione delle lavorazioni sulle macchine.

## 18.4 Metodi di risoluzione

La risoluzione dei problemi di schedulazione può essere fatta attraverso l'uso di differenti modalità di approccio [8].

- *Metodi manuali*: la ricerca della soluzione per problemi molto complessi non risulta sicuramente semplice attraverso un approccio manuale e difficilmente si può arrivare alla determinazione della soluzione migliore, ma questa modalità può comunque essere opportuna se viene abbinata a strumenti di supporto di tipo

visuale come i diagrammi di Gantt, mappe ecc. Questa impostazione risolutiva induce naturalmente alla generazione di euristiche per la comprensione diretta dei vari aspetti del problema.

- *Ottimizzazione analitica*: la ricerca dell'ottimo assoluto, rappresentato per esempio dalla condizione di minimo di una funzione di costo, risulta nella maggior parte dei casi essere scarsamente praticabile.
- *Ottimizzazione con inserimento di procedura euristica*: al fine di facilitare la ricerca di soluzioni ottime, sono inseriti nei modelli di ottimizzazione alcune regole di tipo euristico, aventi lo scopo di giungere a soluzioni 'buone' in tempi brevi. Le soluzioni trovate dal modello per essere accettabili necessitano di correzioni effettuate tramite metodi di tail & heuristics.
- *Procedure euristiche*: il problema maggiore connesso all'uso di queste tecniche è dato dalla difficoltà di stimare la qualità della soluzione trovata, data la pressoché totale mancanza di confronti; un altro punto debole è costituito dalla mancanza di una diretta analisi di sensitività, la quale può essere comunque effettuata tramite una perturbazione manuale della soluzione e l'osservazione dei cambiamenti prodotti.

Nei problemi di schedulazione possono dunque essere considerati molti criteri per la loro risoluzione, a partire da alcuni concetti generali. È possibile affermare che nei casi pratici trovare la soluzione ottima può risultare troppo oneroso e inoltre, dato che i parametri del modello sono affetti da errori e incertezza, uno sforzo rivolto alla ottimizzazione può di fatto risultare poco utilizzabile; per questo motivo è opportuno accettare anche soluzioni buone che sperabilmente non siano lontane dall'ottimo.

In ogni caso però, una stima, anche per eccesso, dell'errore che si ha accettando una soluzione determinata con un algoritmo euristico rispetto a quella ottima sarebbe sempre comunque importante averla.

## 18.5 Principi pratici di schedulazione della manutenzione

Una schedulazione efficace può derivare unicamente da un processo di pianificazione ben impostato.

I presupposti della schedulazione si fondano sulla capacità di dare "abbastanza" lavoro a chi lo deve svolgere, in modo da poter eseguire una previsione delle ore di manodopera disponibile per un giorno o per una settimana.

Si possono individuare 6 principi generali di tipo pratico, che risultano utili a rendere una schedulazione eseguibile in modo efficace.

1. *Schedulare basandosi sul più basso livello di competenze richiesto*: questo implica che per effettuare una schedulazione delle risorse è necessario eseguire una identificazione delle competenze, e successivamente del numero di persone richieste, delle ore di lavoro e della durata dei lavori. Chi imposterà la schedulazione delle attività dovrà considerare anche un fattore difficilmente standardizzabile, che è legato al *team-building* per l'esecuzione di un lavoro; infatti team uguali sulla carta spesso non lo sono nella realtà.
2. *Considerare le priorità associabili alle singole attività*: nel caso sia necessario effettuare la schedulazione di due attività contemporanee (dovute per esempio al-



la possibilità di avere una macchina o un impianto accessibili perché in condizioni di shut-down), dovrà essere stabilita una priorità di esecuzione. In tale valutazione dovranno essere presi in considerazione anche gli eventuali ordini di lavoro che sono rimasti arretrati (backlog) e che necessariamente dovranno essere completati. È ovvio che nel caso ognuno assegni una priorità alta al proprio ordine di lavoro, solo per assicurarne il completamento, allora risulterà difficile individuare quelle attività che sono realmente più importanti. L'assegnazione delle priorità dovrebbe essere eseguita in base a una classificazione normalizzata, che sia la più oggettiva possibile e in grado di fornire una giustificazione per l'esecuzione.

3. *Schedulare a partire da una previsione delle più alte competenze disponibili:* questo servirà a creare un primo benchmark con quelli che potrebbero essere i risultati raggiungibili. In questa ipotesi, utilizzando come orizzonte temporale di riferimento quello settimanale, ovvero definendo su base settimanale le attività che dovranno essere svolte, si possono andare a considerare lavori multipli che possono essere svolti contemporaneamente sullo stesso sistema, grazie alla disponibilità di risorse particolarmente competenti, e inoltre si possono anche prevedere lavori di tipo proattivo, lavori cioè eseguiti per evitare guasti e blocchi di macchina o di impianto indesiderati.
4. *Schedulare per ogni ora lavorativa disponibile:* nella schedulazione settimanale viene effettuata una assegnazione dei lavori per ogni ora lavorativa disponibile. Nel caso infatti si vada a schedulare lavori per un numero complessivo di ore superiore a quelle disponibili, si avrà un probabile accumulo di lavori arretrati oppure questo potrà portare a una esecuzione qualitativamente scadente dei lavori svolti (con probabili ricorrenze degli stessi interventi); nel caso contrario invece, in cui si proceda a una schedulazione non saturata, si avrà comunque una maggiore probabilità che si verifichino guasti e interruzioni accidentali di macchine o impianti dovuti alla mancata esecuzione dei lavori necessari. Questa considerazione non riguarda però il nucleo di risorse che dovrebbero essere attribuite al pronto intervento, ma solo tutte quelle risorse assegnate a lavori che sono stati precedentemente pianificati. Le ore disponibili, e solo quelle, devono dunque essere utilizzate per l'esecuzione dei lavori, ogni scostamento in eccesso o in difetto probabilmente produrrà effetti indesiderati. Per questo motivo sarà fondamentale una conoscenza precisa e reale di tale disponibilità.
5. *Il capo squadra deve gestire il lavoro giornaliero:* il caposquadra ha una funzione di coordinamento e supervisione dei lavori che sono in corso di esecuzione, e ha il compito, a differenza dello schedulatore che opera in anticipo su un orizzonte temporale di almeno una settimana, di assegnare i lavori con un giorno di anticipo sulla loro data di esecuzione, tenendo conto anche dei vari stati di avanzamento giornalieri, eseguendo, se necessario, una rischedulazione giornaliera di dettaglio dovuta soprattutto a eventi inattesi. Il caposquadra deve effettuare quindi una associazione puntuale fra competenze e attività, dando anche l'autorizzazione all'esecuzione dei vari ordini di lavoro programmati.
6. *Misurare le prestazioni della schedulazione:* il tempo inutilizzato è una prima misura della efficienza della manodopera e della efficacia della pianificazione e schedulazione. Il campionamento dei lavori (work sampling), legato a una stima

del loro completamento, costituisce il modo migliore per determinare la qualità della schedulazione e per valutare la capacità dello schedulatore di dimensionare correttamente le risorse in funzione delle esigenze o ancora per evidenziare eventuali mancanze di competenze da parte delle risorse assegnate ai lavori.

La schedulazione rappresenta dunque un processo operativo a contatto diretto con la esecuzione dei lavori.

Il rispetto dei criteri indicati non necessariamente presuppone l'adozione di strumenti avanzati di calcolo, ma richiede comunque una attività di standardizzazione e formalizzazione, anche con lo scopo di facilitare il controllo. In molti casi si può riscontrare il ricorso, da parte degli schedulatori, a moduli cartacei [1] molto semplici da compilare ma che costituiscono la base informativa su cui poter sviluppare strumenti di supporto più avanzati. Un esempio è riportato in Figura 18.3.

ADVANCE SCHEDULE WORKSHEET #2	
FOR WEEK OF:	_____ TO _____
FOR CREW:	_____ BY: _____ DATE: _____
<b>TOTAL SCHEDULE</b>	
A. TOTAL HOURS SCHEDULED	_____
B. ANY AVAILABLE HRS LEFT UNSCHEDULED ( _____ )	
WHY? (NO BACKLOG, ETC.) _____	
C. TOTAL HOURS RETURNED _____	
ANY HOURS THAT WERE UNCLEARABLE ( _____ )	
D. SCHED HOURS WORKED (D = A - C) _____	
E. % SCHEDULE MET (E = D/A x 100) _____ %	
<b>PREVENTIVE MAINTENANCE</b>	
F. PM HOURS SCHEDULED _____	
G. PM HOURS RETURNED _____	
PM HOURS THAT WERE UNCLEARABLE ( _____ )	
H. PM SCHED HOURS WORKED (H = F - G) _____	
I. % PM SCHEDULE MET (I = H/F x 100) _____ %	

Figura 18.3 Form per la misura della idoneità della schedulazione (Fonte: D. Palmer).

## 18.6 Schedulazione della manutenzione: alcune considerazioni

Gli operai di manutenzione sono a volte accusati di impiegare troppo tempo o di prolungare oltre il necessario il tempo utilizzato per eseguire gli interventi di manutenzione. In realtà gli operatori di manutenzione sono spesso interrotti durante l'esecuzione delle loro attività per vari motivi fra cui:

- percorsi per il prelievo dei materiali di ricambio dai magazzini;
- percorsi per il prelievo di particolari attrezzature dalle officine;
- attesa per attrezzature disponibili (muletti o gru);
- attesa per un'altra attività.

Le interruzioni non sono causate da una mancanza di motivazione o pigrizia ma piuttosto da una carenza di adeguate attività di pianificazione e schedulazione. È ovvio che un lavoro ben organizzato, pianificato e schedulato sarà caratterizzato dal fatto di avere a bordo macchina le parti di ricambio necessarie, le apparecchiature e strumentazioni idonee e la disponibilità di tali elementi dovrà essere confermata prima di procedere alla assegnazione del lavoro. Vi dovrà essere una conoscenza della tipologia di lavoro da svolgere in modo che i lavori sono pianificati e il personale più adeguato possa essere assegnato al momento giusto.

I lavori non pianificati o i lavori che risultano per esempio da fermate improvvise degli impianti, costituiscono nella maggior parte dei casi una larga percentuale della attività lavorativa giornaliera di un operatore di manutenzione.

Questo aspetto di "accidentalità" di alcuni interventi di manutenzione rappresenta un fattore di disturbo per la schedulazione, in quanto questi eventi possono essere dimensionati soltanto attraverso "riserve di manodopera", opportunamente stimate a partire da una conoscenza delle caratteristiche affidabilistiche e manutentive degli impianti.

Lo scenario che si presenta a uno schedulatore può essere schematizzato come riportato in Figura 18.4.

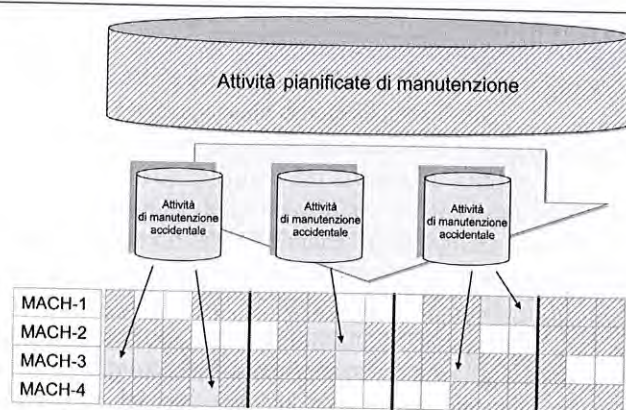


Figura 18.4 Composizione del calendario di schedulazione delle attività pianificate e delle attività accidentali.

È sottinteso che essendo la schedulazione una "traduzione operativa" di ciò che è già stato stabilito, soltanto le attività che sono state pianificate possono essere sottoposte a schedulazione e deve esserci una stima della durata dei lavori prima che il lavoro sia stato schedulato. Naturalmente, maggiore sarà la correttezza della stima effettuata, maggiore sarà anche la bontà e corrispondenza con la realtà della schedulazione ottenuta.

## 18.7 Il ruolo di schedulatore della manutenzione

A seguito di una qualunque soluzione di schedulazione fornita da uno strumento di calcolo, esiste comunque sempre una fase di "messa a punto" svolta da chi effettivamente eseguirà una assegnazione dei lavori alle singole e specifiche risorse.

La possibilità di inserire all'interno di applicativi di schedulazione una anagrafica identificativa per ogni risorsa umana coinvolta, con il proprio nome, cognome e competenze, può consentire di andare oltre la schedulazione generica e di arrivare alla precisa personalizzazione della schedulazione all'interno della realtà aziendale considerata.

È comunque bene precisare che, anche in presenza di applicativi avanzati, il ruolo dello schedulatore resta comunque essenziale in quanto a lui è relegato il compito di verificare eventuali "dimenticanze" che possono essere avvenute durante l'impostazione della schedulazione nell'applicativo.

L'inserimento poi di note aggiuntive ai singoli ordini di lavoro manutentivi che dovranno essere svolti rappresenta una ulteriore occasione di interazione del responsabile della schedulazione con la soluzione proposta dall'algoritmo di calcolo; il ruolo organizzativo di programmatore operativo delle attività deve essere dunque assolutamente previsto.

In generale a tale ruolo dovranno essere associate competenze sia di tipo tecnico-analitico sia di tipo comunicativo.

Fra i *compiti* di uno schedulatore [1] possiamo individuare:

- assegnare dei codici agli ordini di lavoro;
- verificare le priorità associate ai lavori;
- verificare la coerenza fra la indicazione della programmazione operativa e i piani di più lungo periodo;
- eseguire ispezioni su campo;
- eseguire acquisti se necessari;
- verificare la presenza di attrezzature e materiali;
- valutare i feedback dei lavori eseguiti per favorire eventuali miglioramenti futuri;
- prevedere regole di sicurezza;
- utilizzare sistemi informativi dedicati alla manutenzione (CMMS) e altri applicativi per supportare la funzione manutentiva;
- fornire assistenza tecnica al personale di manutenzione;
- preparare i report di esecuzione.

## 18.8 Un parallelo fra i concetti di schedulazione della produzione e di schedulazione della manutenzione

Un'osservazione che merita di essere fatta riguarda il legame fra schedulazione della manutenzione e schedulazione della produzione.

In generale è possibile affermare che un modello di schedulazione della manutenzione è complementare a quello di schedulazione della produzione, basti pensare al fatto che gran parte delle attività manutentive, almeno quelle a contenuto tecnico e tecnologico più consistente, vengono eseguite quando la macchina o la linea produttiva sono ferme.

È dunque possibile fare un parallelo fra i concetti e i criteri di schedulazione produttiva, con quelli di schedulazione della manutenzione; il problema è riconducibile alla costruzione del parallelo esistente fra i parametri considerati nella schedulazione produttiva con quelli di schedulazione della manutenzione (Tabella 18.1).

**Tabella 18.1** Confronto fra i parametri di schedulazione della manutenzione e della produzione

Esempi	Schedulazione produzione	Schedulazione manutenzione
Disponibilità macchine	Macchina on	Macchina off
Tempi di set up	Attrezzaggio macchina	Messa in sicurezza macchina
Tempi di ciclo	Tempo di attraversamento linea	Tempo standard di esecuzione intervento
Sequenza di ciclo	Ciclo produttivo	Ciclo standard manutentivo

Nella schedulazione della manutenzione, il primo passo che deve essere eseguito riguarda la mappatura di date e orari in cui la macchina o gli impianti saranno in condizione di essere mantenuti, successivamente si elabora un documento che costituisce il master plan delle attività manutentive, contenente informazioni relative agli standard dei lavori manutentivi (tempi di ciclo, attrezzature, materiali e parti di ricambio) e caratteristiche della capacità di manodopera (finita o infinita). In questa prima valutazione sono pertanto escluse tutte quelle attività manutentive che possono essere effettuate anche in condizioni di macchina accesa, eseguite anche dal personale della produzione (per esempio dove sia stata adottata una manutenzione produttiva).

Spesso alla schedulazione della produzione può essere associata una varianza previsionale abbastanza contenuta, e ciò è in gran parte dovuto al tasso di automazione presente ormai in modo diffuso nell'ambito produttivo, che è invece ridotto nel processo manutentivo caratterizzato da fattori di disturbo fra cui la variabilità delle competenze della manodopera.

Sebbene dunque le attività manutentive occupino una frazione del calendario aziendale sensibilmente inferiore rispetto a quello corrispondente alla produzione, la schedulazione manutentiva presenta non poche problematiche, gran parte delle quali sono riconducibili allo scarso livello di standardizzazione presente nell'ambito manutentivo ma al tempo stesso questo aspetto può costituire un motivo per incentivare e motivare tale standardizzazione.

## 18.9 Software in commercio

Nel corso degli ultimi anni si è andata sempre più intensificando la comparsa sul mercato di molti applicativi software utilizzati per la schedulazione.

È opportuno a questo punto dare alcuni chiarimenti:

- spesso il modulo di schedulazione è inserito all'interno di sistemi integrati di gestione aziendale (ERP);
- gli applicativi dedicati alla schedulazione riguardano tematiche legate all'ambito produttivo piuttosto che alla schedulazione della manutenzione;
- la maggioranza degli applicativi ha una impostazione a capacità infinita e pervengono alla soluzione della schedulazione molto frequentemente attraverso l'uso di euristiche piuttosto che di ricerca della soluzione esatta;
- raramente sono previsti comandi di riposizionamento manuale della soluzione, ovvero a fronte di una soluzione fornita dall'algoritmo, in pochi casi è possibile una interazione diretta da parte del personale responsabile della schedulazione con tale soluzione, non dando quindi la possibilità di riposizionare in modo arbitrario i job allocati sul calendario.

Tali strumenti generalmente servono dunque per fornire con un opportuno anticipo, varie tipologie di informazione come per esempio i picchi di servizi o produzione, overflow, livelli di saturazione delle risorse, evidenziare situazioni di contemporaneità associate allo svolgimento delle attività e anche consentire l'uso di risorse alternative (esterne) a quelle consuete per lo svolgimento degli stessi lavori (dando così anche indicazioni di tipo organizzativo).

Alcune delle caratteristiche più apprezzate in questi applicativi, sono costituite da:

- velocità di elaborazione della soluzione;
- facile lettura dei job per risorsa (report);
- possibilità di effettuare una schedulazione a capacità finita e infinita;
- possibilità di impostare vincoli sia dinamici sia statici;
- elevata interfacciabilità con sistemi informativi già presenti in azienda in particolare con quelli legati alla gestione dei materiali;
- facilità nell'aggiornamento dei parametri di schedulazione per tenere conto di variazioni delle priorità, inserimento di ordini di lavoro urgenti, variabilità nella disponibilità delle risorse ecc.;
- possibilità di scegliere l'entità a cui riferire la schedulazione (macchina, risorsa umana, centro di costo ecc.);
- completezza della reportistica.

I metodi euristici che sono più diffusi all'interno degli schedulatori presenti in commercio sono di seguito riportati:

- *First Come - First Served* (primo arrivato primo servito);
- *Shortest Processing Time* (minimo tempo di lavorazione);
- *Weighted Shortest Processing Time* (minimo tempo di lavorazione pesato);
- *Longest Processing Time* (massimo tempo di lavorazione);
- *Weighted Longest Processing Time* (massimo tempo di lavorazione pesato);
- *Earliest Due Date* (data di consegna più vicina).

Una loro trattazione più approfondita esula dai contenuti del presente testo.

## 18.10 Un esempio di applicazione

Come esempio di applicazione si riporta un caso semplice, corrispondente alla realizzazione di uno schedulatore per la manutenzione.

L'impostazione generale del problema può essere rappresentata come in Figura 18.5.

A fronte dunque di una impostazione delle caratteristiche del problema, date dalle proprietà delle risorse, dai vincoli della schedulazione e dalla impostazione delle funzioni obiettivo, l'elaboratore, attraverso un algoritmo, perviene alla determinazione di una soluzione di schedulazione, rappresentata dalla configurazione dell'insieme delle associazioni di risorse umane e materiali alle macchine, che meglio di ogni altra ha il massimo livello di raggiungimento dell'obiettivo fissato.

Si può notare come lo schema riportato in Figura 18.5 presenti, a partire dal database delle anagrafiche di sistema, una possibilità di introdurre risorse incognite riconducibili per esempio (ma non solo) a interventi non pianificati sulle macchine.

Lo schedulatore agirà sulle attività manutentive che sono state precedentemente pianificate, ma anche sulle attività che derivano per esempio da guasti accidentali e che possono rientrare soltanto all'interno di un orizzonte di brevissimo periodo (settimana o addirittura giorno) proprio della schedulazione.

Una caratteristica apprezzata in applicativi dedicati alla schedulazione della manutenzione già ricordata è legata alla possibilità di eseguire un *dispatching* delle attività in modo manuale a fronte di una soluzione proposta dalla elaborazione; in questa maniera è sempre possibile da parte del responsabile della schedulazione adattare la soluzione teorica alla reale situazione che in pratica si verifica all'interno degli ambiti produttivi in cui la manutenzione dovrà essere svolta.

Un'altra importante proprietà che uno schedulatore per la manutenzione dovrebbe avere è quella di poter impostare i picchi di carico manutentivo consentiti. A questo proposito si pensi alla distribuzione delle attività manutentive pianificate sui

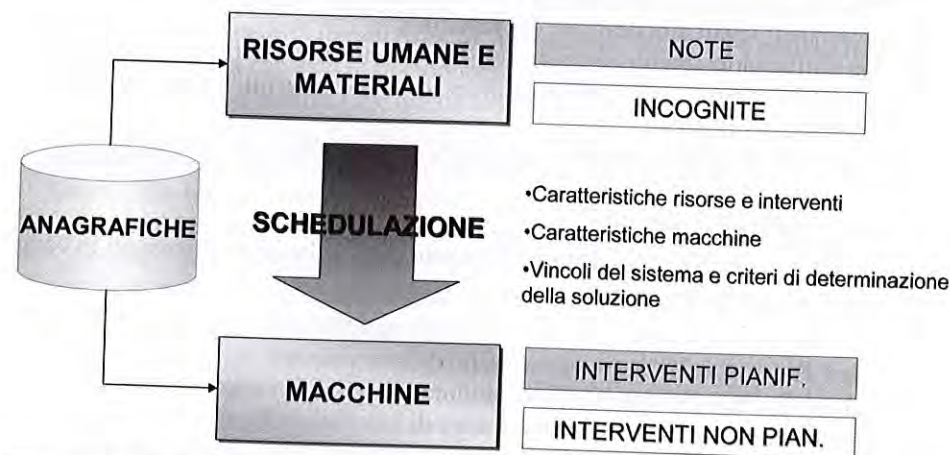


Figura 18.5 Impostazione generale dello schedulatore.

12 mesi dell'anno: soprattutto all'interno degli impianti di processo in genere il mese di agosto coincide con la "grande fermata", alla quale si rimandano tutti gli interventi più onerosi in termini di tempi necessari per l'esecuzione.

Molti interventi manutentivi possono essere svolti in condizioni di sicurezza quando la macchina o l'impianto sono fermi. La schedulazione della manutenzione è in questo senso duale a quella della produzione, come si è detto infatti le finestre temporali in cui possono essere svolti gli interventi manutentivi coincidono spesso con i periodi di pausa o di fermo della produzione.

In una visione integrata, appare dunque inopportuna la presenza di due differenti tipologie di schedulatori (quello della produzione e quello della manutenzione), anche per una serie di problemi di interfacciamento sia funzionale sia organizzativo non sempre di facile soluzione. Sarebbe invece auspicabile che una schedulazione della produzione prevedesse anche la schedulazione degli interventi manutentivi, in modo da avere una valutazione globale e non parziale del sistema gestito.

Di fatto in commercio non si hanno molti esempi di schedulatori integrati (nel senso sopra indicato), la maggior parte di essi risulta essere più basata su degli adattamenti che non su applicativi impostati secondo una visione di tipo integrato.

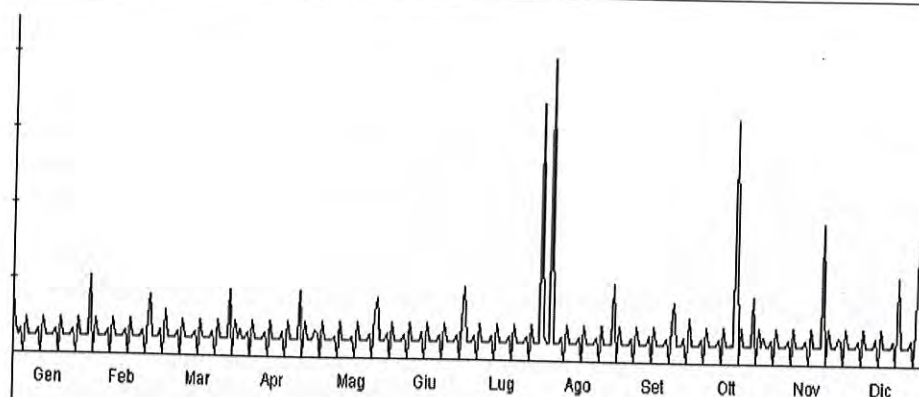
È ovvio dunque che la disponibilità di manodopera e la disponibilità di macchine o impianti in condizioni di off, varierà nel corso dell'anno; in altre parole nel mese di agosto nel caso citato si avrà necessità di una maggiore quantità di ore-uomo dal momento che le macchine saranno accessibili per la manutenzione proprio perché in off. Queste condizioni rappresentano di fatto vincoli per il calendario.

Gli elementi di uno schedulatore della manutenzione possono dunque essere ricondotti ai seguenti elementi principali:

- *attività da svolgere*: sono i task da eseguire sulle varie macchine/impianti alle quali sono associate determinate caratteristiche in termini di unità temporali-uomo necessarie e unità temporali macchina/impianto in stato off;
- *calendario disponibilità macchine/impianti*: per ogni giorno dell'anno e per ogni macchina/impianto devono essere riportate le unità di tempo in cui la macchina potrà essere sottoposta a manutenzione;
- *calendario disponibilità manodopera*: nel caso di schedulazione a capacità finita dovrà essere impostato il monte complessivo unità temporali-uomo, che dovrà essere distribuito sulle varie attività da svolgere;
- *picchi di carico consentiti*: vengono riportate le caratteristiche associabili alle grandi fermate.

Nella Figura 18.6 si riportano in ascisse i mesi dell'anno (si tratta infatti di una schedulazione avente come orizzonte temporale i 12 mesi dell'anno) e in ordinate le unità di tempo di manodopera richieste per l'esecuzione dei lavori di manutenzione schedulati sulle varie macchine/impianti.

Si può notare che nella prima metà del mese di agosto, coincidente proprio con la fermata di agosto, si ha una concentrazione delle risorse: in tale periodo infatti le macchine/impianti saranno disponibili per la manutenzione, ovvero saranno in uno stato di off. Anche nel mese di ottobre e di novembre sono stati previsti due momenti in cui sarà opportuno incrementare il livello di risorse dedicate agli interventi manutentivi, visto che in autunno è prevista una riduzione del ritmo produttivo.



**Figura 18.6** Grafico di schedulazione manutentiva risultante dall'utilizzo di un tool dedicato.

Dopo avere fatto un'impostazione dei vincoli del sistema, la soluzione riportata in figura è generata dall'algoritmo di schedulazione, avendo impostato come criterio quello del massimo livellamento delle risorse.

La schedulazione avrà due principali tipologie di report:

- dettaglio allocazione risorse umane;
- dettaglio allocazione risorse materiali.

Una importante indicazione associabile all'uso di strumenti come questo è proprio quella di dimensionare il personale operativo, evidenziando la necessità di ricorrere a risorse esterne qualora quelle interne non risultino sufficienti.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] D. Palmer, *Maintenance Planning and Scheduling Handbook*, McGraw-Hill, 1999.
- [2] M.V. Brown, *The Planning and Scheduling Machine*, New Standard Institute, 2003.
- [3] A. Agnetis, *Problemi e modelli di scheduling tra agenti in competizione*, Università di Siena, 2001.
- [4] D. Carini et al., *Shop scheduling*, 2001.
- [5] S. Sacone - DIST, *Modelli di processi produttivi a livello decisionale operative e di controllo*, Genova, 2002.
- [6] F. Tonelli, *La programmazione operativa - Appunti del corso di gestione degli Impianti Industriali*, Università di Genova, 2001.
- [7] Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Telematica, *Schedulazione Real time*, Genova, 2000.
- [8] A. Petri, *Il vehicle routing problem*, 1997.

## Acquisizione dati e monitoraggio delle prestazioni

La possibilità di disporre di dati costituisce la condizione necessaria nello sviluppo di un qualunque tipo di progetto di miglioramento; questo è assolutamente valido anche per quello che riguarda le prestazioni RAM.

Ogni sistema genera dati, ma non tutti i dati sono in generale utilizzabili; non è infrequente la situazione in cui una sbagliata e spesso casuale impostazione del sistema di acquisizione renda di fatto impraticabile qualunque forma di recupero o impiego delle informazioni.

Nel caso di sistemi per i quali è riconosciuta una importanza strategica all'interno di un'azienda, una modalità di acquisizione dati dovrebbe essere concepita durante la fase di progettazione, così da poter generare una base dati unica poiché originata dal sistema stesso fin dalla sua installazione.

Ogni realtà industriale ha una qualche forma e possibilità di acquisizione dati (memoria del personale, schede cartacee, database locali) ma sono poche le aziende che possiedono un processo sistematico e strutturato finalizzato alla raccolta e analisi dei dati da campo.

Disporre e utilizzare i dati generati presso la propria realtà è sicuramente preferibile alla scelta di utilizzare librerie e banche dati, sulla base delle quali si può arrivare anche a risultati molto discordanti dalla realtà di partenza oggetto dello studio, a causa per esempio delle differenti condizioni al contorno.

Le prime pubblicazioni di dati riguardanti l'analisi di affidabilità e di rischio risalgono al diciassettesimo secolo, quando i viaggi fra la Gran Bretagna e le colonie americane divennero più frequenti. In queste pubblicazioni erano raccolti dati storici raggruppati in classi in base ai loro attributi; in quel periodo fu compresa l'importanza strategica di tali dati e infatti queste informazioni furono utilizzate da individui scaltri per accumulare notevoli fortune, stipulando assicurazioni sulla vita o sulla perdita delle merci trasportate. Questi soggetti ebbero la capacità di suddividere in classi i dati storici e di utilizzarli per fare predizioni sulla frequenza degli eventi futuri.

Il progetto dell'automobile è stato uno dei primi a vedere la creazione delle banche dati. L'analisi di affidabilità e del rischio per l'automobile iniziò quando essa divenne un mezzo di trasporto di massa destinato a una larga fascia della popolazione.

Questo cambiamento di clientela portò ad accumulare dati relativi soprattutto alla manutenzione e in base a tali dati, a ridisegnare, sostituire o immagazzinare ricambi di pezzi che si rompevano più frequentemente. Una situazione del tutto simile ha riguardato anche gli aeroplani.

Nessuno all'inizio si preoccupava se un singolo pilota rischiava la sua vita; infatti gli aerei avevano un solo motore: anche la traversata transoceanica compiuta da Lindberg fu realizzata con un aereo dotato di un unico motore. Nonostante questi successi la CAB (*Civil Aeronautics Board*) predecessore della FAA (*Federal Aviation Administration*) decise che gli aeroplani dovevano avere almeno due motori per ottenere la licenza di trasporto passeggeri. Una delle prime utilizzazioni dei dati di affidabilità è stata la certificazione per il trasporto passeggeri del DC-3, dotato di due motori.

Manuali contenenti tassi di guasto relativi a componenti di impianti industriali hanno iniziato a essere disponibili a partire dagli anni '50 del secolo scorso. Grandi compagnie industriali come Radio Corporation of America (RCA), General Electric (GE) e Motorola pubblicarono le prime raccolte di dati: i tassi di guasto dei componenti presentati in queste banche dati si basavano su test o su dati da campo. Storicamente il primo manuale riguardante i dati di affidabilità che ebbe larga diffusione fu il *Titan Handbook* (1959).

Questo manuale conteneva tassi di guasto generici per un'ampia gamma di componenti elettrici, elettronici, elettromeccanici e meccanici; l'unico dato disponibile era però un "generico tasso di guasto" senza alcun riferimento alla numerosità del campione sottoposto al test, il numero di guasti osservati e il tempo (in ore) di osservazione utili per la comprensione della significatività statistica. Nonostante ciò il *Titan Handbook* è stato il primo manuale a presentare tassi di guasto in termini di guasti per milioni di ore. Fu introdotto il *fattore k* che modificava il tasso di guasto generico secondo la ridondanza o il modo operativo.

Si trattava dunque di impostazioni ancora oggi valide. Il *Titan Handbook* ha aperto la strada a programmi di raccolta e organizzazione dei dati di affidabilità ben più ampi. Tali programmi ebbero inizio per soddisfare le esigenze di diversi settori militari dell'esercito statunitense, in particolar modo di quelli missilistici. Le banche dati più importanti relative a tali sforzi che si svilupparono in tale contesto sono:

- *MIL-Handbook-217*
- *Failure Rate Data Bank (FARADA)*
- *RADC Non-Electronic Reliability Notebook*

Nel 1962 fu pubblicato il *MIL-Handbook-217* [MIL-217]; questo manuale faceva riferimento al tasso di guasto costante del modello esponenziale (valido in particolare per componenti di tipo elettronico) e come il *Titan Handbook* riportava tassi di guasto in termini di guasti per milioni di ore. Erano inoltre impiegati fattori  $\pi$  (analoghi ai fattori  $k$ ) per indicare le variazioni dal tasso di guasto generico. I componenti erano raggruppati in ampie categorie generali; le informazioni sulle sottocategorie erano ottenibili impiegando determinati fattori correttivi. I dati contenuti nel *Mil-Handbook-217* erano molto più numerosi di quelli del *Titan Handbook*.

Negli anni '70 i comandanti dell'US Army Material Command, dell'Air Force Logistics Command e dell'Air Force Systems Command sponsorizzarono un programma che incoraggiava lo scambio dei dati fra esercito e aeronautica statunitensi, il programma si allargò all'industria privata e divenne noto come GIDEP (Government/Industry Data Exchange Program). La *Failure Rate Data Bank* riportava dati storici, dati provenienti da prove accelerate di laboratorio e da test dimostrativi di affidabilità. La *Failure Rate Data Bank* fu la prima fonte di dati supportata da un sistema software: ciò le permise un rapido sviluppo. Per la prima volta i dati furono analizzati statisticamente: fu fatta un'analisi statistica molto semplice e furono trovati gli intervalli di confidenza.

L'analisi statistica dei dati rappresentò un contributo molto importante.

Il RADC fu realizzato nel 1979 dall'US Air Force Rome Air Development e conteneva tassi di guasto per circa trecento tipi di componenti o parti.

Questi dati scaturivano da esperienze operative in campo militare e da test. Alcuni tassi di guasto furono ricavati associando componenti simili che operavano in un determinato ambiente: in tal modo i fattori  $k$  erano ottenuti da esperienze specifiche. Per descrivere l'incertezza fu utilizzata la distribuzione  $\chi^2$ ; in questo caso il problema della non omogeneità risultò minore perché i componenti esaminati erano molto più omogenei di quelli considerati dal GIDEP. Successivamente nel RADC confluirono anche i dati dell'Illinois Institute of Technology (IIT) relativi ai microcircuiti.

Questo manuale è stato il primo a riconoscere il problema di mettere insieme dati non omogenei e a usare il *test di Fisher* per determinare l'omogeneità dei dati prima della loro analisi. Ancora oggi i manuali RAC (*Reliability Analysis Center*), pur presentando una lacuna riguardo ai modi di guasto, costituiscono una fonte importante di osservazioni.

All'inizio degli anni '70 l'uso dei tassi di guasto costanti era generalizzato: nessuna attenzione veniva data all'incertezza e in caso contrario la popolazione era considerata omogenea anche se non lo era. Per alcune banche dati, come il *MIL-Handbook-217*, fu scelto di ignorare questo problema e si continuò a espandere la raccolta di dati a categorie più complesse, utilizzando fattori  $k$ . Alcuni analisti, al contrario, iniziarono a capire l'utilità delle banche dati aventi una certa struttura.

## 19.1 Alcune definizioni

È molto comune nell'ambito ingegneristico avere a che fare con varie tipologie di dispersione e incertezza nella raccolta dei dati e delle informazioni relative ad alcune variabili che sono necessarie per analizzare e risolvere problemi pratici.

I dati possono essere impiegati per evidenziare e comprendere alcune relazioni esistenti fra variabili differenti. Dopo avere raccolto i dati, risulta assolutamente necessario utilizzare alcune tecniche per la loro descrizione, per il loro trattamento e la loro successiva analisi.

Si possono ricordare quattro principali attività generali eseguibili su una base dati e che consentono di dare una struttura e impostazione alla loro valutazione.

- *Classificazione dei dati*: in questo modo si riesce immediatamente ad avere una evidenza dei valori estremi, della dimensionalità dei dati (che può essere anche vi-

sta come il numero di assi necessari a una loro rappresentazione grafica) e di come tutti i dati siano collocati rispetto a una scala di riferimento, che potrà essere:

- *nominale* nel caso in cui non esista di fatto un ordine nei dati, ma questi siano semplicemente classificati attraverso alcuni nomi di categorie, per esempio maschio/femmina, progetto concluso/progetto in corso, evento accidentale/evento prevedibile ecc.;
  - *ordinale* nel caso in cui sia presente un ordine fra le varie classi di dati, per esempio rischio elevato/rischio moderato/rischio modesto, classificazioni della resistenza alle infiltrazioni nel terreno ecc.;
  - *a intervallo* nel caso in cui l'intervallo di misura abbia le caratteristiche di una scala ordinale. Per esempio la temperatura è definita su una scala a intervallo, e riconosciamo che una differenza nella temperatura di 5 °C è minore di una differenza di 10 °C. Il numero di incidenti stradali e il numero di ore-uomo perse nella costruzione dei cantieri a causa di incidenti sono variabili ingegneristiche che vengono comunemente misurate su una scala a intervallo;
  - *a rapporto* essa rappresenta il più alto livello di misurazione. Oltre alle caratteristiche della scala a intervallo una classificazione a rapporto, presenta un vero punto zero all'origine. Per esempio la deviazione standard è misurata su una scala a rapporto e in tale caso il punto zero è quello in corrispondenza del quale la varianza è nulla. Alcune grandezze adimensionali di uso comune nell'ingegneria come il Mach o il numero di Reynolds sono misurate su una scala a rapporto.
- *Descrizione grafica dei dati:* spesso la rappresentazione grafica può risultare la modalità migliore per valutare le caratteristiche principali di un campione di dati. Esistono varie tipologie di rappresentazione ciascuna delle quali può avere una maggiore affinità e corrispondenza con uno specifico tema ingegneristico. La scelta di un descrittore grafico dovrebbe essere basata su alcune considerazioni elementari, in modo da poter eseguire una scelta più mirata e più adeguata alle specifiche necessità:
    - tipologia di destinatari del grafico;
    - tipologia di dati;
    - dimensione del problema;
    - capacità del descrittore grafico a evidenziare quelle indicazioni e caratteristiche relazionali che si stanno ricercando fra i parametri del problema.
  - *Misure descrittive:* nell'ambito delle applicazioni ingegneristiche, può a volte essere utile caratterizzare i dati con l'uso di alcune misure descrittive. Queste misure che assumono valori numerici possono essere facilmente comunicate e possono "quantificare" le principali caratteristiche dei dati oggetto dello studio. Nella maggior parte dell'analisi dei dati, sono incluse le seguenti tre misure:
    - *misure della tendenza centrale:* media, mediana, moda;
    - *misure della dispersione:* varianza e coefficienti da essa derivati come il coefficiente di covarianza;
    - *misure percentili:* un valore  $x_p$  di percentile  $p$  relativo a un parametro o variabile di un campione, indica il valore del parametro tale che il  $p\%$  dei dati risulta minore o uguale a  $x_p$ . In base dunque a questa definizione allora la mediana è considerata essere il valore di percentile 50.

## 19.2 L'importanza dei dati

È stato stimato per esempio che oltre un miliardo di nuovi file viene generato ogni giorno in tutto il mondo; per questo motivo la missione relativa alla archiviazione e gestione delle informazioni diventa sempre più critica.

Le conseguenze associate alla perdita di dati può essere catastrofica per una organizzazione, in quanto oltre a una perdita del know-how, si ha anche una perdita di risorse legata al tentativo tardivo di recupero di tale know-how.

I dati e le informazioni hanno dunque una importanza di tipo strategico perché è sulla loro conoscenza accurata e attendibilità che è possibile sviluppare nuovi progetti.

Esiste un'interessante statistica che riporta le principali cause di perdita dei dati (Figura 19.1).

Una riflessione da cui possiamo partire per comprendere l'importanza di raccogliere e utilizzare dati deriva dal fatto che se non abbiamo una reale conoscenza di quale sia il nostro obiettivo, allora paradossalmente qualunque risultato ottenuto andrà bene!

Esistono alcune buone e oggettive ragioni per raccogliere sistematicamente dati:

- è l'unico modo affidabile per valutare la rispondenza ed efficacia delle scelte progettuali fatte o delle modifiche apportate in occasione per esempio di una fase di revamping o riconfigurazione dei processi organizzativi, consente in altri termini di fare il monitoraggio delle prestazioni e di comprenderne le caratteristiche funzionali;
- consente di identificare le aree che necessitano di essere migliorate o di essere ulteriormente analizzate;
- permette di recepire utili informazioni che possono essere anche impiegate in realtà analoghe, prevenendo per esempio situazioni o effetti negativi;
- facilita i processi decisionali e la conseguente allocazione delle risorse che sono basate su una evidenza oggettiva piuttosto che su registrazioni occasionali, su impressioni personali ecc.

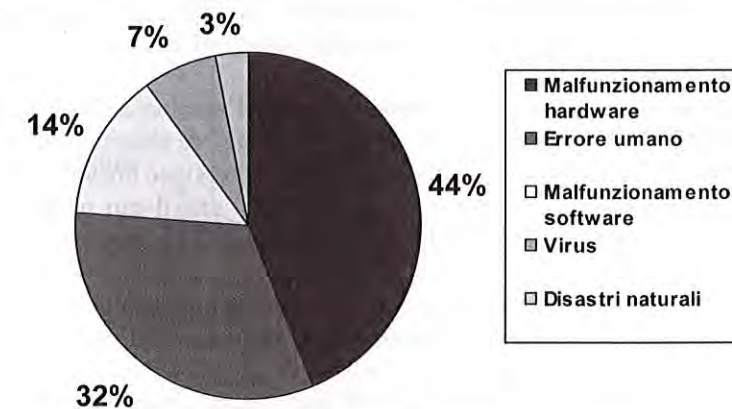


Figura 19.1 Cause di perdita dei dati (Fonte: Sun StortEdge).

Una volta raccolti, i dati possono per esempio essere utilizzati per:

- stimolare nuove idee organizzative;
- migliorare la qualità e idoneità degli interventi progettuali e delle procedure;
- fornire una giustificazione oggettiva (possibilmente quantitativa) a un certo progetto o illustrare la necessità di un nuovo progetto;
- comunicare l'importanza e il valore dei dati al top management;
- implementare un sistema di formazione continuo legato alla rilevazione di nuove esigenze da campo;
- organizzare e schedare le risorse in modo più mirato ed efficiente;
- gratificare con l'evidenza dei risultati ottenuti chi per esempio ha fatto una proposta corretta la quale è stata eseguita e implementata nel sistema.

### 19.3 Alcune proprietà dei dati

Parlando di dati si possono individuare alcune proprietà fondamentali: affidabilità, sensitività, accuratezza e validità.

Il concetto di *affidabilità* dei dati ha un significato diverso rispetto a quello già visto all'interno del presente testo e relativo alla affidabilità di un prodotto o di un sistema.

In merito ai dati, l'affidabilità ha a che fare con la consistenza delle misure, dunque se pesiamo più volte uno stesso mattone e osserviamo assenza di variazioni o piccole modifiche, allora possiamo affermare che le nostre misure del peso sono affidabili. Questo concetto può essere esteso alla misura di qualunque prestazione o funzione.

L'affidabilità di una misura e più in generale di un dato può essere considerata insieme alle proprietà di *sensitività* (*sensibilità*) e *accuratezza*.

La *sensitività* si riferisce specificamente al grado con cui le osservazioni variano a seguito di cambiamenti apportati all'oggetto che è stato misurato.

Per provare a quantificare la sensitività di una misura, si possono usare le misure di correlazione; in particolare il coefficiente di correlazione di Pearson è senza dubbio il più noto. Esso varia su una scala continua fra  $-1$  e  $1$ . Inoltre la forza della relazione esistente fra variabili aumenta via via che tale coefficiente si avvicina a  $-1$  o a  $1$ .

In altri termini, il coefficiente di Pearson rispecchia l'ammontare di dispersione o varianza, al diminuire della quale si ha un sempre maggiore allineamento dei punti sulla retta, nel caso si sia ipotizzata per esempio una regressione lineare.

Un'altra caratteristica del coefficiente di Pearson è che il suo quadrato indica quanto della variazione in una variabile è determinato dalla conoscenza di un'altra variabile.

Per esempio una correlazione pari a  $0.40$  fra l'altezza e il peso indica che il  $16\%$  ( $0.40$ ) della varianza nel peso è determinato dalla conoscenza dell'altezza di una persona (o viceversa).

L'*accuratezza* indica poi quanto le misure sono vicine al valore assoluto di ciò che si è misurato. Un dato per essere affidabile deve risultare dunque sensibile e accurato.

La *validità* delle misure e delle informazioni costituisce un ulteriore elemento essenziale in un processo di raccolta dati: questa proprietà ha a che fare con la verifica che uno strumento misuri veramente quello che si ritiene misuri, cioè deve esserne accertata la reale coerenza con l'oggetto misurato.

Una proprietà di validità dei dati e delle misure non può comunque prescindere da una loro accuratezza e sensibilità; in generale infatti si può dire che una bassa affidabilità o accuratezza dei dati implica una loro scarsa validità, mentre un'alta affidabilità o accuratezza può non implicare validità.

### 19.4 La raccolta dei dati affidabilistici

Negli ultimi anni si sono diffusi sempre di più strumenti di supporto alle decisioni, in particolare nell'ambito delle analisi RAMS.

La crescente capacità di calcolo e di valutazione associata a questi strumenti di tipo informatico, ha spostato nel tempo l'attenzione sulla qualità e accuratezza dei dati di un sistema; infatti la carenza o approssimatività di informazioni costituisce il principale fattore limitativo alla possibilità di effettuare analisi veramente efficaci nell'ambito della affidabilità e degli altri parametri a essi associati.

Le informazioni richieste in un'analisi affidabilistica sono spesso immagazzinate e diffuse in modo disordinato all'interno di una organizzazione, basti pensare alla moltitudine di database locali che si possono scoprire all'avvio di un progetto di riprogettazione o revisione affidabilistica. Inoltre spesso accade che tali informazioni non siano state codificate o siano state salvate con formati non utilizzabili.

In questi casi la fase di pre-processamento dei dati diventa molto importante e anzi necessaria a effettuare quel lavoro di integrazione e completamento, propedeutico per esempio alla realizzazione di un modello per la simulazione (Figura 19.2).

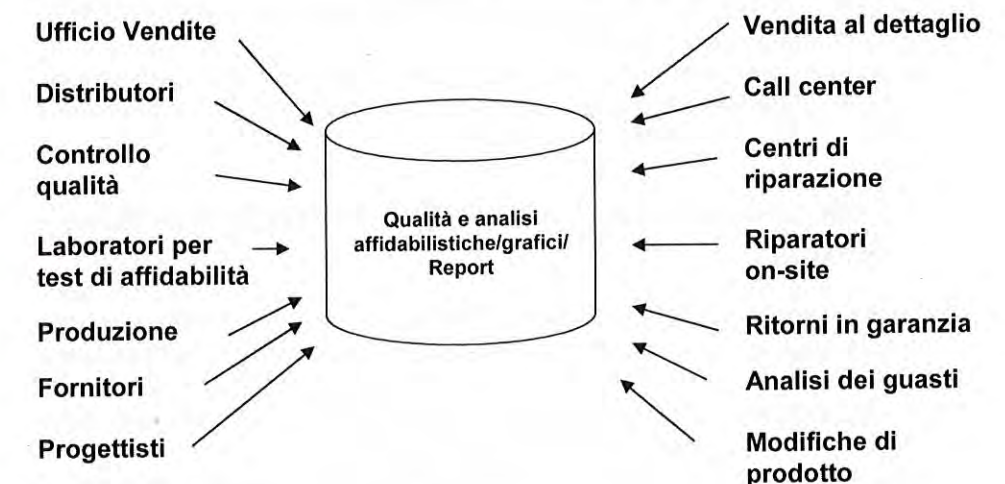


Figura 19.2 Gli ambiti di generazione dei dati (Fonte: ReliaSoft).



## 19.5 Sistemi integrati per l'acquisizione dati

Dal momento che informazioni accurate e rilevate nel tempo sono un elemento essenziale nei progetti inerenti le prestazioni RAM dei sistemi, grande valorizzazione si sta iniziando ad attribuire allo sviluppo di sistemi integrati che forniscano un accesso efficiente a dati facilmente fruibili e accurati, relativi soprattutto alla qualità e affidabilità dei prodotti.

Lo sforzo richiesto per realizzare sistemi di questo tipo risulta essere connesso a un processo molto complesso, che necessita della collaborazione di svariati dipartimenti e uffici all'interno di una azienda. Si tratta infatti di informazioni assolutamente trasversali per le quali possono essere individuati vari contributi.

Il percorso motivazionale che può convincere ad aderire allo sviluppo di uno strumento di questa natura passa da una dimostrazione dei benefici che possono derivare dall'adozione di un sistema di acquisizione dati, mirato al controllo e al miglioramento della qualità e affidabilità dei prodotti; tali benefici si ridistribuiranno sul management aziendale, sui dipartimenti e uffici che hanno contribuito.

Un modo proposto per esempio da alcune software house per implementare e fare accettare un sistema di acquisizione dati orientato alle analisi RAM e al controllo della qualità, è quello di inserire il "meccanismo" di raccolta dati all'interno di un processo unico di report degli incidenti e risoluzione dei problemi, legati ai prodotti della azienda.

Sistemi integrati di questo tipo possono condurre a ottenere i seguenti risultati:

- maggiore rapidità nella gestione delle informazioni e nella esecuzione delle analisi (incremento di efficienza);
- riduzione dei costi legata a una maggiore e più approfondita conoscenza delle caratteristiche dei prodotti e conseguentemente a una progettazione o riprogettazione più rivolta alle reali necessità;
- maggiore customer satisfaction e incremento delle vendite associato alla possibilità di avere un prodotto migliore;
- migliore customer care and service, infatti le informazioni raccolte possono anche essere impiegate per dimensionare opportunamente servizi di assistenza e stabilire condizioni di garanzia più puntuali.

## 19.6 Failure Reporting Analysis and Corrective Actions – FRACAS

Un sistema di analisi dei report di guasto e delle azioni correttive implementate può essere definito [2] come un processo a ciclo chiuso utilizzato nella identificazione e nella tracciatura delle cause originali di guasto, e conseguentemente impiegato per determinare, implementare e verificare l'opportunità di un'azione correttiva necessaria a eliminare il riaccadimento di un evento indesiderato.

Con questo strumento si raccolgono informazioni relative a guasti, analisi e azioni correttive, per valutare i progressi nella eliminazione dei modi e delle dinamiche di guasto che si possono verificare sia all'interno di sistemi di tipo software sia in quelli di tipo hardware.

Uno strumento di questo tipo dovrebbe contenere informazioni e dati a un livello di dettaglio necessario a identificare le carenze presenti nel progetto o nel processo all'interno del quale il sistema è inserito e che devono pertanto essere prontamente eliminate.

Questa impostazione metodologica può essere anche adottata nell'ambito della reingegnerizzazione dei servizi e risulta pertanto avere una validità generale.

Il principale beneficio che può essere ottenuto con l'uso di un *Failure Reporting Analysis and Corrective Actions* (FRACAS) risiede nelle informazioni contenute al suo interno, sempre utili ma spesso anche assolutamente necessarie a individuare prontamente e correggere errori progettuali, errori della manodopera, difetti presenti nel processo.

Un monitoraggio continuo e una tracciatura dei dati, attraverso l'adozione di FRACAS, può fornire per esempio una valutazione di quanto prima i trend di guasto sono stati annullati attraverso l'adozione di una azione correttiva.

Un FRACAS è riconosciuto essere uno degli strumenti più validi nella realizzazione di prodotti e sistemi affidabili grazie proprio alla possibilità di individuare le cause originali del guasto (anche attraverso l'adozione di procedure, dispositivi e tecnologie specifiche di diagnosi) che è insita nel metodo.

Sebbene la cosa migliore sia prevenire i problemi, è assolutamente vitale identificare e correggere quelli che si manifestano, possibilmente prima che il difetto presente nel prodotto sia rilevato dal cliente.

Per ogni FRACAS si deve valutare e accertare l'utilità rispetto all'obiettivo; infatti le perdite associabili a un FRACAS inadeguato e inefficace possono comprendere significativi costi diretti per rilavorazioni, scarti di materiali e parti, servizi di garanzia e anche ben maggiori costi indiretti associati a clienti insoddisfatti.

I benefici di un FRACAS efficace consistono invece in un miglioramento della affidabilità del prodotto o del sistema, in una manutenzione più efficiente, in generale, in un miglioramento diffuso di tutto il processo.

Lo strumento FRACAS necessita comunque di una attività di contestualizzazione e adattamento al particolare prodotto, sistema o processo, a partire da una considerazione delle criticità presenti. Tale metodologia è tanto più importante in ambiti all'interno dei quali le prestazioni RAM e la qualità sono considerati fattori discriminanti del mercato.

### 19.6.1 FRACAS: diagramma di flusso

La normativa presa a riferimento è la MIL-STD-2155(AS) elaborata dal Department of Defense degli Stati Uniti. Tale normativa risale al 1985 e contiene le linee guida da seguire nella realizzazione e implementazione di un sistema di tipo FRACAS. Sebbene questo standard sia nato nell'ambito militare, i concetti risultano essere trasferibili in modo pressoché diretto, ad accezione di una revisione terminologica, anche al contesto industriale, così come avvenuto anche per altri standard citati (MIL-STD-1629 (A) per la FMECA, MIL-HDBK-2173 per l'analisi RCM).

In questa normativa si ribadisce il concetto di closed loop, secondo cui i guasti e le avarie devono essere oggetto di reportistica [4], analizzati e valutati fino alla comprensione della loro causa originale, sulla cui base si dovranno identificare e implementare le azioni correttive più idonee, e successivamente verificarne, mediante test,

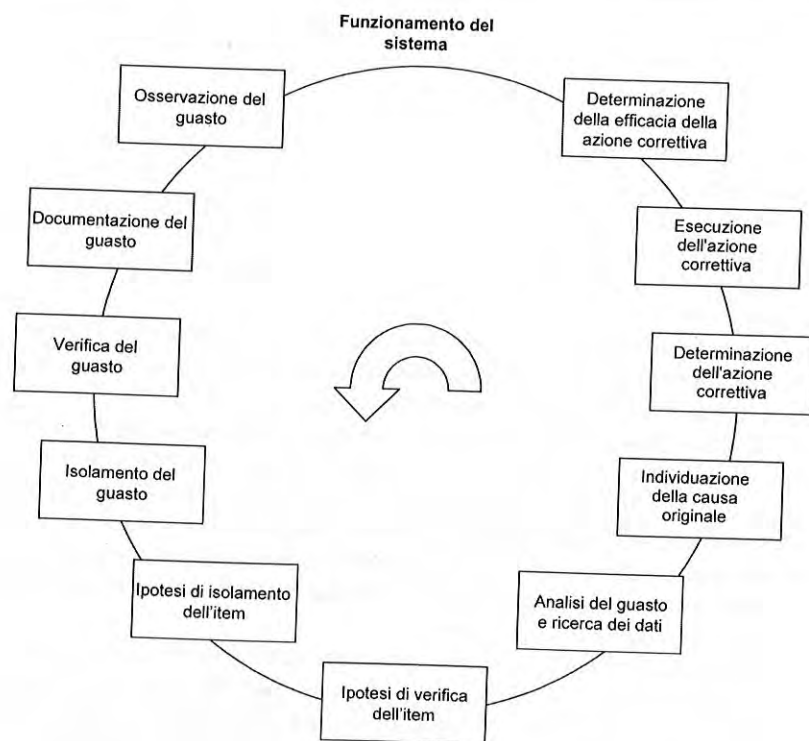


Figura 19.3 Closed Loop.

la correttezza attraverso una verifica di ripetitività dei guasti e un miglioramento delle prestazioni individuate come negative (Figura 19.3).

Nella normativa si riconosce che esistono limiti "pragmatici" all'utilizzo di tempo, risorse, soldi da dedicare all'analisi dell'accadimento di un guasto particolarmente complesso o dell'implementazione delle azioni correttive scelte; questi limiti saranno commisurati alla importanza attribuita all'oggetto di tali valutazioni, all'urgenza del programma, alla tecnologia disponibile.

Lo sviluppo e la successiva implementazione di un FRACAS possono essere articolati nel modo seguente (Figura 19.4):

- **Pianificazione del FRACAS:** preparazione di procedure scritte per la stesura dei report, l'esecuzione delle analisi dei guasti e la registrazione dei feedback associati ad azioni correttive realizzate, compresi i loro test. Per ciascuna di tali procedure sarà individuata una figura di responsabile, i cui riferimenti dovranno essere registrati all'interno del piano FRACAS.
- **Nomina di un comitato di revisione dei guasti:** un comitato dovrà essere stabilito per rivedere i trend di guasto, lo stato delle azioni correttive e per assicurare che esse siano compiute adeguatamente. Questo elemento organizzativo è in genere soggetto a una fase di personalizzazione abbastanza prolungata.

- **Documentazione del FRACAS:** le registrazioni dei guasti dovranno essere mantenute per tutti i guasti avvenuti, per tutte le analisi di guasto effettuate, per tutte le cause di guasto assegnabili, per tutte le azioni correttive intraprese in modo da poter stabilire la loro efficacia. Questi documenti dovranno essere organizzati in modo da permettere un efficiente recupero dei trend di guasto, dei sommari di guasto e dei report di stato e di tutte le altre informazioni connesse a un FRACAS. Al fine di favorire la tracciabilità dei guasti e delle azioni correttive implementate dovrà inoltre essere scelta una opportuna modalità di codifica.

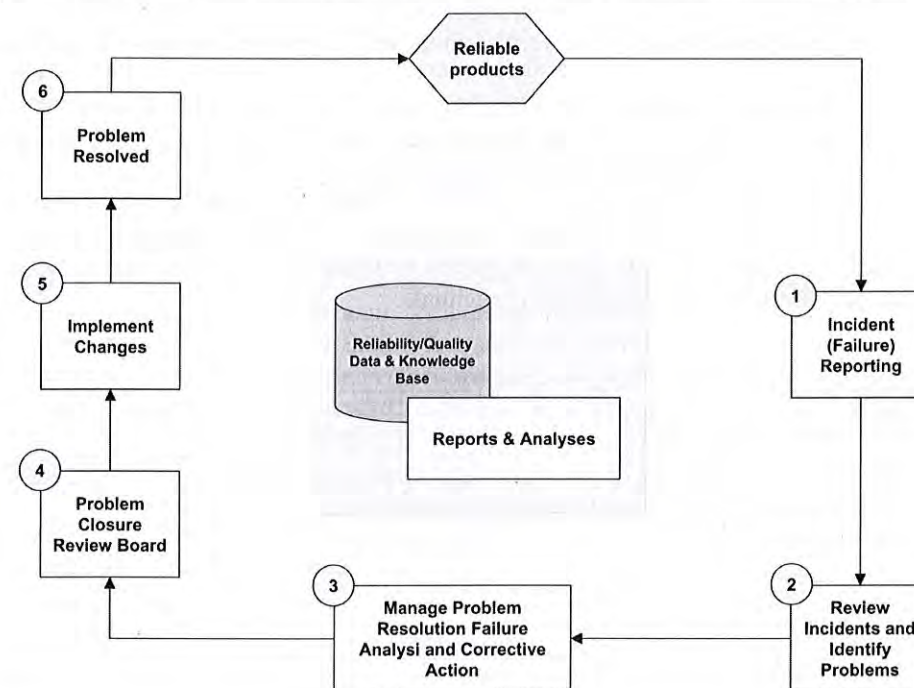


Figura 19.4 Diagramma di flusso di una analisi FRACAS (Fonte: ReliaSoft).

All'interno della normativa MIL-STD-2155(AS) esiste un paragrafo che si occupa di descrivere il rapporto esistente fra FRACAS e FMECA. Si precisa che sebbene questi due strumenti possano essere usati indipendentemente l'uno dall'altro, esiste una sinergia nel caso in cui i due strumenti siano impiegati contemporaneamente. Come riportato nel capitolo dedicato alla FMECA, l'obiettivo primario di questo metodo è quello di influenzare la progettazione o riprogettazione di un prodotto o di un sistema in modo da eliminare o ridurre a un valore accettabile la criticità legata all'accadimento di un guasto e/o delle sue conseguenze. Con un FRACAS d'altra parte si hanno le informazioni e i dati che provengono dal campo relativi ai guasti e alle loro conseguenze.

Si può dunque dire che una FMECA rende più facile un FRACAS fornendo una base strutturata e comprensibile di effetti di guasto e di informazioni inerenti la seve-

rità del guasto da utilizzare nella valutazione di eventi di guasto realmente avvenuti. D'altro canto i report di guasto registrati e analizzati con un FRACAS forniscono un mezzo per verificare e validare la completezza e accuratezza della FMECA effettuata.

In altre parole viene eseguita una sovrapposizione fra il "mondo analitico" di un'analisi FMECA e il "mondo reale" di un'analisi FRACAS.

È sottinteso che nel caso vi siano discordanze sensibili in questo ultimo tipo di confronto, dovrà essere effettuata una revisione del progetto del sistema o del prodotto e, più in generale, dell'intero processo connesso.

L'efficacia di un FRACAS sarà concreta soltanto se i dati di ingresso nei report che documentano i guasti saranno ben registrati, per esempio indicando una descrizione di tutte le condizioni che si verificano attorno al guasto, al fine di facilitarne una identificazione.

Una variante terminologica del FRACAS è quella del PRACAS (Figura 19.5), utilizzato presso il Kennedy Space Center della NASA. L'acronimo sta per *Problems Reporting Analysis and Corrective Action System*, indicando in questo modo la volontà di registrare non soltanto i guasti veri e propri ma anche tutti gli altri problemi che si possono verificare durante l'esercizio di un sistema complesso; in questo modo si amplia l'area di azione di questa metodologia, estendendola anche ad aspetti più di carattere gestionale che progettuale.

Figura 19.5 Un esempio di modulistica utilizzata nell'analisi PRACAS (Fonte: NASA KSC - Modulo PRACAS).

Infine si ribadisce ancora una volta un aspetto che è spesso presente nelle aziende, ovvero quello della non tracciabilità delle informazioni, la quale può essere ricondotta a:

- responsabilità non definita relativamente alla gestione di determinate informazioni, che sono comunemente comprese in un FRACAS;
- assenza di sistematicità e strutturazione nella gestione di un FRACAS, in parte imputabile anche alla causa sopra citata;
- mancanza di integrazione fra i vari soggetti che possono contribuire al successo di un FRACAS.

Questi limiti possono essere superati attraverso interventi mirati di natura organizzativa e con l'adozione di sistemi informatici dedicati.

### 19.7 Prospettive nell'acquisizione dati e nel monitoraggio delle prestazioni

Si vogliono adesso presentare alcune possibili prospettive di sviluppo, già peraltro in corso, che sono associabili alla modalità di raccolta e gestione delle informazioni da campo, e che riteniamo avranno sempre una maggiore diffusione.

Esiste infatti una assoluta fattibilità tecnica ed economica nello sviluppo e nella implementazione di sistemi dedicati a una gestione ingegneristica dei dati generati da un sistema; a questo proposito si possono ipotizzare soluzioni caratterizzate da un sempre maggiore automatismo, le quali dovrebbero condurre a una notevole semplificazione dei processi di gestione dei FRACAS e a una loro maggiore efficienza.

In particolare per quanto concerne le prestazioni legate ad affidabilità e qualità dei sistemi complessi, sono state concepite [5] tre modalità di acquisizione dati (Figura 19.6).

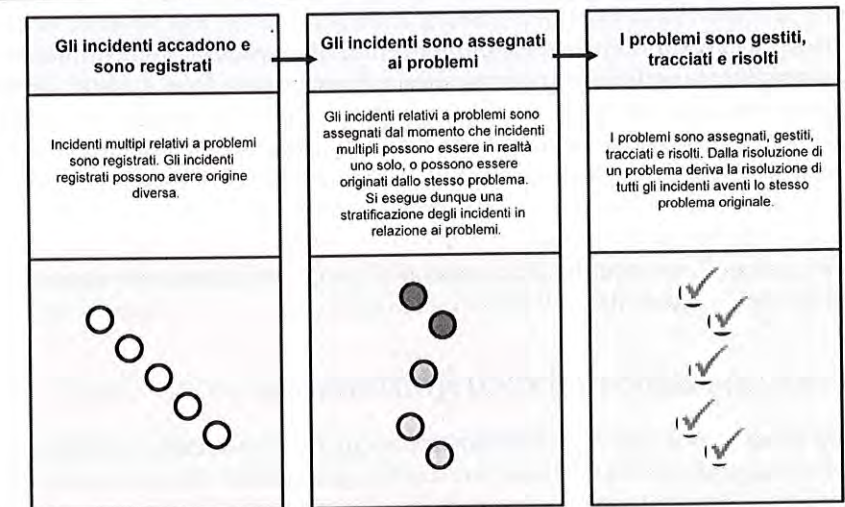


Figura 19.6 Tre possibili profili connessi alla gestione dei dati.

- Un sistema A molto semplice per la gestione del supporto al cliente e per la registrazione dei dati relativi alle anomalie: tale strumento, seppur semplice, risulta molto importante in quanto consente di incrementare il consenso della clientela, di comprendere meglio le sue richieste, di ridurre i costi di gestione (si pensi per esempio alla possibilità di intervenire su uno stesso tipo di problema su clienti differenti: messa a punto una azione correttiva, è possibile estenderla a tutti i clienti aventi lo stesso problema, con maggiore rapidità, efficienza e riduzione degli sforzi necessari a trovare una soluzione).
- Un sistema B più complesso, evoluzione del precedente, capace di gestire i report di guasto, le azioni correttive e le necessità legate al supporto al cliente, dedicato ad aziende di qualunque dimensione, con linee produttive e tipologie di prodotto diverse.
- Un portale web C che sia in grado di eseguire analisi e report in modo automatico, relativamente ai dati di affidabilità e qualità raccolti per esempio con i sistemi A e B citati in elenco. Un sistema di questa natura avrebbe associati alcuni vantaggi fra cui:
  - costituire una base dati unica e accessibile a tutta l'azienda (in base a prestabiliti livelli di accesso) per informazioni inerenti la affidabilità e la qualità;
  - permettere di avere una visione temporale delle informazioni legate al sistema, riducendo i tempi di reazione per problemi incipienti (per esempio sintomi di guasto) e permettendo anche di decidere, basandosi su informazioni accurate;
  - poter essere configurato per monitorare automaticamente i processi (utilizzando calcoli automatici e aggiornamenti, e attraverso l'uso di soglie di attenzione);
  - aumentare la sensibilità del management verso le prestazioni di affidabilità e qualità dei prodotti;
  - rendere più rapida la creazione dei report, lasciando più tempo ai tecnici per la loro interpretazione piuttosto che per una loro preparazione.

Con sistemi di questo tipo per esempio un centro di assistenza ai clienti può facilmente raccogliere e utilizzare la conoscenza e le esperienze fatte durante gli interventi di assistenza, in modo da migliorare i propri processi di service; ma condividendo queste informazioni anche con gli uffici di progettazione e di verifica delle prestazioni RAM, è possibile conseguire un miglioramento su tutto il ciclo di vita del prodotto.

Alcuni studi hanno dimostrato che l'adozione di sistemi di tipo FRACAS ben impostati, più o meno approfonditi, consentono sempre di conseguire consistenti e misurabili miglioramenti del ROI (*return on investment*).

## 19.8 Alcune banche dati di riferimento

I dati da campo, *field data*, se correttamente acquisiti, rappresentano la fonte di informazioni migliore perché costituiscono una fotografia della situazione reale del sistema che è oggetto dell'analisi e una base di valutazione privilegiata per le eventuali modifiche che nel corso del tempo sarà necessario apportare per migliorarne le prestazioni tecniche ed economiche.

Spesso però questo tipo di informazioni risulta essere carente per vari motivi fra cui:

- il sistema è caratterizzato da una nuova tecnologia non precedentemente sperimentata;
- l'orizzonte temporale dei dati disponibili è estremamente ridotto rispetto alla vita attesa del sistema;
- vi è una mancanza di sistemi dedicati all'acquisizione dati.

In questi casi, quando si vogliono comunque eseguire analisi di tipo RAM, la sola strada realmente percorribile risulta essere quella legata all'uso di librerie presenti sul mercato, contenenti informazioni relative per esempio ai tassi di guasto o ai tempi standard di riparazione.

Come si è visto tali librerie rappresentano riferimenti riconosciuti a livello internazionale, ma prima di un loro uso è opportuno fare alcune considerazioni; ricordiamo a questo proposito che nella definizione di affidabilità si fa riferimento alle condizioni operative all'interno delle quali il sistema si trova a lavorare, e che di fatto costituiscono un elemento distintivo di ogni specifica applicazione.

È dunque fondamentale identificare i livelli di precisione richiesti a un progetto e valutare la reale possibilità di rispettarli; in generale si può affermare che non ha molto senso parlare di ottimizzazione, senza poter ricorrere a informazioni realmente derivanti dal sistema che si intende ottimizzare.

Di seguito vengono citate le principali librerie diffuse nell'ambito industriale con particolare riferimento al settore meccanico e impiantistico (meno diffuse rispetto alle librerie di componenti elettrici ed elettronici, come la già più volte citata MIL-HDBK-217).

- *NPRD-95*: il *Nonelectronic Parts Reliability Data*, pubblicato dal Reliability Analysis Center, è un manuale contenente i tassi di guasto di una vasta gamma di componenti e parti meccaniche.
- *OREDA-2002*: l'acronimo sta per *Offshore Reliability Data*, infatti questo manuale contiene dati relativi a tassi di guasto, distribuzioni dei modi di guasto e tempi di riparazione per apparecchiature e componenti utilizzati nel settore offshore. Tali dati sono correntemente utilizzati per studi di analisi del rischio e di produttività delle piattaforme.
- *EIREDA-98*: in questo caso l'acronimo sta per *European Industry Reliability Data Bank*, si tratta di un manuale analogo ai precedenti realizzato dalla Commissione Europea e dalla Electricité de France (EdF) contenente dati relativi a 133 tipologie di apparecchiature. Le stime si basano su dati raccolti dal 1978 al 1995 negli impianti nucleari gestiti da EdF. L'uso di questi dati è analogo a quello delle altre librerie.

## 19.9 Supervisory Control And Data Acquisition - SCADA

Il tema della acquisizione e gestione dei dati non può prescindere da una menzione dei sistemi di *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Come indica il nome, i sistemi di questo tipo non sono destinati al controllo totale [8], in quanto essi sono soprattutto dedicati a una funzione di supervisione; in altre parole sono nati come sistemi di rilevazione dei dati e di controllo dall'alto, senza quindi una funzio-

ne di controllo attivo delle operazioni. La funzione primaria dei sistemi SCADA è stata quella del monitoraggio in tempo reale anche con modalità remota.

Negli ultimi anni comunque si assiste a una loro evoluzione verso il controllo anche di tipo operativo. Come tali si tratta di applicativi di tipo software che vengono collocati sul quadro di controllo di un sistema hardware a cui sono interfacciati, spesso utilizzando PLC (*Programmable Logic Controller*) o altri moduli commerciali presenti sul mercato.

Questi prodotti sono di tipo multi-tasking e si basano sull'uso di *Real-Time DataBase* (RTDB) presenti su uno o più server utilizzati nell'acquisizione dei dati e nella supervisione e gestione (per esempio polling controller, alarm checking, calcoli, logging e archiviazione) dei parametri identificati per il controllo del sistema. Sono sistemi che presentano una ampia diffusione nel campo industriale e in particolare nel settore della produzione di acciaio, della generazione e distribuzione di energia (convenzionale o nucleare) e del settore chimico. Essi sono anche utilizzati per il monitoraggio e il controllo delle infrastrutture destinate al trasporto del gas attraverso gasdotti e tubazioni. La complessità di un sistema SCADA è legata alle dimensioni degli impianti all'interno dei quali si trovano e può essere classificata in base al numero dei canali di ingresso/uscita presenti, il quale può variare da qualche migliaio fino ad alcune centinaia di migliaia.

Questi sistemi possono essere realizzati per qualunque tipo di sistema operativo DOS, MS o Unix (esistono anche alcuni produttori che hanno già migrato verso il sistema operativo Linux).

Tali sistemi software hanno fatto negli ultimi anni grandi progressi in termini di:

- *funzionalità*: le funzionalità associate ad applicativi di questo tipo possono essere molteplici (controllo degli accessi, capacità di gestire multiscreen, analisi dei trend, gestione degli allarmi, reportistica automatica ecc.);
- *scalabilità*: si tratta della possibilità di estendere e ampliare il raggio di azione di un sistema SCADA, attraverso l'aggiunta di più variabili di processo, di più server specifici (per esempio server per la sola gestione degli allarmi, server per la sola gestione dei log-in/log-out);
- *configurabilità*: la possibilità di contestualizzare il prodotto SCADA a una specifica realtà risulta essere uno degli aspetti più validi e se ne deve tenere conto fin dall'inizio, ovvero fin dal momento in cui si definiscono le specifiche di acquisto di un sistema di tipo SCADA.

L'evoluzione di questi applicativi è verso [9] una sempre maggiore integrazione con la gestione remota dei sistemi complessi; da tale integrazione potrebbero derivare consistenti possibilità di realizzare un più efficace controllo e una maggiore efficienza gestionale.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] MIL-STD-1840C - *Automated Interchange of technical information*, USA Department of Defense, 1997
- [2] MIL-STD-2165 (AS) - *Failure reporting, analysis and corrective action system*, USA Department of Defense, 1985
- [3] *Data, where are thou?*, ReliaSoft staff, volume 2 - Issue 3, Quarter 4, 2001.

- [4] *Problem Reporting and Corrective Action System*, NASA - Kennedy Space Center, PD - ED - 1255.
- [5] A. Mettas, D. Rock, *Intellectual capital: utilizing the web for knowledge management and data utilization in Reliability Engineering*, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002.
- [6] *Offshore Reliability Data Handbook: OREDA - 2002*, IV edition, 2002.
- [7] *European Industry Reliability Data Bank: EIREDA 1998*, ISBN 2-9509092-0-5, 1996.
- [8] C. Emrich, W. Wilson et al., *Supervisory control and data acquisition using the advanced communications technology satellite: lessons learned*, 2001.
- [9] A. Daneels et al., *What is SCADA?*, 7<sup>th</sup> International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Trieste, 1999.

# 20

## Indici di manutenzione

Nella progettazione e successiva gestione di un sistema complesso, spesso si ricorre alla definizione di indici per poter comprendere lo stato e individuare le aree aventi una maggiore criticità e che richiedono interventi di adeguamento.

Anche nella gestione di un processo complesso quale quello manutentivo è possibile stabilire e adottare alcuni indicatori chiave, denominati anche KPI (*Key Performance Indicator*), i quali secondo quanto previsto nella norma UNI 10388, consentono di:

- rappresentare un evento determinato in modo obiettivo e preciso;
- controllare il grado di raggiungimento degli obiettivi;
- comparare unità distinte della stessa impresa o tra imprese o settori diversi.

L'analisi degli indici può essere dunque articolata su due assi principali:

- *asse temporale*: si valuta l'evoluzione del sistema, attraverso il controllo di indici che vengono calcolati nel tempo;
- *asse spaziale*: si valutano i valori degli indici, calcolati in uno stesso istante, ma relativi a posizioni differenti (reparti diversi, stabilimenti diversi di una stessa compagnia).

Gli indici possono essere poi classificati in due macro-categorie.

- *Indici particolari*: sono riferiti ad alcuni aspetti specifici del sistema e sono calcolati a partire da valori relativi a un particolare settore del sistema (per esempio efficienza della manodopera). Gli indici appartenenti a questa classe, non devono di norma essere considerati singolarmente ma devono essere inseriti all'interno di un cruscotto.
- *Indici globali*: il loro scopo è quello di dare una indicazione complessiva dello stato del sistema nella sua interezza (per esempio *Overall Equipment Effectiveness*); l'uso di tali indici sintetici non può essere ritenuto sufficiente, perché in generale questo tende a causare una perdita di informazioni. In presenza infatti di indici globali identici, si possono avere indici particolari diversi.

La classificazione degli indicatori può, come si è visto, essere fatta in base a molti criteri differenti, legati al particolare contesto aziendale.

Gli indicatori possono per esempio essere anche:

- |                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| - qualitativi;  | - operativi;           |
| - quantitativi; | - di soddisfazione;    |
| - tecnici;      | - progettuali;         |
| - economici;    | - di controllo;        |
| - monetari;     | - di miglioramento;    |
| - non monetari; | - di verifica;         |
| - direzionali;  | - usati dal cliente;   |
| - strategici;   | - usati dal fornitore. |

La definizione di un indice segue un diagramma di flusso che può essere rappresentato come in Figura 20.1.

A partire da definizioni generali degli indici ogni realtà potrà definire liberamente indici specifici, con i quali sia possibile effettuare un controllo efficace e il più possibile tempestivo.

L'uso degli indici può essere sistematico, saltuario o basato su esigenze transitorie, in relazione agli obiettivi da perseguire. Dal momento che gli indici costituiscono di fatto una metrica del sistema, è possibile affermare che un utilizzo sistematico degli indici può diventare uno strumento chiave nel supporto alle decisioni.

In generale si possono fare anche le seguenti considerazioni:

- un indice è significativo e comparabile se i dati impiegati nel calcolo corrispondono bene alla definizione precisa dei termini del rapporto e il loro valore è ricavato su basi omogenee tra di loro;
- i valori degli indici determinati per diverse unità operative possono assumere un significato molto diverso secondo il livello o la modalità di analisi.



Figura 20.1 Diagramma di flusso nella definizione di un indice.

L'indice, come definito in precedenza, è un numero che fornisce una rappresentazione sintetica di un fenomeno. Questa sua caratteristica è a un tempo la sua forza e il suo limite. È pertanto necessario:

- far seguire al calcolo degli indici un'analisi finalizzata alla valutazione di eventuali fattori endogeni e/o esogeni che ne possono aver "deviato" i valori numerici;
- procedere alla correzione di tali fattori.

## 20.1 Alcuni esempi di indici

La norma UNI 10388 [1] stabilisce alcuni indici inerenti la manutenzione e la gestione dei beni durevoli con particolare riferimento al settore industriale, classificandoli in:

- indici generali;
- indici per la valutazione dell'efficienza;
- indici per la valutazione dell'efficacia;
- indici per la valutazione della struttura organizzativa;
- indici per la valutazione della sicurezza;

allo scopo di consentire una gestione consapevole attraverso una analisi di dati su indici comuni e confrontabili.

Nella normativa si precisa anche che tutti gli indici aventi una definizione alternativa possono essere impiegati purchè questi diano un reale valore aggiunto in termini gestionali e siano realmente in grado di apportare un adeguato livello di conoscenza del sistema osservato, senza lasciare spazio a occasioni di ambiguità interpretativa.

Tali indici sono determinabili a partire da dati associati alla funzione manutenzione.

In particolare l'obiettivo degli *indici generali* di manutenzione è quello di leggere alcuni fenomeni di interesse generale orientati alla definizione di un "cruscotto direzionale" valido come supporto alle decisioni del management.

Sono in gran parte basati sui costi totali della manutenzione sia ordinaria sia straordinaria, sul valore degli immobilizzi tecnici lordi, sulla definizione di una quantità prodotta in termini di valore aggiunto o di produzione annua valorizzata.

Gli *indici di efficienza*, così come quelli di *efficacia*, sono valutati su un periodo di riferimento dell'esercizio e sono utilizzati per comprendere quanto e in che modo la gestione corrente del sistema manutentivo è in grado di perseguire gli obiettivi prefissati.

Gli *indici di struttura organizzativa* sono dedicati alla valutazione delle modalità di gestione dei ruoli e più in generale delle competenze delle risorse umane presenti in azienda.

Per quanto riguarda in particolare gli indici relativi alla valutazione della *sicurezza*, la normativa UNI 10388 rimanda ad altre normative relative alle statistiche degli infortuni sul lavoro (UNI 7249).

La determinazione di questi indici, espressi come rapporto fra due grandezze, passa necessariamente da una definizione precisa di tali grandezze, e per questo la normativa UNI 10388 presenta un glossario di riferimento (Tabella 20.1); una errata scelta delle entità da inserire all'interno degli indici, comporta come diretta conseguenza, la loro inutilità applicativa.

**Tabella 20.1** Alcune definizioni di grandezze usate per la determinazione degli indici (Fonte: UNI 10388)

Costi di manutenzione	Costi direttamente attribuibili all'attività di manutenzione (a esercizio e da capitalizzare).
Costi totali di manutenzione	Costo totale di manutenzione sostenuto nell'esercizio, comprensivo del costo di manutenzione e del costo di manutenzione capitalizzabile.
Immobilizzi tecnici lordi	Valore (rivalutato secondo le disposizioni in vigore) di rimpiazzo.
Valore aggiunto	Produzione valorizzata meno i costi di forniture di beni e servizi forniti da terzi.
Produzione annua valorizzata	Valore dell'ammontare complessivo della produzione al prezzo di vendita o di trasferimento, in un anno.
Costo di indisponibilità globale	Somma del costo totale di manutenzione di possesso materiali tecnici e di mancata produzione.
Costo del personale aziendale di manutenzione	Costo complessivo del personale di manutenzione (interno dell'azienda) comprensivo dei costi indiretti e di struttura.
Costo totale dei servizi di terzi	Somma degli importi fatturati da terzi per prestazioni, ottenibile dalla somma dei costi a constatazione, a corpo, a misura.
Costo di formazione di manutenzione aziendale	Costo totale delle attività di formazione per il personale di manutenzione (costo aziendale + costo forniture e prestazioni da terzi).

A partire da tali definizioni si può procedere alla determinazione degli indici dei quali si riportano di seguito alcuni esempi in Figura 20.2 e Figura 20.3.



**Figura 20.2** Esempi di indici generali e di efficacia del sistema manutentivo (Fonte: UNI 10388).

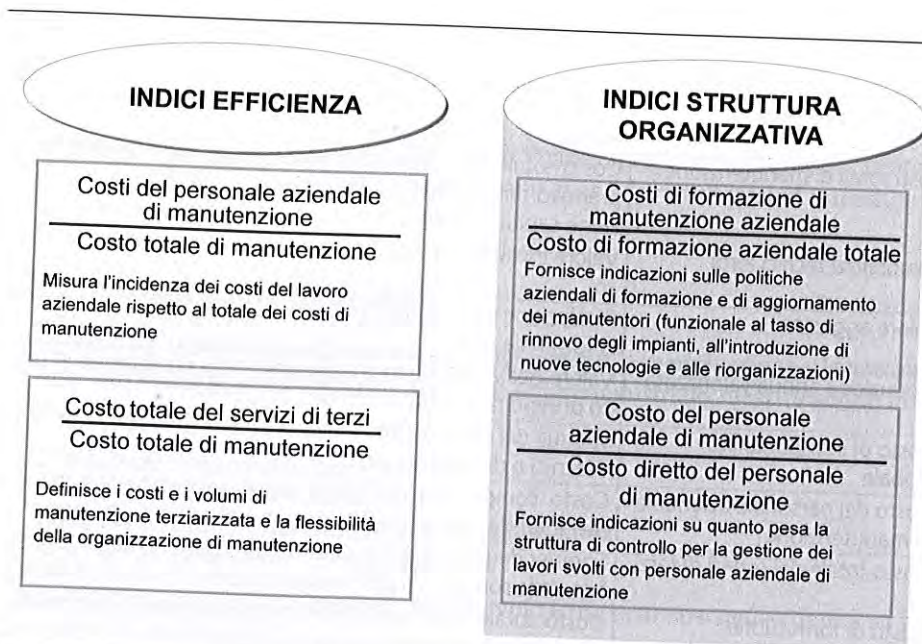


Figura 20.3 Esempi di indici di efficienza e di struttura organizzativa (Fonte: UNI 10388).

Come detto in precedenza è comunque possibile definire anche altri indici (Tabella 20.2), purché questi [2] presentino i requisiti di significatività e univocità del giudizio.

Tabella 20.2 Indici di valutazione della efficienza della manutenzione (Fonte: Isedi 1975)

Indici di valutazione dell'efficienza manutentiva	
$\frac{\text{Potenza installata}}{\text{Numero operai di manutenzione}}$	
$\frac{\text{Ore assegnate di manutenzione ordinaria}}{\text{Ore impiegate di manutenzione ordinaria}}$	
$\frac{\text{Ore di funzionamento macchine}}{\text{Ore di fermate per guasti}}$	
$\frac{\text{Ore manutenzione ordinaria}}{\% \text{ scarti di prodotto}}$	

## 20.2 Overall Equipment Effectiveness - OEE

L'*Overall Equipment Effectiveness*, il cui acronimo è appunto *OEE*, fornisce una valutazione dei livelli prestazionali delle singole aree (produzione, manutenzione, qualità ecc.) presenti all'interno di una azienda. *OEE* è:

- un indice di tipo globale usato per stabilire il livello prestazionale di una linea produttiva;
- un parametro utilizzato per eseguire una classificazione e una quantificazione delle principali cause di perdita di efficienza;
- una misura del valore aggiunto apportato da una macchina o da un impianto alla produzione.

Esso è dato dal prodotto di 3 fattori che sono:

- *Disponibilità - A*: data dal rapporto fra il tempo in cui l'impianto o la macchina può essere utilizzato e il tempo totale (che comprende oltre al tempo di utilizzo anche il tempo di riparazione);
- *Livello di prestazioni (efficienza produttiva) - E*: data dal rapporto fra la produzione reale e quella teorica;
- *Livello di qualità della produzione - Q*: data dal rapporto fra la produzione "buona" e quella totale (quella "buona" è data dalla differenza fra la produzione totale e la produzione scartata) la produzione potrà essere misurata in termini di numero di pezzi e di quantità.

In un'espressione *OEE* sarà dato da:

$$OEE = A \times E \times Q$$

dove:

$$A = \frac{[\text{Durata della produzione pianificata} - \text{Durata del downtime non previsto}]}{[\text{Durata della produzione pianificata}]}$$

$$E = \frac{[\text{Produzione reale}]}{[\text{Produzione teorica}]}$$

$$Q = \frac{[\text{Produzione totale} - \text{Produzione scartata}]}{[\text{Produzione totale}]}$$

Come si vede dalle definizioni, questo indice è generale e calcolabile per ogni tipologia di industria (sia quella di processo sia quella manifatturiera).

Ogni fattore è esprimibile come percentuale e pertanto anche l'*OEE* varierà in generale fra 0 e 100%.

Sono state individuate 6 principali cause di decremento dell'*OEE*:

- perdite per rotture/guasti (sporadiche e/o frequenti);
- perdite per aggiustaggi e set-up troppo lunghi;
- perdite per velocità ridotta;
- perdite per microfermate e macchine che funzionano a vuoto;
- perdite per difetti nella qualità e rilavorazioni;
- perdite per instabilità del processo produttivo al suo avviamento.

A partire dalla determinazione dell'*OEE*, e conoscendo le cause di perdita, si potrà anche determinare il/i fattore/i che penalizza/no l'indice complessivo intervenendo in modo mirato per conseguire un miglioramento.

Ciascuna delle cause indicate incide su uno dei tre fattori (Figura 20.4).

Valori dell'*OEE* inferiori all'80-85% indicano la presenza di criticità, che devono essere corrette in modo tempestivo, soprattutto nei casi in cui vi sia un trend negativo.



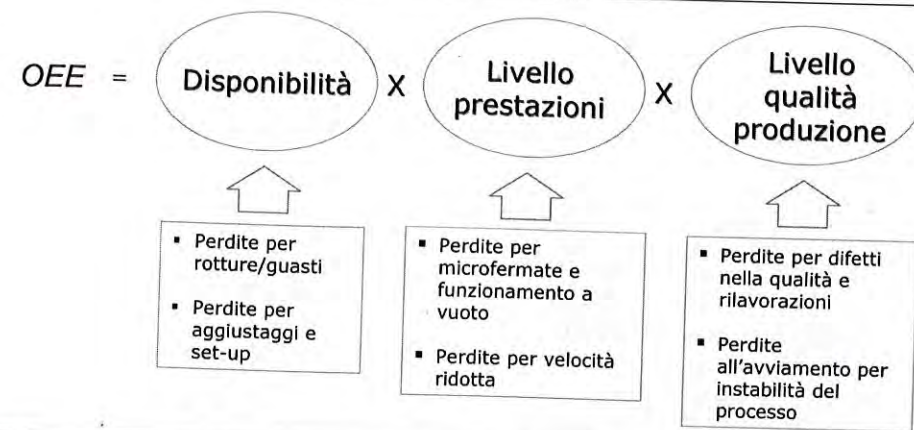


Figura 20.4 Attribuzione delle cause di perdita ai fattori dell'OEE.

### 20.3 Overall Craft Effectiveness - OCE

Fra gli indici di tipo globale che sono maggiormente diffusi e conosciuti nell'ambito industriale vi è oltre all'OEE anche l'OCE. Tali indici sono fra di loro complementari in quanto se il primo è più vicino agli aspetti impiantistici, il secondo fornisce indicazioni in merito alla efficacia ed efficienza della manodopera, in particolare di quella che è impiegata nell'ambito del processo manutentivo.

L'OCE è un indice specificamente applicato alla valutazione della produttività della manodopera. L'esecuzione di qualsiasi attività di tipo manuale [3] è legata a parametri di natura personale (abilità, livello di formazione, livello di esperienza) e collettiva (organizzazione del lavoro).

Come l'OEE, anche l'OCE viene calcolato come prodotto di tre fattori [4].

- Fattore efficacia - *craft utilization* (CU): indica l'utilizzo percentuale della manodopera e corrisponde alla disponibilità del sistema. Esso misura l'efficienza della programmazione della manodopera (gran parte del tempo di ciclo di un intervento è dovuto a spostamenti a vuoto per la ricerca di attrezzature, documentazione, parti di ricambio).
- Fattore efficienza - *craft performance* (CP): indica la prestazione percentuale della manodopera ed è corrispondente al livello di prestazioni del sistema. Questo indicatore misura quanto è stato efficiente il lavoro in confronto a uno standard di riferimento. Esso è tanto migliore in relazione alla professionalità della manodopera e a una sua attenzione verso gli obiettivi di efficienza.
- Fattore qualità - *craft service quality* (CSQ): è il fattore relativo ai metodi di lavoro e al livello qualitativo ed è analogo al livello di qualità della produzione di un sistema; esso può tenere conto per esempio delle ripetizioni dei lavori legate alla scarsa qualità del primo intervento.

In altri termini si può scrivere che:

$$OCE = CU \times CP \times CSQ$$

Di seguito sono riportate alcune espressioni per il calcolo dei fattori percentuali.

$$CU (\%) = \frac{\text{Tempo produttivo impiegato}}{\text{Tempo produttivo disponibile (pagato)}} \times 100$$

$$CP (\%) = \frac{\text{Tempo totale pianificato}}{\text{Tempo totale richiesto}} \times 100$$

Per quanto riguarda la definizione del terzo fattore CSQ questa può essere abbastanza libera poiché dipende dal particolare contesto. Essa deve consentire di determinare quanto bene siano eseguiti gli interventi manutentivi in relazione alle modalità operative di svolgimento dei lavori (strumentazione in dotazione, metodi di riparazione, stato dell'officina ecc.).

Va precisato che il fattore CP può assumere anche valori superiori al 100%, si pensi per esempio a un intervento di sostituzione eseguito in un tempo inferiore alla durata standard prevista per quel ciclo.

Come nel caso dell'OEE, si può stabilire un valore minimo accettabile dell'OCE che risulta essere del 50%; questo valore può sembrare basso, ma nella realtà il fattore CU difficilmente supera il 60% e questo penalizza l'indice nel suo complesso (Tabella 20.3).

Tabella 20.3 Range di valori di OCE e dei suoi fattori

Elementi di OCE	Range di valori di OCE		
	Basso	Medio	Alto
1. CU	30%	50%	70%
2. CP	>80%	90%	95%
3. CSQ	>90%	95%	98%
<b>Fattore OCE</b>	<b>22%</b>	<b>43%</b>	<b>65%</b>

### 20.4 Alcune regole pratiche legate alla valutazione degli indici

La misura delle prestazioni di un sistema, anche sotto forma di indici, costituisce un elemento essenziale per il controllo e per la definizione di obiettivi di miglioramento.

Una prima difficoltà sta nel comprendere cosa misurare, la seconda sta nel definire un modo di misurare che sia il più facilmente determinabile e interpretabile. In questo processo vi sono tre concetti fondamentali legati alla gestione di un sistema:

- conoscere appieno il sistema, le sue funzioni e i suoi limiti;
- definire una metrica per il suo controllo;
- comprendere tempestivamente le derive di sistema per individuare le azioni correttive.

Un sistema di controllo delle prestazioni deve avere alcuni requisiti fondamentali affinché questo possa essere utile [5]. Questi aspetti generali possono essere tradotti in criteri e specifiche di realizzazione di un sistema di indici:

1. motivare l'organizzazione sull'importanza di un sistema di misura delle prestazioni basato su indici di controllo, creando un percorso di raggiungimento degli obiettivi parametrizzato sugli indici;
2. definire un cruscotto di poche misure mirate, facilmente comprensibili e delle quali sono note le motivazioni (eliminare tutti gli indici "tradizionali" dei quali non si ricorda più il significato);
3. definire un cruscotto che sia in grado di dare una valutazione di insieme di tutto il sistema analizzato;
4. scegliere il livello di sintesi degli indici in funzione del livello organizzativo che li utilizzerà, basandosi su un approccio bottom-up nel quale l'aggregazione degli indici di basso livello porta alla definizione di un indice di alto livello, a cui sono associate le decisioni, che risulti coerente con gli indici di base;
5. determinare non soltanto quello che si misura ma anche il modo in cui si decide cosa misurare e a questo scopo è molto importante il ricorso a workshop per decidere e verificare le scelte di misura;
6. fare corrispondere a ogni misura sempre e comunque un target di riferimento altrimenti non è possibile svolgere alcun tipo di controllo o sviluppare alcun tipo di miglioramento;
7. tenere conto della variabilità naturale di ogni processo, spesso legata al fattore tempo (periodo di misura delle prestazioni);
8. verificare la chiusura del ciclo di controllo (closed loop) attraverso una verifica delle azioni effettivamente svolte per migliorare le prestazioni (misurare e spiegare le prestazioni non è sufficiente a migliorare le cose se queste non vanno bene).

## 20.5 Considerazioni sull'uso degli indicatori in regime di outsourcing

Negli ultimi anni si è assistito a una sempre maggiore diffusione del fenomeno organizzativo dell'outsourcing del processo manutentivo, anche secondo le logiche del global service, in cui si sancisce la responsabilizzazione dell'assuntore nei confronti del committente sui risultati che sarà in grado di realizzare; questo ha indotto a stabilire modalità di valutazione qualitativa e quantitativa dello stato dei beni affidati, e più in generale del servizio di manutenzione e gestione reso.

Nello scenario che si è andato delineando, si sono però anche evidenziate alcune difficoltà legate alla misura dei risultati dei servizi di manutenzione effettuati, le quali sono riconducibili al fatto che i sistemi tradizionali [6], basati sui principi di contabilità finanziaria, pur essendo impostati per valutare se determinate modifiche operative stanno migliorando o meno il profilo finanziario di una azienda, si rivelano insufficienti a misurare le prestazioni di un servizio di manutenzione caratterizzato notevolmente da considerazioni di tipo tecnico.

Gli aspetti che presentano una maggiore criticità sono i seguenti.

1. La focalizzazione è impostata su risultati orientati in senso storico anziché fornire un supporto tempestivo per le decisioni.
2. L'attenzione è rivolta ai risultati conseguiti piuttosto che all'efficienza e l'efficacia delle attività e dei processi aziendali.

3. La misurazione dei risultati avviene in termini economico-finanziari piuttosto che operativi.
4. L'attenzione è verso aspetti tangibili più che verso quelli intangibili propri dei servizi quali il livello di servizio o la soddisfazione degli utenti.
5. La visione è rivolta al breve termine (quarter vision) più che verso il sistema imprenditoriale.

Per colmare queste deficienze dei sistemi tradizionali in termini di misura della performance si sono sviluppate tecniche basate oltre che su misure tradizionali su misure progettate con un'ottica di tipo economico e con indicatori fisico-tecnici supportati da un sistema di reporting.

In generale un elemento cruciale nella misura delle prestazioni di un servizio di manutenzione attraverso l'uso di indici è, come già è stato accennato, quello di limitare il numero di misure da sottoporre al committente; il cruscotto di indici deve essere di numero limitato per assicurare che il processo di misurazione non sia troppo ingombrante da gestire e non dia adito a cattive interpretazioni. In caso di stipula di un contratto di outsourcing, per stabilire un insieme razionale di indicatori di prestazioni si deve partire dagli obiettivi strategici che l'assuntore ha fatto propri con il rapporto contrattuale.

La scelta di questi indici è utile a entrambe le parti: al committente per verificare e controllare le prestazioni dell'assuntore e a quest'ultimo per una corretta gestione del bene, perché il monitoraggio degli indicatori deve soprattutto evidenziare gli elementi critici e i processi su cui sarebbe necessario intervenire con attività di miglioramento.

### Riferimenti bibliografici

- [1] Norma UNI 10388 - *Manutenzione/Indici di manutenzione*, ottobre 1994.
- [2] W. Iannacone, *Ingegneria di manutenzione*, Franco Angeli, Milano, 1998.
- [3] C. Rolandi, *Gli Indicatori di Prestazione*, Atti XX Congresso AIMAN, 2003.
- [4] R.W. Peters, *Measuring Overall Craft Effectiveness (OCE)*, The Maintenance Excellence Institute, 2003.
- [5] S. Dunn, *Condition Monitoring in the 21<sup>st</sup> century. Using Performance Measures to Drive Maintenance Improvement*, 2002.
- [6] L. Fedele, M. Tronci, *La valutazione del risultato nei progetti di manutenzione*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 2003.

## APPENDICE

---

# Appendice

## Diagnostica dei sistemi

Il *condition monitoring* può considerarsi come l'insieme delle procedure occorrenti per la valutazione delle condizioni attuali di un impianto o apparato, ottenuto mediante tecniche che spaziano dall'uso di complesse strumentazioni computerizzate allo sfruttamento della sensibilità umana, in modo da prevenire i guasti e da mettere in atto la manutenzione solo in presenza di un'avaria potenziale e quando risulti più conveniente in base al programma di produzione [1].

Si tratta, in altri termini, di effettuare misurazioni comparative, periodiche o continuative, dei parametri che si ritiene ben rappresentino le condizioni del componente o sistema oggetto dell'analisi, permettendo, così, di valutarne la situazione corrente e l'andamento futuro in vista di un suo possibile deterioramento. Tra le diverse tecniche di monitoraggio possibili, si ritiene di approfondire quelle che attualmente godono di maggiore fortuna in campo industriale, ovvero il monitoraggio delle vibrazioni e l'analisi del lubrificante.

La prima tecnica è ben supportata da dispositivi facilmente reperibili e relativamente poco costosi; essa gode di una notevole flessibilità applicativa, di una certa semplicità d'interpretazione dei segnali registrati dai sensori e di una buona affidabilità dei risultati.

Il secondo metodo è, invece, particolarmente indicato per i sistemi idraulici o, comunque, per le macchine a circolazione interna di lubrificante: in modo specifico è utile per monitorare lo stato di salute di componenti come cuscinetti, camme, pistoni, ingranaggi ecc. Rispetto all'analisi delle vibrazioni, questa tecnica è in grado di fornire indicazioni più chiare sulla probabile causa di guasto, con l'ulteriore vantaggio di effettuare una misurazione che fornisce risultati indipendenti dalla velocità operativa della macchina; è, tuttavia, più difficile implementarne una versione on-line.

### A.1 Il condition monitoring

Il concetto di "monitoraggio della condizione" nasce intorno agli anni '70 del secolo scorso, quando si rese palese l'utilità di questo processo di rilevamento continuo

dei dati operativi susseguenti alle analisi di affidabilità, per ottenere informazioni sulla popolazione totale di componenti in servizio, sulla base delle quali intraprendere eventuali modifiche al sistema o al programma di manutenzione. Le tecniche di monitoraggio più utilizzate per i sistemi meccanici possono essere classificate nei seguenti tipi:

- monitoraggio visivo;
- monitoraggio della performance;
- monitoraggio del rumore e delle vibrazioni;
- monitoraggio del particolato da usura;
- monitoraggio del calore.

Si fa un breve cenno su tutte queste tecniche per poi soffermarsi con maggiore attenzione sulle due che hanno trovato più ampia diffusione a oggi in campo industriale: il monitoraggio delle vibrazioni e, soprattutto, il monitoraggio degli oli lubrificanti.

#### A.1.1 Il monitoraggio visivo

Un primo tipo di monitoraggio, efficace nella sua semplicità, è quello svolto dagli stessi operatori di sistema, i quali, per il tipo di impegno a cui sono dedicati, sono in grado di identificare i sintomi più evidenti del degrado di un materiale. Si tratta semplicemente di osservare il sistema alla ricerca di eventuali cricche, polvere in eccesso, difetti di saldatura, malfunzionamento dei filtri ecc. In ciò il personale è aiutato da opportuni strumenti, tra i quali si possono menzionare:

- specchi;
- comparatori;
- fibre ottiche (sufficientemente flessibili da essere usate per illuminare zone nascoste e ottenerne un'immagine mediante uno scanner);
- televisione a circuito chiuso;
- altri.

#### A.1.2 Il monitoraggio della performance

Quando il degrado del materiale raggiunge uno stadio avanzato, si passa dallo stato di "guasto incipiente" a quello di "guasto imminente". In presenza di un sistema meccanico a fluido, per esempio, questa è la fase in cui si è soliti effettuare il monitoraggio di alcuni parametri indicativi di un certo peggioramento della performance, quali, per esempio, la pressione del fluido, il flusso, la temperatura, la velocità di rotazione e l'efficienza degli scambi termici.

Applicando queste tecniche, il personale addetto alla manutenzione può valutare la rispondenza delle prestazioni della macchina alle specifiche di progetto (per esempio misurando la risposta della macchina sottoposta a un carico standard), riuscendo a porre in relazione i risultati ottenuti con precise anomalie. È così possibile mettere in evidenza scorrimenti degli innesti o degli ingranaggi, variazioni d'assetto dei cilindri, fuoriuscite interne di liquido ecc. in modo da prevedere per tempo l'inizio di una condizione di guasto.

### A.1.3 Il monitoraggio delle vibrazioni e del rumore

Tutti gli elementi di un qualsivoglia sistema dinamico tendono a vibrare, a causa delle imperfezioni presenti sulle superfici a contatto, negli allineamenti, nel bilanciamento delle parti ecc. Queste vibrazioni finiscono per interessare anche le particelle d'aria adiacenti alle superfici, il che produce una variazione della pressione atmosferica della zona, ovvero suoni e rumori.

È evidente, allora, che un operatore può ricorrere all'analisi sia delle vibrazioni sia del rumore per investigare sui malfunzionamenti di un sistema. In particolare, i componenti meccanici producono rumore in eccesso a causa del disallineamento dei sistemi di guida, dello sbilanciamento delle parti rotanti, dei cuscinetti difettosi, delle incastellature non rigide. In presenza di un fluido evolvente nel sistema, il rumore può essere prodotto anche da variazioni di flusso o di pressione: soprattutto un'insufficiente pressione di aspirazione può causare fenomeni di cavitazione piuttosto rumorosi. Un operatore potrà, allora, misurare i rumori originatisi nella struttura mediante un accelerometro, quelli causati dal fluido con un trasduttore di pressione, quelli che hanno origine dal movimento delle particelle d'aria per mezzo di un microfono, mettendo in risalto eventuali valori anomali.

L'andamento del rumore nel tempo è causato da un'emissione di energia a determinate frequenze. Scomponendo il livello complessivo di rumore nelle diverse frequenze si ottiene uno spettro acustico. Quest'ultimo si modifica quando un componente subisce un'anomalia, perciò è sufficiente confrontarlo con quello relativo a un sistema che si sa essere funzionante correttamente per mettere in risalto ogni piccola variazione. Non bisogna del resto sottovalutare il fatto che un livello di rumore al di sopra della norma vada prontamente segnalato anche per gli effetti negativi che può produrre sugli operatori: danni all'udito, affaticamento, stress e una generale azione di disturbo delle capacità fisiche e mentali dell'individuo.

Analogamente le vibrazioni, che sono fenomeni legati naturalmente all'attività operativa, se superano valori standard forniti dall'esperienza diventano sintomi inequivocabili di una qualche anomalia. In questo caso il parametro più espressivo è probabilmente la velocità; per esempio:

- un livello di vibrazioni di 8 mm/s, in molti casi, è già indicativo di una certa irregolarità delle superfici a contatto, l'operatore dovrà sottoporre la macchina a un controllo per verificare la presenza di eventuali elementi non bilanciati, di coppie non allineate e così via;
- tra 8 e 10 mm/s è consigliabile programmare un intervento di revisione più approfondito;
- oltre i 10 mm/s si è in presenza di un grado d'usura elevato, al punto da suggerire la sostituzione del pezzo.

### A.1.4 Il monitoraggio del particolato da usura (wear debris)

Un'utile interpretazione della severità dell'usura a cui è soggetto un sistema meccanico normalmente lubrificato è fornita dall'analisi dei frammenti generati dall'usura stessa e dispersi nell'olio di lubrificazione.

Questo tipo di analisi rende possibile la valutazione suddetta, a patto che siano verificate le seguenti condizioni:

- esistenza di relazioni funzionali tra la concentrazione dei detriti e il tasso di usura, ottenute attraverso opportuni test di sensibilità al particolato sui vari componenti del sistema in studio;
- disponibilità di campioni rappresentativi di fluido in base agli standard ISO;
- capacità di estrazione e misura dei detriti dall'olio, mediante le tecniche disponibili (spettrometria, ferrografia, conteggio delle particelle);
- interpretazione dei risultati ottenuti mediante le relazioni funzionali di cui sopra.

Studiando le caratteristiche chimico-fisiche delle particelle, la loro concentrazione, la distribuzione dimensionale nonché morfologica e rapportando questi dati a quelli delle precedenti misurazioni, l'analista sarà in grado di formulare ipotesi attendibili sullo stato di salute della macchina.

### A.1.5 Il monitoraggio del calore

Quando le superfici sono sollecitate eccessivamente, il materiale si flette, le forze di frizione (e il carico dei cuscinetti) aumentano, i fenomeni di usura superficiale (adesione, abrasione) accelerano. In tali condizioni la produzione di calore (energia termica) in eccesso si traduce in un aumento localizzato della temperatura, che può essere misurato da opportuni strumenti.

Nel campo del monitoraggio del calore, è possibile individuare due tecniche principali.

1. *Calorimetria.* È una tecnica di misurazione del calore assorbito o ceduto da un sistema, che sfrutta sensori di temperatura di tipo sia termoelettrico sia resistivo, in particolare i seguenti.
  - Termocoppie: si tratta di trasduttori che forniscono in uscita un segnale elettrico proporzionale alla differenza di temperatura esistente tra la giunzione della termocoppia e gli estremi di riferimento dei due materiali.
  - Pirometro ottico: il funzionamento di questo strumento si basa su un confronto che l'osservatore deve effettuare tra la brillantezza del corpo caldo e quella di un filamento di riferimento. Se la temperatura del filamento è maggiore di quella dell'oggetto in studio, quest'ultimo risulterà più scuro; in caso contrario sarà il filamento ad apparire come una macchia scura sullo sfondo del corpo. Variando l'intensità della corrente che passa nel filamento si fa in modo che esso assuma la stessa luminosità (e quindi temperatura) dell'oggetto, rendendo possibile la misurazione della temperatura stessa.
  - Termometro resistivo: è uno strumento che utilizza un materiale conduttore o semiconduttore, sfruttando il fatto che una variazione di temperatura produce una proporzionale variazione della resistenza elettrica del materiale, che può essere misurata.
  - Pirometro a radiazioni: è uno strumento in grado di misurare le radiazioni termiche (quindi l'irraggiamento) e di fornire in uscita direttamente il valore della temperatura del corpo che le emette, o un valore immediatamente a esso convertibile.
2. *Termografia.* Uno dei sensori di radiazioni più utilizzato è il termografo: esso è in grado di misurare la temperatura di una grande varietà di oggetti posti a una certa distanza, senza un contatto. Quest'interessante risultato si ottiene rilevando

l'energia infrarossa che irradia da un qualunque corpo al di sopra dello zero assoluto e convertendola nell'equivalente valore della temperatura di superficie. Si tratta di una tecnica particolarmente utile quando i corpi da studiare sono molto lontani, eccessivamente caldi, in moto o fragili la quale utilizza un'apposita telecamera sensibile alle radiazioni della porzione infrarossa dello spettro.

In ottica manutentiva, la misurazione della temperatura di un sistema assume un certo rilievo: qualunque dispositivo che genera, conduce o consuma potenza, infatti, emette calore in conseguenza delle perdite di energia del sistema. Generalmente, a una diminuita efficienza di un componente corrisponde un aumento del calore emesso; quindi un dispositivo in avaria presenta una temperatura in rapido aumento, sintomo di un guasto incipiente. In particolare i sistemi meccanici, più di quelli elettrici o chimici, ben si prestano a essere soggetti a questo tipo di rilevamento; ci sono molteplici possibilità applicative su una serie di componenti di cui si cerca di valutare, con questa tecnica, la "normalità" delle condizioni operative: accoppiamenti per trasmissione di potenza, cuscinetti, scatole del cambio, riduttori, circuiti di raffreddamento ecc. Si è in grado così di individuare le fonti di eccesso di calore, valutando allo stesso tempo l'aumento di temperatura che ne consegue.

## A.2 L'analisi delle vibrazioni e dell'olio lubrificante

### A.2.1 L'analisi delle vibrazioni

L'applicazione della teoria del *condition monitoring* consiste nel riuscire a risolvere, in qualche modo, il problema di determinare le condizioni effettive, cioè lo stato di salute, del sistema: uno dei metodi più utili in tal senso si basa sulla misura e l'analisi delle vibrazioni prodotte dal sistema stesso.

Per vibrazione s'intende il movimento oscillante di una macchina, o parte di essa, rispetto alla propria posizione di riposo. Le cause di questo fenomeno sono le più svariate (Tabella A.1), quasi sempre riferibili a difetti meccanici e strutturali; le più comuni, come già ricordato, sono: squilibri delle parti rotanti, disallineamento dei cuscinetti a rotolamento o dei giunti, attriti dovuti all'usura fra i denti degli ingranaggi, cinghie di trasmissione difettose per la presenza di risalti, serraggi difettosi nel collegamento fra i componenti del sistema meccanico, albero deflesso, fenomeni di risonanza ecc.

Più in generale si può affermare che le tolleranze di costruzione variano per l'effetto iniziale dell'usura, con conseguente eccentricità del rotante e sbilanciamento dinamico. Questo a sua volta produce vibrazioni che aumentano l'usura producendo un effetto cumulativo del fenomeno. Una macchina vibra quando la massa della sua carcassa è soggetta a forze periodiche, derivanti da [2]:

- componenti solidali alla carcassa (per esempio l'avvolgimento delle macchine elettriche);
- forze di reazione (per esempio lo scoppio nei motori a combustione interna);
- forze trasmesse alla carcassa dal rotore attraverso i supporti, centrifughe (dovute allo sbilanciamento) o a impulsi (dovute all'accoppiamento di ingranaggi o al fluido che incontrano le palette di un rotore).

Tabella A.1 Tipologie di fenomeni vibratorii [3]

Cause	Ampiezza	Frequenza	Considerazioni
Squilibrio	Più grande nella direzione radiale	1 × giri / min	È una delle cause più frequenti
Disallineamento cuscinetti	Grande in direzione assiale	Normalmente 1 × giri / min	È la causa più evidente di una vibrazione assiale
Cuscinetti in cattive condizioni	Instabile	Molto elevata	Il cuscinetto rovinato è quello che vibra di più alle alte frequenze
Ingranaggi in cattivo stato	Bassa	Molto elevata	La vibrazione max si misura al centro delle ruote dentate
Cinghie di trasmissione difettose	Irregolare o pulsante	1 - 4 × giri / min delle cinghie	Per il controllo visivo si usa lo stroboscopio
Elettriche	Non elevata	1 o 2 volte la frequenza sincrona	Se interrompendo la corrente si ha $s = 0$ la causa è elettrica

Come detto, in genere esiste più di una causa di vibrazione per una macchina, ciascuna delle quali è caratterizzata da una propria frequenza; si parla allora di vibrazione complessa e di:

- *frequenza predominante*: la frequenza di vibrazione avente la massima ampiezza;
- *frequenza fondamentale*: è la prima (più bassa) frequenza normalmente associata a un particolare problema;
- *frequenza armonica*: è la frequenza esattamente pari a un numero intero di volte la frequenza fondamentale.

#### Gli accorgimenti per la misura delle vibrazioni

Si possono fare considerazioni di carattere generale riguardanti la scelta dell'unità di misura delle vibrazioni, i punti di misura e le condizioni di prova. È esatto affermare, innanzi tutto, che la *velocità* e la *frequenza* sono i due parametri più utilizzati dagli analisti per valutare le condizioni della macchina in termini di vibrazioni.

La velocità permette immediatamente di valutare l'entità dell'ampiezza delle vibrazioni, eventualmente raffrontandola con i dati riguardanti la situazione passata del macchinario, fornendo elementi utili per uno studio prospettico sulle variazioni future. È, però, lo studio della frequenza a garantire la possibilità di identificare il componente responsabile della vibrazione: la conoscenza dell'ampiezza e della velocità di vibrazione dà la misura della gravità del fenomeno, ma talvolta non è sufficiente a individuarne la causa. Il valore massimo della frequenza, infatti, è generalmente pari a un multiplo della velocità angolare della macchina in studio ed è spesso utilizzato per determinare il tipo di anomalia che è intervenuta a causare una vibrazione superiore ai limiti prefissati. In altri termini, e senza entrare in dettaglio, l'analisi si effettua correlando la frequenza della vibrazione con quella fondamentale dell'organo del sistema: l'ampiezza massima della vibrazione di un certo organo si ri-

scontra in corrispondenza della frequenza fondamentale o delle armoniche successive; ciò è in genere sufficiente a identificare il difetto.

La misura dell'ampiezza di vibrazione è preferibile per l'esame di macchine singole e di sue parti, per il controllo di uno stato vibratorio nel tempo, per il confronto fra macchine uguali, per le macchine in cui la qualità del prodotto può dipendere dalle vibrazioni, per il confronto di macchine diverse a bassa velocità di rotazione.

La misura della velocità di vibrazione è invece preferibile quando si debbano confrontare macchine assai diverse e quando alla vibrazione fondamentale sono sovrapposte altre vibrazioni di frequenza diversa; normalmente tale parametro è utilizzato per frequenze da 100 sino a 1000 Hz (60 000 cicli/min). La misura dell'accelerazione di vibrazione viene effettuata solo in casi particolari, oppure per frequenze molto elevate (> 1000 Hz).

Si può studiare un fenomeno vibratorio visualizzando la forma d'onda in un piano che presenta sulle ordinate il valore dell'ampiezza di vibrazione e sulle ascisse il tempo oppure la frequenza (in questo caso si parla di *signature* o di spettro).

Il dispositivo usato per la misura è, di norma, posto sui supporti della macchina da controllare; altri punti possono essere la cassa, i piedi, le flange. Per una valutazione accurata delle vibrazioni, le misure vanno eseguite secondo tre direzioni fra loro ortogonali: orizzontale, verticale, assiale.

Nessuna macchina dovrà funzionare in servizio con velocità di rotazione prossima alla propria velocità critica o alla frequenza propria dei supporti e dell'incastellatura, e precisamente in un campo da -20% a +20% della velocità di risonanza: è ben noto, infatti, che le condizioni di risonanza esaltano notevolmente gli effetti di tutti i fenomeni che, in condizioni normali, producono vibrazioni entro i limiti di tolleranza.

#### Il livello critico di vibrazione

Come si è già avuto modo di dire, ogni macchina vibra indipendentemente dalla cura con cui è stata progettata e assemblata.

La pratica industriale ha suggerito l'esistenza di una forte correlazione tra le vibrazioni caratteristiche delle macchine e la loro relativa condizione; si è visto, infatti, che, in più del 90% dei casi, il guasto di una macchina è preceduto da un incremento del livello delle vibrazioni. Il problema risiede nella difficoltà che s'incontra qualora si voglia stabilire un valore di soglia per l'intensità delle vibrazioni, superato il quale la macchina sia da considerarsi in cattive condizioni operative.

Molti autori, basandosi su dati empirici, hanno avanzato proposte in tal senso, ma raramente si tratta di valori ottenuti come risultato di un'accurata analisi scientifica. Le grandezze caratteristiche che vengono più frequentemente usate sono l'ampiezza e la velocità; il grafico che segue (Figura A.1), serve per ricavare una grandezza dall'altra. Il grafico è stato tracciato in base alla relazione:

$$v = 0.1046 sn \quad (\text{A.1})$$

con

- $v$  = velocità in mm/s;
- $s$  = spostamento in micron;
- $n$  = numero di cicli in cicli/min.

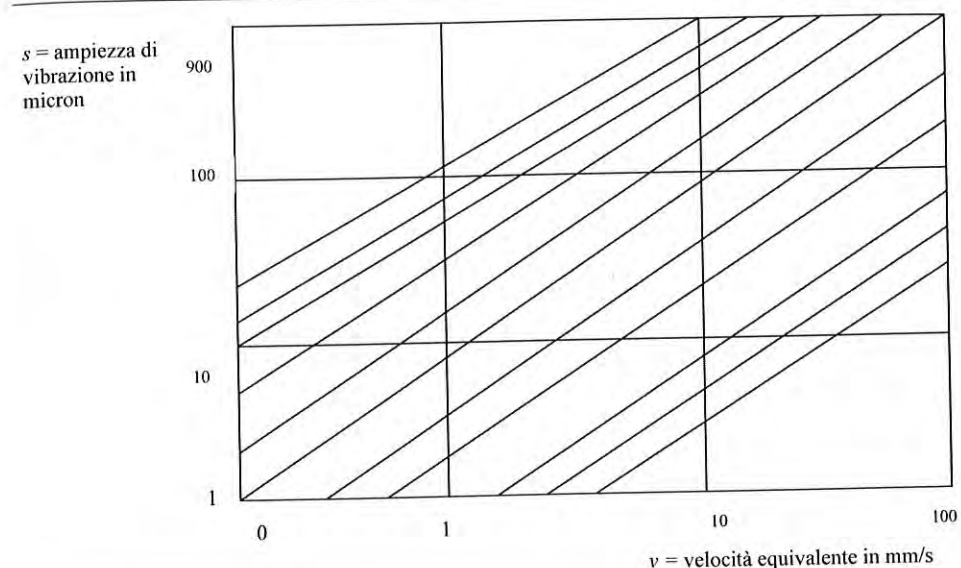


Figura A.1 Limiti di accettabilità delle vibrazioni [2].

Tale relazione, rigorosa per le vibrazioni armoniche, è considerata valida, per convenzione, anche per le vibrazioni complesse, ossia composte da più vibrazioni sinusoidali di ampiezza e frequenza diverse, considerando per  $n$  la frequenza caratteristica (per esempio la velocità di rotazione dell'organo rotante più importante della macchina).

Va detto che, prendendo in esame l'ampiezza, è necessario considerare anche la frequenza. Evidentemente, infatti, una certa ampiezza di vibrazione rappresenta un valore modesto e quindi accettabile se la frequenza è bassa, ma può diventare un valore molto elevato e quindi pericoloso se la frequenza è maggiore. La misura della velocità di vibrazione consente, invece, di esprimere un giudizio valido e definitivo anche se non si conosce la frequenza, ed è quindi molto utile qualora si voglia esaminare una macchina nella quale sono presenti contemporaneamente vibrazioni con frequenza diversa.

Un metodo pratico per giudicare sulla severità delle vibrazioni è quello di stabilire un valore caratteristico (*signature*) per un apparato che si sa essere in buone condizioni operative (non necessariamente nuovo), registrando gli scostamenti che nel tempo si presenteranno. Si è visto, per esempio, che in molti casi un incremento del livello di vibrazioni comincia a diventare significativo solo quando si raggiunge il doppio del valore di partenza.

Comunque, più che il valore assoluto della variazione, assume una particolare importanza il tasso di variazione, dal momento che il livello della vibrazione caratteristica di un componente meccanico espresso in funzione del tempo si può rappresentare come una retta con una leggera pendenza positiva per il 75% della vita utile, a cui segue una crescita esponenziale fino al guasto.

Alcuni autori (Rathbone, Yates) hanno basato le proprie valutazioni sia sulle opinioni di esperti sia sui risultati ottenuti attraverso metodi di misurazione diretta su macchinari rotanti a meno di 5000 giri/min (riuscendo a estrapolare poi le curve per velocità superiori) e sono giunti a compilare carte della severità di vibrazione; quest'ultime hanno avuto qualche applicazione industriale quando non ci si è voluti affidare solo all'esperienza, che consiglia, in generale, di non superare di una volta e mezza il valore considerato normale.

In ogni caso va ricordato che livelli di vibrazione considerati accettabili per le macchine, possono non esserlo per l'operatore: in questo senso, nel campo delle basse frequenze da 1 a 6 Hz, il massimo spostamento (in pollici) ammissibile è pari a due diviso la frequenza al cubo ( $2/f^3$ ); per una frequenza compresa tra 6 e 20 Hz il limite per lo spostamento è  $1/3f^2$ ; infine, per una frequenza tra 20 e 60 Hz lo spostamento massimo consentito è  $1/60f$ .

### Le tecniche di monitoraggio delle vibrazioni

Una prima grande classificazione [4] è quella che vede da un lato le tecniche di analisi delle vibrazioni che si basano sul tempo, dall'altra quelle che utilizzano la frequenza come parametro significativo. Entrambi i gruppi sono riportati sinteticamente nella Tabella A.2.

Tabella A.2 Classificazione delle tecniche di analisi delle vibrazioni

Parametro significativo	Tecnica
Tempo	Root Mean Square Livello di picco Shock pulse Method Energia di punta Forma d'onda nel tempo
Frequenza	Spectrum analysis Waterfall plot Cepstrum analysis Differenza di spettri

#### a) Le tecniche basate sul parametro tempo

##### Misura del livello globale (Root Mean Square - RMS)

È il metodo più utilizzato, grazie soprattutto alla sua semplicità e ai bassi costi: semplicemente è la misura dell'ampiezza media di vibrazione in funzione del tempo. Ci si basa sul confronto con apposite carte su cui sono indicati i livelli accettabili. Presenta consistenti limiti in quanto è una tecnica poco sensibile; in presenza di difetti di piccola entità, infatti, la segnalazione può essere tardiva. In particolare, sorgono problemi nell'individuare picchi di breve durata o impulsi, come è spesso il caso per le vibrazioni prodotte da ingranaggi o cuscinetti di rotolamento. Per questi ultimi, infatti, la vibrazione è costituita da un breve impulso che si genera ogni qual volta uno degli elementi rotanti (sfere, rulli) passa sopra il difetto.

##### Individuazione del livello di picco

In alternativa all'RMS, è una tecnica particolarmente utile per segnalare, per esempio, l'aggravarsi di un cuscinetto danneggiato, ma è poco affidabile perché l'aumento del livello di picco di un segnale può essere dovuto anche ad altre cause.

##### Shock Pulse Method (SPM)

Si tratta di una tecnica che permette di individuare lo sviluppo di un'onda dovuta allo shock meccanico derivante, per esempio, da un cuscinetto in avaria e consiste in una misura del livello alla frequenza di risonanza del cuscinetto. In altri termini, visto che può essere difficile individuare un cuscinetto difettoso con una semplice analisi di spettro se il suo contributo alla vibrazione complessiva è scarso, lo SPM misura l'onda di pressione generata dall'impatto degli elementi rotanti di un cuscinetto, mediante un accelerometro. Se il segnale in uscita dallo strumento viene filtrato alla frequenza di risonanza, si ottiene lo shock pulse.

Tale metodologia è largamente utilizzata, ma si è riscontrato che, in presenza di un'avaria già in forte stato di avanzamento, può non essere del tutto affidabile (per esempio fenomeni di turbolenza o cavitazione possono falsare la lettura).

##### Energia di punta

Si basa sullo studio dell'accelerazione massima alle alte frequenze, utilizzando un circuito che respinge le vibrazioni provocate da sorgenti caratterizzate da bassa frequenza, mettendo in risalto il livello di picco causato dall'eccitazione della macchina in risonanza.

##### Forma d'onda nel tempo

Mediante uno strumento semplice come l'oscilloscopio, è possibile visualizzare la forma d'onda della vibrazione. Singolarmente considerata questa tecnica non fornisce molte informazioni ma rappresenta un utile strumento se viene affiancata ad altri metodi.

#### b) Le tecniche basate sul parametro frequenza

##### Spectrum analysis (analisi di spettro)

Lo spettro deriva dalla forma d'onda della vibrazione, attraverso l'utilizzo della trasformata di Fourier; cioè si studia l'ampiezza di vibrazione in funzione della frequenza. L'analisi diretta dello spettro, o degli indici che da esso derivano, è uno dei migliori metodi di monitoraggio della condizione di un sistema meccanico o strutturale. È, infatti, possibile rapportare i picchi dello spettro ai singoli componenti della macchina, sfruttando il fatto che la frequenza misurata è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione della macchina stessa.

È chiaro che le caratteristiche vibratorie di ciascun sistema sono uniche e dipendono dal metodo di assemblaggio, montaggio e installazione del sistema stesso; di conseguenza è possibile ricavare uno spettro di riferimento (*signature spectrum*), ottenuto in condizioni di utilizzo normale, da utilizzare come termine di paragone per analisi successive, in modo da evidenziare correttamente quelle frequenze in cui si è verificato un aumento del livello delle vibrazioni.



È opportuno tenere conto del fatto che spesso lo spettro complessivo è caratterizzato da poche componenti vibratorie predominanti, importanti da monitorare, ma che possono mascherare quelle di ampiezza inferiore, prodotte da altri elementi del sistema che devono essere tenuti sotto controllo. Un modo di risolvere il problema consiste nel suddividere lo spettro nelle varie frequenze, così da poter osservare chiaramente anche le componenti meno evidenti, individuando immediatamente le variazioni su ciascuna frequenza, molto prima che gli effetti diventino sufficientemente ampi da essere visibili sullo spettro completo.

#### *Intreccio a cascata (waterfall plot)*

Si tratta di una rappresentazione tridimensionale dello spettro, in cui la terza dimensione è data generalmente dal tempo, il che permette di individuare con immediatezza ogni singola variazione temporale dello spettro.

#### *Cepstrum analysis*

Il cepstrum è lo spettro del logaritmo del *power spectrum* (inteso come ampiezza rispetto alla frequenza); serve a evidenziare eventuali periodicità nello spettro, proprio come quest'ultimo pone in risalto le periodicità della forma d'onda rispetto al tempo. Di conseguenza, più armoniche in uno spettro si sommano in un unico picco del cepstrum, consentendo una più precisa determinazione delle frequenze specifiche di guasto.

#### *Differenza di spettri*

Sottraendo matematicamente uno spettro da un altro, si mettono in risalto eventuali differenze di livello, il che consente poi di attuare un'analisi di frequenza di guasto per mettere in relazione le frequenze ai vari componenti del sistema.

#### **Gli strumenti per l'analisi delle vibrazioni**

I trasduttori per la misura delle vibrazioni possono basare il loro funzionamento su proprietà elettromagnetiche, elettrodinamiche, capacitive, piezoelettriche; sono quasi tutti caratterizzati dalla presenza di una sonda che trasforma il segnale da meccanico in elettrico.

#### *Gli accelerometri*

Sono spesso usati per le applicazioni di *condition monitoring* e consistono sostanzialmente in un certo numero di dischi piezoelettrici sui quali è posta una massa relativamente pesante; l'insieme è poi montato su una base su cui agisce una molla rigida e racchiuso in un involucro metallico. Se soggetta a vibrazione, la massa esercita una forza sui dischi, i quali generano un segnale elettrico direttamente proporzionale alla forza applicata e, quindi, all'accelerazione della massa. Mediante l'utilizzo di appositi circuiti, il segnale può essere integrato e visualizzato in termini di velocità o spostamento. Il *range* di frequenze utilizzabili è, per molti accelerometri, nella regione 10 ÷ 40 kHz ed è fortemente influenzato dal modo con cui si rende il sensore solidale alla macchina: il metodo migliore sembra essere l'utilizzo di un perno d'acciaio per il collegamento con una parte rigida della macchina; l'impiego di cementi compositi, colle speciali o magneti abbassa infatti il limite superiore delle frequenze ammissibili.

I materiali piezoelettrici più utilizzati sono titanato di zirconio o, per applicazioni speciali, niobato di piombo e di litio. Infine la sensibilità dell'accelerometro è misurata prendendo come unità l'intensità del segnale in millivolt in uscita dal circuito, in presenza di un'accelerazione pari a quella di gravità.

#### *I trasduttori di velocità*

Sono costituiti essenzialmente da una sonda, cioè un magnete permanente che circonda una bobina mobile; le vibrazioni della macchina causano lo spostamento relativo della bobina rispetto al magnete dando luogo a un segnale elettrico proporzionale alla velocità di vibrazione (e quindi allo spostamento, una volta che il segnale viene amplificato e integrato).

Possono essere a puntale o sismici: nei primi la cassa del rilevatore è fissata a un elemento fisso, mentre l'asta è a contatto della parte vibrante; si ha così una misura relativa fra le due parti. In quelli sismici la cassa del rilevatore è fissata alla parte vibrante, mentre all'interno del rilevatore vi è una parte (bobina o altro) sospesa sismicamente; in questo caso si ha una misura definita assoluta. Il campo di frequenze utilizzabili è 10 ÷ 1000 Hz.

Si deve tenere presente che ciascuno di questi mezzi, che servono a trasmettere la vibrazione alla sonda, ha una sua naturale frequenza di vibrazione che può alterare la misura.

È, pertanto, sempre preferibile utilizzare la sonda senza alcuna appendice e, dove questa risulta necessaria, è opportuno ripetere le misure sempre nello stesso punto e nello stesso modo, affinché i dati siano in ogni caso confrontabili.

#### *Lo stroboscopio*

Una valutazione ad ampio spettro delle frequenze di vibrazione può essere condotta con un esame stroboscopico; lo stroboscopio permette di vedere gli oggetti rotanti (o animati da moto alternato) in maniera intermittente, producendo un effetto ottico secondo cui il moto sembra rallentare o arrestarsi del tutto. Per esempio, un ventilatore elettrico ruotante a 1800 giri/min apparirà immobile se osservato con una luce che lampeggia 1800 volte al minuto; con 1799 flashe al minuto il ventilatore sembrerà ruotare a 1 giro/min ecc. L'ampiezza di una vibrazione potrà così essere valutata una volta che si sia posto un segno riconoscibile sulla parte vibrante (spesso si usa per alberi a gomito).

#### *Il registratore magnetico a nastro*

La registrazione a nastro permette di immagazzinare segnali per poi riprodurli e analizzarli in un secondo momento, con eventuale espansione o compressione della scala dei tempi, con la possibilità di mantenere le relazioni di tempo e fase fra un certo numero di essi.

La registrazione diretta è la tecnica più conveniente qualora si voglia analizzare ciascun segnale singolarmente in un campo di frequenze che cade fra 30 e 10 kHz. Se invece i segnali da analizzare hanno frequenze più basse o riveste una certa rilevanza lo studio delle relazioni tra più segnali contemporaneamente, allora si ricorre alla registrazione con modulazione di frequenza.

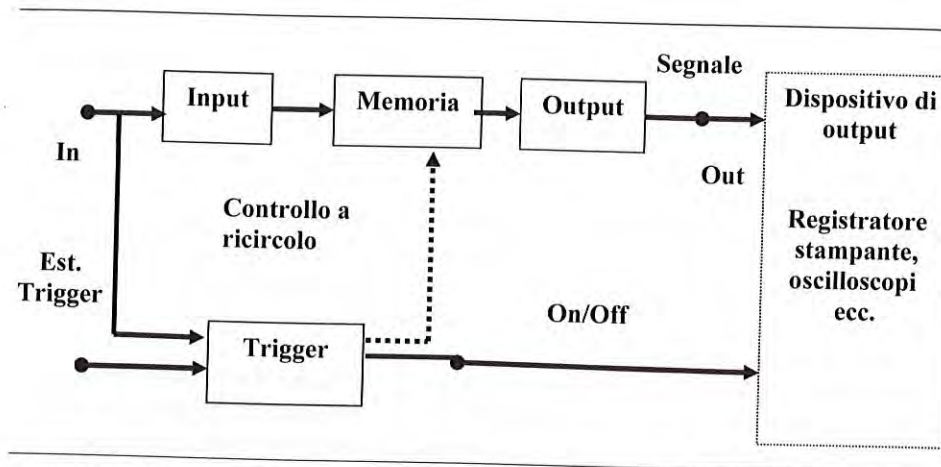


Figura A.2 Diagramma a blocchi del monitoraggio multi-channel.

#### Il metodo laser-olografico

L'olografia è una tecnica mediante la quale la fase e l'ampiezza di un fronte onda diffuso da un oggetto illuminato con una luce coerente (per esempio gas laser) sono registrati sotto forma di un modello d'interferenza su una lastra fotografica. L'onda originale può essere ricostruita illuminando la lastra fotografica con una luce coerente, per ottenere un'immagine tridimensionale completa dell'oggetto.

#### Il monitoraggio multi-channel delle deviazioni

È possibile individuare eventuali deviazioni dalla norma dell'intensità delle vibrazioni mediante un monitoraggio che non necessiti di una continua memorizzazione delle informazioni e che attivi il dispositivo di output solo quando gli scostamenti superano un valore predeterminato. Uno schematico lay-out potrebbe essere quello riportato in Figura A.2.

L'unità di input traduce il segnale in ingresso digitalizzandolo in una forma numerica, più adatta per essere registrata nella memoria del computer. Il numero di canali da monitorare varia da 1 a 16 e la frequenza di campionamento necessaria a riprodurre il segnale con la dovuta accuratezza dovrebbe essere 3 o 4 volte quella del segnale in studio. Il trigger analizza i segnali in ingresso alla ricerca di eventuali deviazioni dalla norma, monitorando eventualmente più canali per volta e utilizzando come termine di paragone una soglia prestabilita che può riguardare frequenza, ampiezza, tasso di variazione ecc. Quando la memoria incamera nuove informazioni, cancella le vecchie, perciò sono le sue dimensioni a determinare per quanto tempo si possano salvare i dati. Infine l'unità di output rappresenta il segnale in una forma idonea al dispositivo di output (stampante o altro).

#### A.2.2 L'analisi dell'olio lubrificante

In un grande numero di sistemi meccanici, idraulici ecc. in fase operativa circola un fluido lubrificante: lo scopo è, generalmente, quello di ridurre l'attrito fra due super-

fici striscianti l'una sull'altra. L'utilizzo di tali fluidi, infatti, permette di sostituire all'attrito fra le due superfici asciutte quello interno del fluido, che è molto minore. Tale accorgimento consente una diminuzione considerevole sia della quantità di energia perduta sotto forma di lavoro di attrito nelle macchine sia dei danni provocati dall'usura, cioè dall'asportazione di particelle dalle superfici durante il movimento reciproco di scorrimento. In particolare, si possono evidenziare fenomeni di usura meccanica (con rilascio di particelle metalliche dello stesso materiale di cui si compone il pezzo usurato) o chimica (in presenza di una reazione si generano ossidi, sali, fosfati ecc.).

Si tratta, in generale, di un processo complesso che è influenzato da diversi fattori: il lubrificante, il materiale costituente le superfici, le caratteristiche dell'organo lubrificato (conformazione geometrica, grado di finitura delle superfici, giochi), le condizioni di funzionamento (velocità di scorrimento, carico, condizioni ambientali). In tempi abbastanza recenti si è visto che l'importanza della lubrificazione non risiede solo negli aspetti poc'anzi accennati, ma anche nella mole di informazioni che un'attività di diagnostica ben programmata è capace di ricavare dallo studio degli oli lubrificanti. L'analisi dell'olio, infatti, analogamente al sangue nella fisiologia del corpo umano, è in grado di rilevare carenze o malfunzionamenti inerenti allo "stato di salute" del macchinario in esame.

Estese e approfondite indagini condotte negli ultimi decenni sulle particelle di usura prodotte durante il deterioramento tribologico di accoppiamenti variamente interagenti hanno permesso di individuare e quantificare alcune caratteristiche peculiari delle particelle, fondamentali per l'interpretazione dei processi tribologici. In sostanza è stato possibile dimostrare che le particelle di usura conservano elementi tipici dei meccanismi che le hanno prodotte, e in particolare sono individuabili:

- caratteristiche quantitative (quantità e distribuzione dimensionale delle particelle);
- caratteristiche qualitative (natura dei frammenti prodotti).

Per esempio si è visto che la presenza di particelle sferiche è sintomo di fatica meccanica, in particolare dovuta a contatto di rotolamento.

Nell'evoluzione di questi fenomeni da un modo di usura a un altro, e da un livello di usura a un altro, le caratteristiche su menzionate subiscono sostanziali variazioni che, opportunamente rilevate e quantificate mediante le varie tecniche di analisi, offrono un efficace metodo per la diagnosi dei sistemi operativi. Più precisamente, si può ritenere che i processi di usura siano contraddistinti da quattro elementi fondamentali [5]:

- livello quantitativo correlato al volume totale delle particelle di usura prodotte e rappresentativo dell'entità dell'usura nelle zone di contatto;
- livello di severità correlato alla distribuzione dimensionale delle particelle prodotte;
- distribuzione morfologica dei frammenti significativi che evidenzia, con buona precisione, i meccanismi di usura in atto (adesione, abrasione, delaminazione ecc.) responsabili dei danneggiamenti;
- natura dei frammenti correlata ai materiali costitutivi degli stessi, che permette l'identificazione delle sorgenti delle particelle prodotte.

Con un'immagine esemplificativa si può affermare che l'intera industria moderna poggia su un film di lubrificante non più spesso di 10  $\mu\text{m}$ : la scomparsa di questa pellicola protettiva è fonte di gravi danni. Una delle cause più comuni dei fenomeni di usura e di guasto di una macchina è la degradazione del fluido lubrificante, dovuta alla presenza di particelle inquinanti o umidità.

Spesso si attribuisce a "normale usura", un'avaria provocata dall'alterazione del lubrificante: il Canadian Research Council ha riscontrato che addirittura l'82% di tutti i guasti, registrati in un vasto campione di industrie, erano imputabili a questo tipo di inconveniente [6]. Le particelle provenienti da sporcizia, polvere o altro, erodono lentamente le superfici critiche delle macchine fino a modificare la conformazione geometrica dei giochi, rendendo necessaria la sostituzione o la revisione dell'intero apparato. Allo stesso modo, l'umidità compromette la qualità del lubrificante causando un contatto irregolare tra le parti in moto relativo.

Il monitoraggio di questo tipo di fenomeni, mediante una strategia di *proactive maintenance*, costituisce quindi un'ottima opportunità di riduzione dei costi di manutenzione. Per far ciò, occorre passare attraverso tre fasi necessarie ad assicurare il raggiungimento dei benefici desiderati.

Dato che, per definizione, questo genere di strategia manutentiva si basa su un monitoraggio continuo e sul controllo delle possibili cause di guasto, la prima cosa da fare è fissare un obiettivo, o standard, associato a ciascuna causa. Nel caso dell'analisi degli oli, le principali cause consistono nella contaminazione del fluido (particelle, umidità, caldo, liquido refrigerante) o nel deterioramento degli additivi. A ogni modo, il processo di definizione degli standard è soltanto il primo passo: occorre poi verificare che questi livelli di normalità siano acquisiti e mantenuti dal fluido, eventualmente facendo ricorso a migliori sistemi di filtraggio o all'uso di separatori. La terza fase è altrettanto importante e consiste nel gestire il ritorno di informazioni derivante da un'analisi dell'olio: quando si supera un livello considerato di guardia, si devono attuare tempestivamente le necessarie correzioni, così da sviluppare una disciplinata attività di monitoraggio e controllo della qualità del lubrificante, e non un semplice esercizio previsionale del livello di inquinanti presenti.

Gli standard devono essere settati tenendo conto della sensibilità della macchina alla pulizia dell'olio, della severità delle conseguenze di un guasto, dell'ambiente in cui l'apparato opera. Una volta definiti, però, questi limiti vanno anche rispettati: l'uso dei filtri non è sufficiente, anche perché estrarre una particella quando si è già introdotta nel fluido lubrificante ha un costo dieci volte più elevato di quello delle procedure necessarie a tenerla lontana dalla macchina.

I controlli vanno attivati dal momento in cui si riceve la fornitura di olio; il fluido nuovo, infatti, raramente è abbastanza pulito da poter essere subito messo in servizio: i processi logistici legati al trasporto del lubrificante dalla raffineria, al fornitore, fino all'impianto, comportano un rischio di contaminazione non trascurabile. In questo senso, bisogna riporre molta attenzione anche alle modalità con cui si riforniscono i macchinari, durante le fasi di cambio o rabbocco dell'olio, e le procedure di immagazzinamento. Per limitare al minimo l'ingresso di particelle estranee nell'olio, è insomma necessario uno sforzo organizzativo che miri a definire procedure specifiche e dettagliate per un corretto trattamento del lubrificante dal momento della consegna a quello della sua sostituzione.

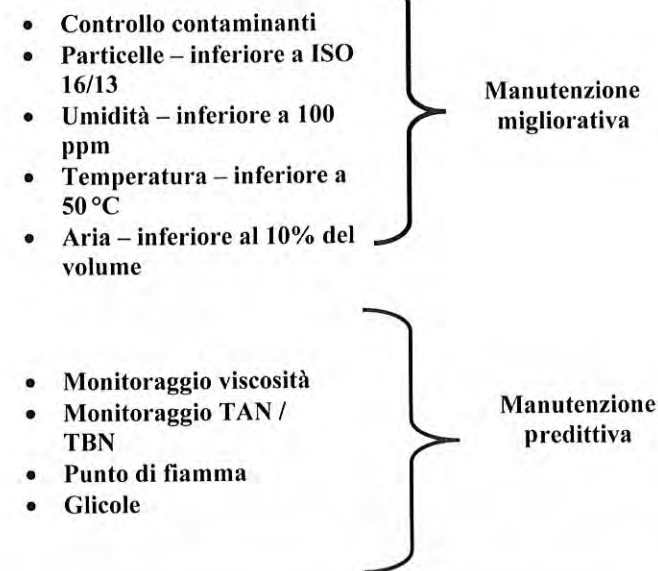


Figura A.3 Esempio di manutenzione on-condition per un motore a scoppio e suddivisione dei compiti manutentivi.

Quando i segnali di preavviso di guasto incipiente sono rilevati in modo puntuale, frutto di un'accorta manutenzione predittiva, si ha il vantaggio di poter disporre di una vita prolungata della macchina, grazie a un'efficace manutenzione migliorativa, e si è così certi di avere attuato un completo programma di manutenzione on-condition.

Ciò è reso possibile dalla complementarità delle due strategie: mentre la manutenzione migliorativa ha come obiettivo l'identificazione e il controllo delle cause prime di guasto, la manutenzione predittiva mira alla determinazione di anomalie incipienti, riguardanti le proprietà sia del fluido sia dei componenti della macchina; entrambe concorrono in modo proporzionale alla buona conduzione dell'impianto (in Figura A.3 l'esempio relativo al monitoraggio dell'olio di un motore).

#### I vantaggi e le applicazioni

Una recente indagine promossa negli Stati Uniti per quantificare il valore di un'attività di analisi del lubrificante ha stabilito che il ritorno sull'investimento iniziale può aggirarsi intorno al 250% [Leugner, 1998]. Questo risultato è conseguenza del fatto che uno sforzo organizzativo come quello descritto nel precedente paragrafo, fornisce informazioni su due diverse aree:

- le proprietà fisiche dell'olio lubrificante, come la viscosità, il livello di contaminazione ecc.;
- le condizioni del componente o sistema da cui si è prelevato l'olio.

È possibile, quindi, riuscire a tenere sotto controllo gli eventuali inconvenienti, pri-

ma che si trasformino in problemi più seri<sup>1</sup>; per il responsabile della manutenzione ciò vuol dire avere la possibilità di programmare in maniera più efficiente i fermi macchina, garantendo tempi ridotti per la riparazione e rendendo possibili continui miglioramenti (calcolando, per esempio, la cadenza ottimale con cui procedere alla sostituzione dei filtri).

Nei motori, per esempio, questo tipo di analisi può fornire informazioni riguardanti lo stato di salute del sistema di aspirazione dell'aria, mediante il monitoraggio del livello di silicio (inquinante) nell'olio: se il livello aumenta si dovrà ricorrere alla sostituzione dei filtri dell'aria e al cambio dell'olio. Allo stesso modo, la presenza nel lubrificante di residui della combustione potrebbe significare che il sistema di aspirazione è troppo stretto, oppure che il filtro dell'olio è inefficace, o si ha una combustione incompleta; una certa percentuale di ferro o alluminio è invece indicativa di danneggiamento della parete dei cilindri. Analogamente, si possono misurare il grado d'usura dei cuscinetti, prima che ne risenta l'albero a gomiti, oppure anche eventuali infiltrazioni d'acqua o di liquido antigelo nell'olio, prima che raggiungano entità preoccupanti: per esempio la presenza di boro in molti sistemi raffreddati a liquido indica una fuoriuscita del refrigerante che, in mancanza di un intervento tempestivo, si combina con i prodotti della combustione formando acidi che attaccano il metallo.

È possibile programmare questo genere di analisi anche per apparati nei quali non ha luogo un processo di combustione: nei sistemi idraulici, nelle trasmissioni, nelle scatole di ingranaggi, differenziali ecc. Un alto tasso di alluminio, per esempio, può indicare un potenziale guasto di una pompa o di un trasformatore.

L'incremento del contenuto di argento e nichel in un certo tipo di motori Diesel per applicazioni ferroviarie è sintomatico di un'elevata usura dei cuscinetti: se effettuata per tempo, quest'analisi permette di attuare una semplice sostituzione di un cuscinetto, piuttosto che intervenire sull'albero con una sensibile riduzione dei costi.

La pulizia dell'olio che evolve in un sistema idraulico è particolarmente importante, viste le strette tolleranze che caratterizzano le pompe, le valvole di controllo e i giochi tra i pistoni e le pareti dei cilindri: è noto che circa il 25% dei guasti in cui questi sistemi incorrono è causato dalla presenza nel lubrificante di detriti, polvere o umidità.

Nonostante tutto, però, ancora permane una certa diffidenza verso questo tipo di analisi e, in generale, nei confronti della manutenzione su condizione, a causa del fatto che un approccio "proattivo", per sua natura, prevede un ritorno economico difficilmente quantificabile e non prontamente fruibile, cui fa fronte un investimento sicuro e immediato. Se a ciò si aggiunge l'approssimazione con cui, spesso, si valuta il risparmio derivante da un guasto evitato su macchinari essenziali, a volte accompagnata da una superficiale imputazione dei costi, è facile spiegare l'ostruzionismo che incontrano certe metodologie manutentive moderne (Figura A.4).

Per essere più chiari: se le spese per il condition monitoring vengono contabilizzate sotto la voce "manutenzione" e poi i maggiori introiti derivanti da una produzione accelerata sono imputati esclusivamente alla bravura del direttore di produ-

<sup>1</sup> In questo senso, l'analisi degli oli fornisce spesso indicazioni più tempestive di quelle ricavabili con l'analisi delle vibrazioni, in quanto i sintomi oggetti di monitoraggio nel primo caso si presentano in anticipo rispetto alle vibrazioni.

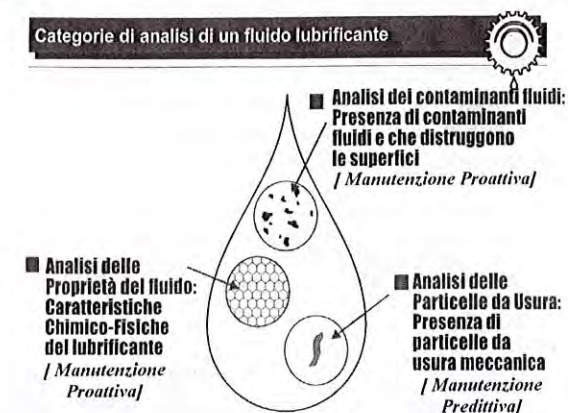


Figura A.4 Analisi di un fluido lubrificante.

zione, si omette di considerare, come si dovrebbe, che una quota parte di tale guadagno è stato reso possibile dalla riduzione dei fermi macchina ottenuti attraverso la manutenzione su condizione.

Più delle parole, può essere esplicativa una rappresentazione grafica che metta in risalto le potenzialità di questo tipo di analisi: la Figura A.5 fornisce un'indicazione del numero totale di campioni di olio analizzati, durante il 1991, per vari enti governativi.

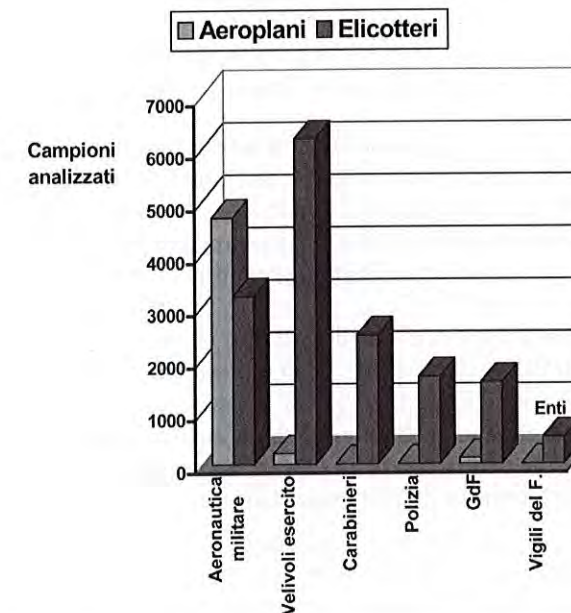


Figura A.5 Programma di analisi spettrografica degli oli per le agenzie governative.

La Figura A.6, inoltre, evidenzia la percentuale di situazioni anomale segnalate dall'analisi, relativamente ad alcuni dei componenti essenziali dei velivoli e degli elicotteri monitorati. Nel caso peggiore, in cui cioè non si fosse pervenuti alla sostituzione del pezzo in base ad altre logiche manutentive (per esempio manutenzione preventiva ciclica), il 6,6% degli apparecchi sarebbe incorso in avarie di cui è difficile, a priori, valutare le conseguenze, anche in termini di pericolo per la vita umana.

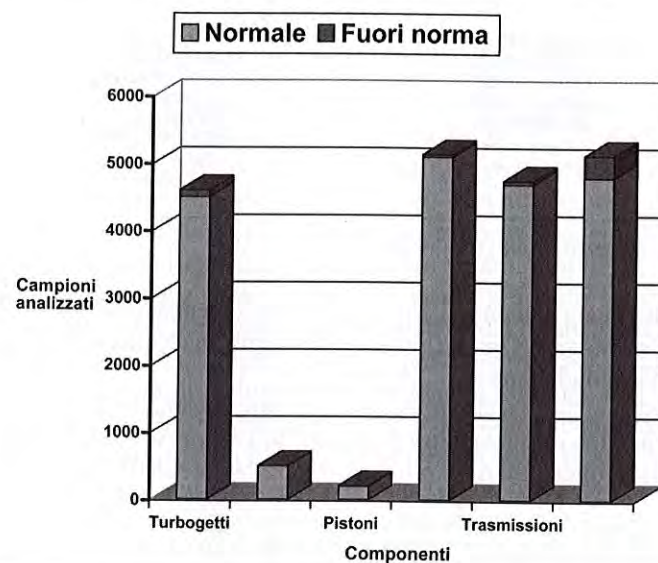


Figura A.6 Anomalie riscontrate nelle analisi prospettate dalla Figura A.5.

#### I parametri da monitorare

In una macchina in buone condizioni i test sul lubrificante forniscono, come risultato, un tasso di crescita della contaminazione dell'olio che rimane quasi costante: se si riscontra un incremento improvviso, ciò può essere sintomo di un guasto incipiente. Un'unica misurazione, quindi, non è particolarmente significativa; molto più interessante è il confronto fra diversi risultati ottenuti nel tempo dall'analisi della stessa macchina.

Per riuscire a identificare un'anomalia, occorre prima stabilire cosa s'intende per "condizioni normali di funzionamento": ciò è possibile con l'utilizzo di opportuni sistemi informatici in grado di gestire una banca dati dei risultati relativi a un gruppo di macchine simili, permettendo lo sviluppo di un'analisi prospettica capace di generare previsioni attendibili sulle condizioni della macchina e del fluido lubrificante. I test più importanti in tal senso, mirano a quantificare:

- viscosità;
- presenza di insolubili;
- acidità;
- basicità;
- presenza di contaminanti liquidi (acqua, combustibile, glicole) o solidi.

Altri fattori da determinare possono essere il grado di esaurimento degli additivi nell'olio, il tasso di produzione e la forma delle particelle di usura eventualmente presenti nel lubrificante, la presenza di cloruri (molto corrosivi, tipici dell'industria navale) e di combustibile nell'olio (che comporta una diminuzione della viscosità) (Figura A.7 e Tabella A.3).

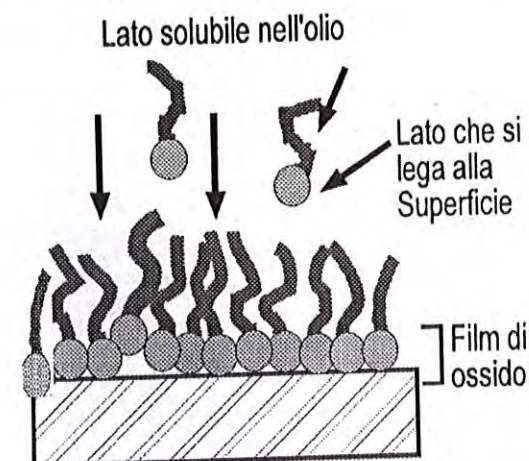


Figura A.7 Funzione protettiva degli additivi.

Tabella A.3 Tipi di additivi e loro funzione

Tipi di additivi e loro funzione	
<b>Motori Diesel</b>	Anti ossidanti, inibitori della corrosione, detergenti-disperdenti, anti-usura, anti-schiumeggianti, additivi che contrastano l'acidificazione dell'olio
<b>Turbina a vapore compressore</b>	Anti-ossidanti, inibitori della corrosione anti-emulsionanti
<b>Ingranaggi</b>	Anti-usura, anti-ossidanti, anti-schiumeggianti, alcune volte inibitori della corrosione, additivi per pressioni estreme
<b>Ingranaggi - viti senza fine</b>	Anti-ossidanti, inibitori della corrosione, additivi per pressioni estreme
<b>Sistemi idraulici</b>	Anti-usura, anti-ossidanti, anti-schiumeggianti, inibitori della corrosione, additivi che abbassano il punto di congelamento, additivi che aumentano l'Indice di viscosità

Un buon programma di *condition monitoring* deve dunque essere in grado di stabilire le proprietà fisiche dell'olio, segnalando con prontezza ogni variazione improvvisa dalle condizioni normali, imputabile ai più svariati motivi. Alcuni esempi di ciò che si può ricavare da un'analisi attenta delle condizioni della macchina sono riportati in Tabella A.4.

**Tabella A.4** Rapporti causa-effetto evidenziabili con il condition monitoring

Causa	Effetto
Rabbocco con olio troppo viscoso	Aumento dei consumi di combustibile, carenza di fluido lubrificante, usura accelerata
Rabbocco con olio poco viscoso	Alte temperature, ossidazione, usura accelerata
Albero danneggiato	Presenza di particelle di ferro
Cuscinetti danneggiati	Presenza di particelle di bronzo
TAN troppo alto	Corrosione dei pistoni e dei cuscinetti
Basso contenuto di additivi	Agenti inquinanti depositati sul metallo, ossidazione del metallo
Presenza di insolubili (incombusti, residui della degradazione degli additivi ecc.)	Gelatinizzazione dell'olio
Presenza di abrasivi insolubili (polvere, particelle introdotte durante la manutenzione o al cambio dell'olio)	Aumento della viscosità dell'olio e sua gelatinizzazione

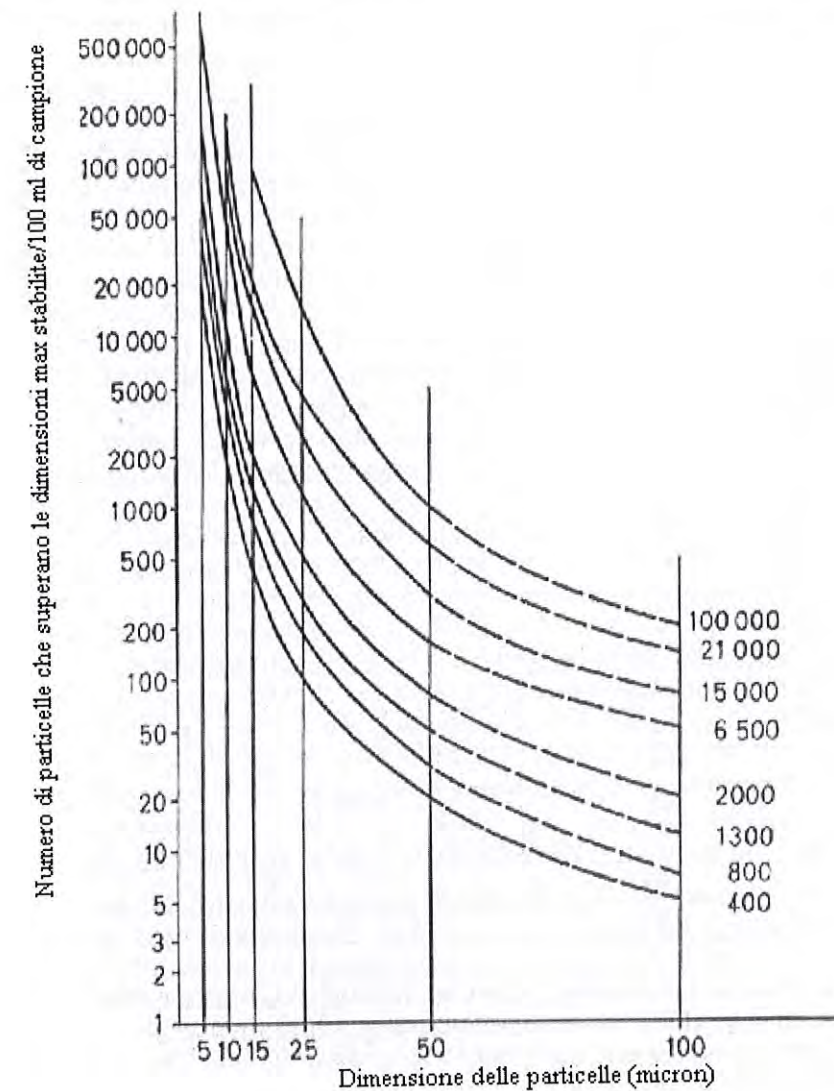
La presenza di contaminanti esterni è particolarmente pericolosa.

Il grado di pericolosità dipende dalle dimensioni e dalla durezza delle particelle: particelle dure come la sabbia derivante da una fusione poco "pulita" del metallo possono causare seri fenomeni di usura, per esempio sulle superfici dei cuscinetti, modificando i giochi e interferendo sulla funzionalità delle altre parti del sistema.

Nei sistemi idraulici più sensibili (come quelli per impieghi aeronautici) anche una piccola percentuale di materiali insolubili nell'olio può provocare avarie e malfunzionamenti; in questo caso si dovranno definire standard particolarmente severi. Le sostanze contaminanti in tali sistemi si presentano sotto forma di melma, contenente particelle solide di diversa composizione chimica e con una gamma infinita di forme, dimensioni e grado di durezza. Affinché non ci siano problemi, queste particelle devono potere passare attraverso i giochi delle parti in movimento; se così non è, esse agiscono sulle superfici dei vari componenti, levigandole e portando in soluzione altri detriti dannosi, con un processo che è detto perciò "reazione a catena dell'usura".

Uno dei possibili sistemi di monitoraggio per la distribuzione delle particelle in un sistema idraulico richiede l'estrazione di campioni da 100 ml di olio dal sistema, ciascuno dei quali andrà filtrato attraverso una membrana, su cui si depositeranno i

detriti da studiare al microscopio. Una volta applicato questo procedimento a un numero elevato di sistemi, è possibile definire classi di contaminazione che esprimono il massimo numero di particelle più grandi della dimensione specificata contenute in un campione di 100 ml (Figura A.8).



**Figura A.8** Diagramma dei possibili livelli di contaminazione.

Del resto, per esprimere correttamente i livelli di contaminazione dei fluidi si possono utilizzare i diversi standard che nel tempo si sono andati affermando (Tabella A.5).

Tabella A.5 Principali rappresentazioni dei livelli di contaminazione

Codice ISO	Particelle per ml > 10 $\mu\text{m}$	Livello gravimetrico mg/L	MIL STD 1246A (1967)	Codice NAS 1638 (1964)	Classe SAE 749
26/23	140000	1000			
25/23	85000		1000		
23/20	14000	100	700		
21/18	4500			12	
20/18	2400		500		
20/17	2300			11	
20/16	1400	10			
19/16	1200			10	
18/15	580			9	6
17/14	280		300	8	5
16/13	140	1		7	4
15/12	70			6	3
14/12	40		200		
14/11	35			5	2
13/10	14	0.1		4	1
12/9	9			3	0
11/8	5			2	
10/8	3		100		
10/7	2.3			1	
10/6	1.4	0.01			
9/6	1.2			0	
8/5	0.6			00	
7/5	0.3		50		
6/3	0.14	0.001			
5/2	0.04		25		
2/0.8	0.01		10		

La presenza di acqua nel lubrificante è altrettanto dannosa perché riduce l'efficacia degli additivi, accelera il processo di ossidazione dell'olio e la corrosione, riducendo la vita utile del lubrificante; spesso sono necessarie azioni correttive immediate o addirittura la sostituzione dell'olio.

I limiti da rispettare per la presenza degli inquinanti predetti sono stabiliti dalle compagnie produttrici dei lubrificanti e dall'American Society for Testing and Materials (ASTM) e variano secondo il sistema: ciò che importa è che esista un programma di acquisizione e registrazione dei dati, il quale preveda, attraverso l'utilizzo di un software opportuno, un'attività di segnalazione ogni qual volta tali limiti sono raggiunti.

### La definizione delle soglie d'allarme e dei metodi di campionamento dell'olio

In passato la maggior parte degli utilizzatori di tecniche di analisi del lubrificante si serviva di laboratori esterni, ai quali delegava anche la determinazione dei valori di soglia più opportuni per i parametri utilizzati. Si tratta di un approccio che non permette di sfruttare al meglio le potenzialità dei moderni programmi di manutenzione *on-condition*, perché non tiene conto del fatto che un laboratorio esterno difficilmente riuscirà a formulare proposte valide fino in fondo, a causa delle inevitabili approssimazioni che si verificano quando si devono interpretare informazioni relative a un apparato sconosciuto.

L'analista esterno, evidentemente, non conosce bene l'ambiente in cui è utilizzato il fluido lubrificante, che è invece ben noto all'operatore di linea, il quale, potendo disporre delle attrezzature necessarie, è in questo senso più adatto a effettuare le prove necessarie. Un'altra esigenza del cliente che un laboratorio non è in grado di soddisfare, riguarda l'immediatezza dei risultati: spesso questi ultimi si rendono disponibili solo tre settimane dopo il prelievo del campione di olio dalla macchina, con diseconomie non trascurabili.

Negli ultimi anni, con la commercializzazione di sofisticati sistemi che consentono di effettuare in proprio questo tipo di monitoraggio, molti addetti del settore e operanti nell'industria, hanno compreso la necessità di settare le soglie di attenzione in base alla propria conoscenza delle macchine, del lubrificante, dei dati storici, lasciando al laboratorio il compito di ottenere risultati completi e puntuali, senza esprimere valutazioni di sorta.

Uno dei principali benefici ottenibili impiegando un software per l'analisi dell'olio all'interno dello stabilimento risiede nel riuscire a operare, fin dall'inizio, un'accurata selezione dei dati, in modo che solo quelli relativi a situazioni di mancato rispetto degli standard siano oggetto di reporting; tutti gli altri saranno acquisiti in un database utile in caso di analisi di trend. I dati relativi ad alcuni parametri sono caratterizzati dalla presenza dei soli limiti superiori (per esempio la misura delle particelle inquinanti presenti o il livello di detriti da usura); in altri casi si fissa il solo limite inferiore (TBN, elementi additivi, punto di fiamma); esistono infine parametri che utilizzano entrambi i valori limite (nel caso di importanti proprietà chimico-fisiche dell'olio, come la viscosità).

È possibile individuare tre categorie principali di limiti [Fitch, 1998].

1. *Proactive limits*. I limiti settati secondo una strategia "proactive", servono ad avvisare l'utente di un'anomalia della macchina, ponendola in relazione con la causa che l'ha prodotta in termini di degrado di prestazioni della macchina stessa o del lubrificante; essi sono funzionali alla filosofia della *proactive maintenance* e come tali vengono gestiti. Le condizioni del lubrificante, cioè, sono controllate in funzioni di livelli di soglia che sono continuamente aggiornati e incrementati in valore assoluto ogni qual volta l'esperienza lo rende possibile: ogni limite è frutto di un miglioramento, suggerito dalla pratica, del livello di soglia in vigore fino a quel momento. Per esempio, se si sta utilizzando la quantità di particelle estranee nel lubrificante come parametro da monitorare, sarà necessario scegliere un livello minimo di pulizia che sia un perfezionamento di quello in uso (Figura A.9).

Questo tipo di approccio conduce alla definizione di limiti detti *goal-based* e

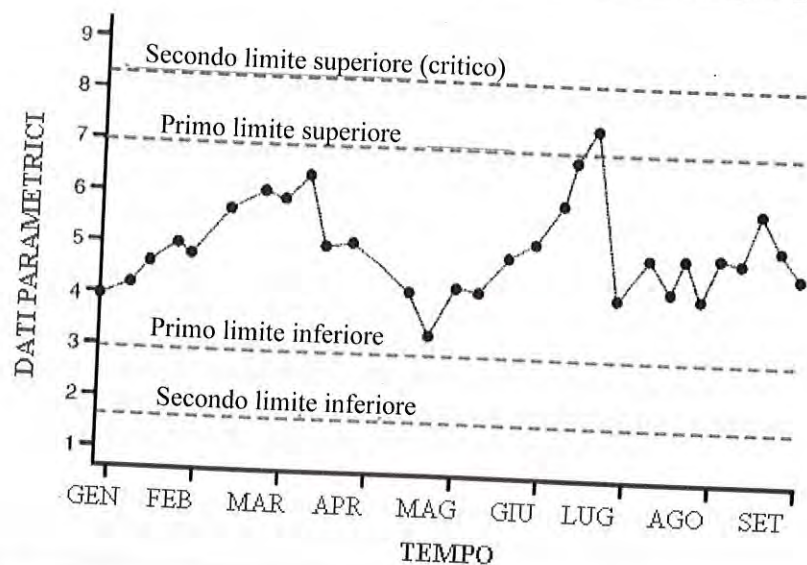


Figura A.9 Limiti superiori e inferiori nell'analisi dell'olio [Fonte: Fitch, 1998].

può essere utilizzato anche per definire i livelli massimi accettabili di umidità, acidità, glicole e combustibile presenti nell'olio.

In alternativa, si può procedere alla determinazione dei cosiddetti *aging limits*, cioè di quei valori di soglia che riguardano le principali proprietà fisico-chimiche dell'olio: queste hanno una naturale tendenza a deteriorarsi nel tempo, rispetto all'istante di messa in servizio del lubrificante; quando risulta evidente una brusca accelerazione in questo processo degenerativo, vuol dire che è necessaria una corretta azione manutentiva.

Particolare cura deve essere riposta nella misurazione delle proprietà dell'olio nuovo, poiché esse costituiscono una sorta di sigla (*signature*) di riconoscimento del lubrificante, che sarà utilizzata come termine di paragone per le misurazioni future; quest'ultime andranno effettuate facendo attenzione a utilizzare gli stessi strumenti e le stesse modalità già adoperate per la misurazione iniziale. Questo tipo di limiti può essere efficacemente utilizzato per lo studio di parametri quali TAN, TBN, viscosità, costante dielettrica.

2. *Predictive limits*. I limiti descritti, seguono la filosofia della proactive maintenance e quindi sono utili nella determinazione delle cause prime dei guasti; è possibile anche seguire un diverso approccio, in base a una strategia tipica della manutenzione predittiva, il cui fine è quello di segnalare con ragionevole anticipo la presenza di sintomi di un guasto incipiente. L'utilizzo di tali limiti predittivi, se correttamente applicati, dà la possibilità di prevedere con buona approssimazione i futuri eventi dannosi per la macchina.

Si possono illustrare con un esempio, con particolare riferimento al limite fissato per il tasso di variazione di un qualche parametro. Si supponga che in una

data macchina sia normale attendersi che la concentrazione del ferro nell'olio lubrificante cresca al ritmo approssimativamente di 5 ppm al mese. Il primo mese dopo aver effettuato un cambio dell'olio si riscontra proprio 5 ppm, cioè il livello atteso. Il secondo mese la crescita si mantiene stabile, presentando 10 ppm di ferro e così pure il terzo mese, quando si riscontra la presenza di 15 ppm di ferro. Alla fine del quarto mese però, le analisi forniscono come risultato un valore di 50 ppm. Il software lo segnalerà come situazione critica, non perché tale concentrazione sia di per sé anormale (è, al contrario, abbastanza comune nella pratica industriale), ma perché il tasso di variazione della presenza di ferro è passato bruscamente da 5 ppm a 35 ppm, segnale inequivocabile di un'usura accelerata, che non sarebbe stata messa in risalto se non si fosse fatto ricorso ai limiti specificati. Questi ultimi oltre che per i detriti da usura, sono indicati anche per il computo delle particelle inquinanti e il TAN (Figura A.10).

3. *Statistical limits*. I limiti statistici sono stati usati per molto tempo, e con successo, nell'analisi degli oli, sempre nell'ambito di un approccio predittivo della manutenzione.

È necessaria la disponibilità di un certo numero di dati storici riguardanti i parametri in studio; è così possibile ricavarne una distribuzione probabilistica, e calcolare quindi la deviazione standard  $\sigma$  in base alla quale settare poi i limiti superiori. I dati sono disponibili presso molti laboratori e riguardano numerosi modelli di macchine: ciò permette un facile calcolo dei valori medi nazionali e delle conseguenti deviazioni standard. Quando si supera il valore  $\sigma$ , vuol dire che il risultato del test ha superato il 68% dei valori dei dati storici;  $2\sigma$  corrisponde al 95% mentre superare  $3\sigma$  equivale al 99.7% del database. Molti analisti posizionano il livello di attenzione in corrispondenza del valore  $2\sigma$ . Le applicazioni più consuete per questo tipo di limiti riguardano l'analisi elementare delle particelle metalliche da usura e l'analisi della densità del ferro (Figura A.11).

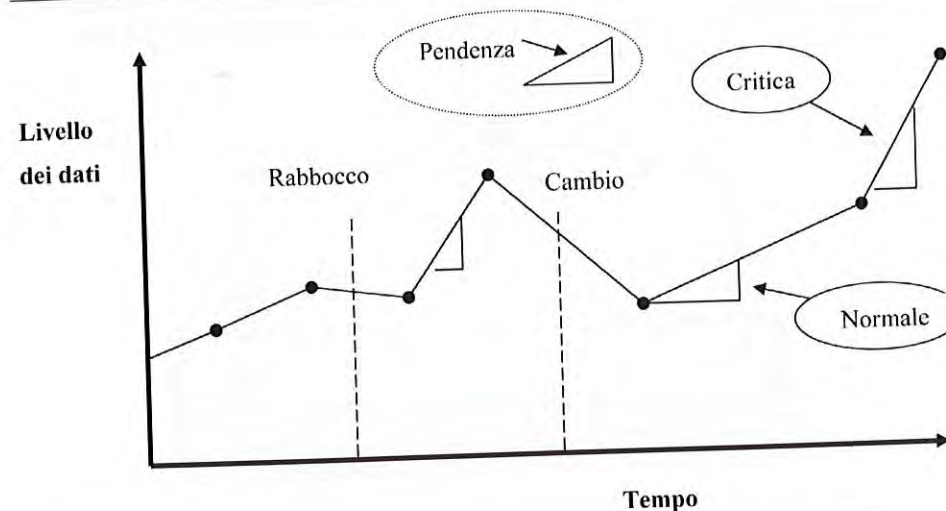


Figura A.10 Limiti del tasso di variazione per un'analisi di trend [Fonte: Fitch, 1998].



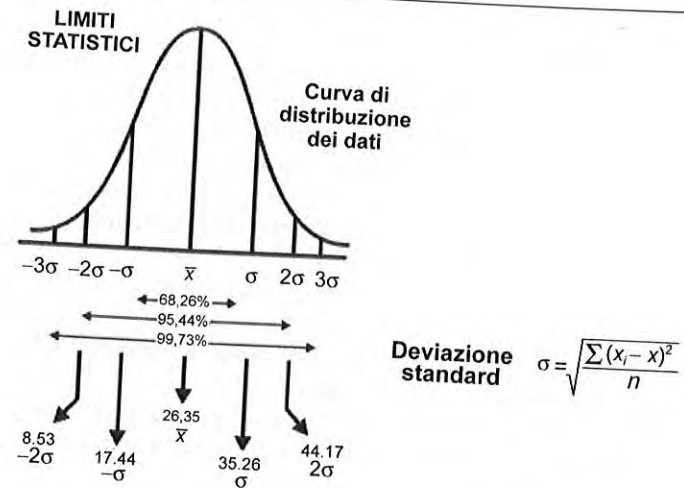


Figura A.11 Limiti statistici [Fonte: Fitch, 1998].

Sono tre gli accorgimenti da prendere per garantire una valida procedura di estrazione dei campioni di fluido lubrificante necessari per l'analisi.

1. *Selezionare un punto ottimale di campionamento.* Nei sistemi a olio circolante, la migliore zona per prelevare un campione è quella a monte dei filtri, dove c'è la maggior concentrazione di detriti da usura (Figura A.12); generalmente questo vuol dire effettuare il campionamento sulla linea di scolo o, nel caso in cui l'olio gocciola nelle coppe senza utilizzare una linea apposita (per esempio nei motori Diesel), sfruttando la pressione della linea tra la pompa e i filtri.

Sono da evitare invece le zone di ristagno (serbatoi, taniche), mentre per i componenti lubrificati a spruzzo o per immersione è consigliabile utilizzare, per il campionamento, opportuni gocciolatoi.

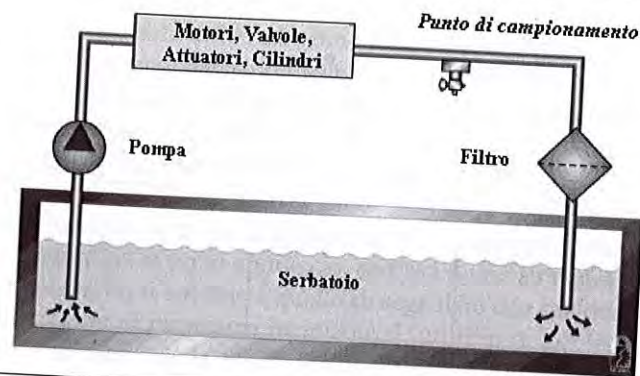


Figura A.12 Campionamento del fluido di un sistema idraulico per analisi di routine [Fonte: Fitch, 1998].

2. *Raccogliere correttamente i campioni.* Una volta scelto il punto adatto, si deve procedere all'estrazione del campione senza inficiare l'integrità dei dati. L'olio deve essere caldo e ben mescolato così da garantire una concentrazione rappresentativa di particelle, umidità e altri contaminanti; ciò si può ottenere mediante campionamento in zone turbolente, per esempio, in corrispondenza di un gomito nella tubazione (Figura A.13). È necessario, inoltre, che la macchina da analizzare si trovi nel suo tipico ambiente operativo, possibilmente a velocità di regime, con valori medi del carico e del ciclo di lavoro. Si usano spesso valvole opportune, inserite nel condotto di lubrificazione, che permettono di estrarre un campione senza arrestare la macchina o perdere grandi quantità d'olio. Queste vanno lavate accuratamente con un getto violento prima dell'uso e l'olio estratto va inserito in bottiglie da laboratorio che vanno riempite per non più di tre quarti e chiuse ermeticamente, per evitare il contatto con agenti atmosferici inquinanti. In molti sistemi l'unica possibilità è quella di operare prelievi statici, per esempio attraverso delle apposite aperture o, in alternativa, mediante pompe a vuoto azionate manualmente oppure estraendo campioni dalla coppa dell'olio gocciolante dopo una sostituzione completa del lubrificante.

Tutti i dispositivi menzionati vanno risciacquati scrupolosamente ogni volta, per evitare contaminazione e mescolamento dei fluidi.

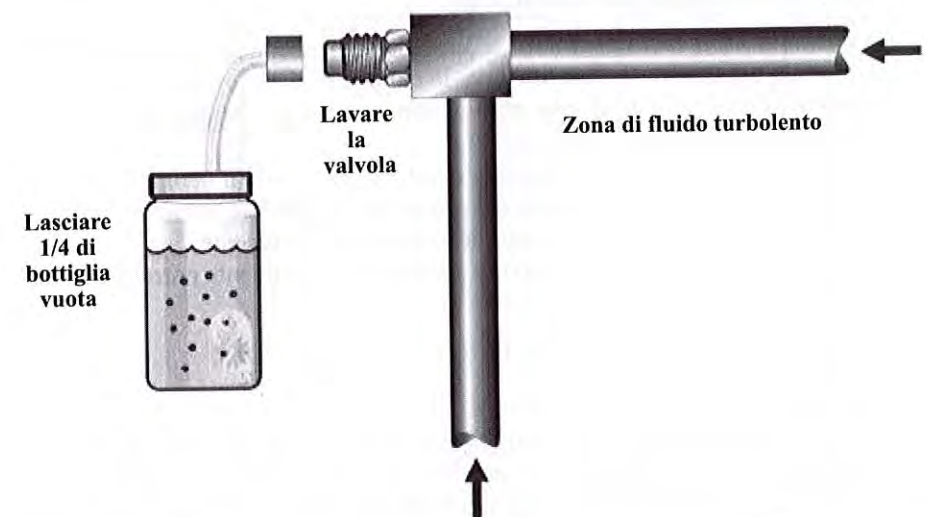


Figura A.13 Campionamento in zona turbolenta [Fonte: Fitch, 1998].

3. *Minimizzare la contaminazione dei dati.* Monitorare il livello di contaminanti non è sufficiente: occorre assicurarsi che il campione non venga in contatto con agenti atmosferici inquinanti. Inoltre è necessario programmare con attenzione le frequenze di campionamento; la pratica suggerisce intervalli variabili in rapporto alla criticità della macchina, alla sua età, al carico di lavoro, a considerazioni sulla sicurezza (Figura A.14). La Tabella A.6 fornisce alcuni esempi.

**Tabella A.6** Esempi di intervalli di campionamento [Fonte: Fitch, 1998]

Macchina	Intervallo in ore
Motore Diesel	150
Trasmissioni, differenziali	300
Sistemi idraulici	200
Turbine industriali a gas	500
Cuscinetti	500
Scatole di ingranaggi	300

**Le tecniche di analisi dell'olio**

Numerose tecniche di monitoraggio dei sistemi tribologici sono state sviluppate prendendo in considerazione la fenomenologia varia e complessa dei processi di deterioramento per usura, per esempio lo studio delle variazioni del coefficiente d'attrito che inducono variazioni di temperatura nelle zone di contatto, delle variazioni dei giochi che inducono vibrazioni d'intensità e frequenza variabili, della variazione di forma e dimensioni di organi meccanici e infine l'analisi delle particelle di usura. Ognuna di queste tecniche permette di tenere sotto controllo uno specifico aspetto del fenomeno tribologico e viene quindi utilizzata a livello di segnalatore di allerta. Per essere veramente efficiente, un programma di analisi dell'olio deve comprendere le tre seguenti categorie di analisi.

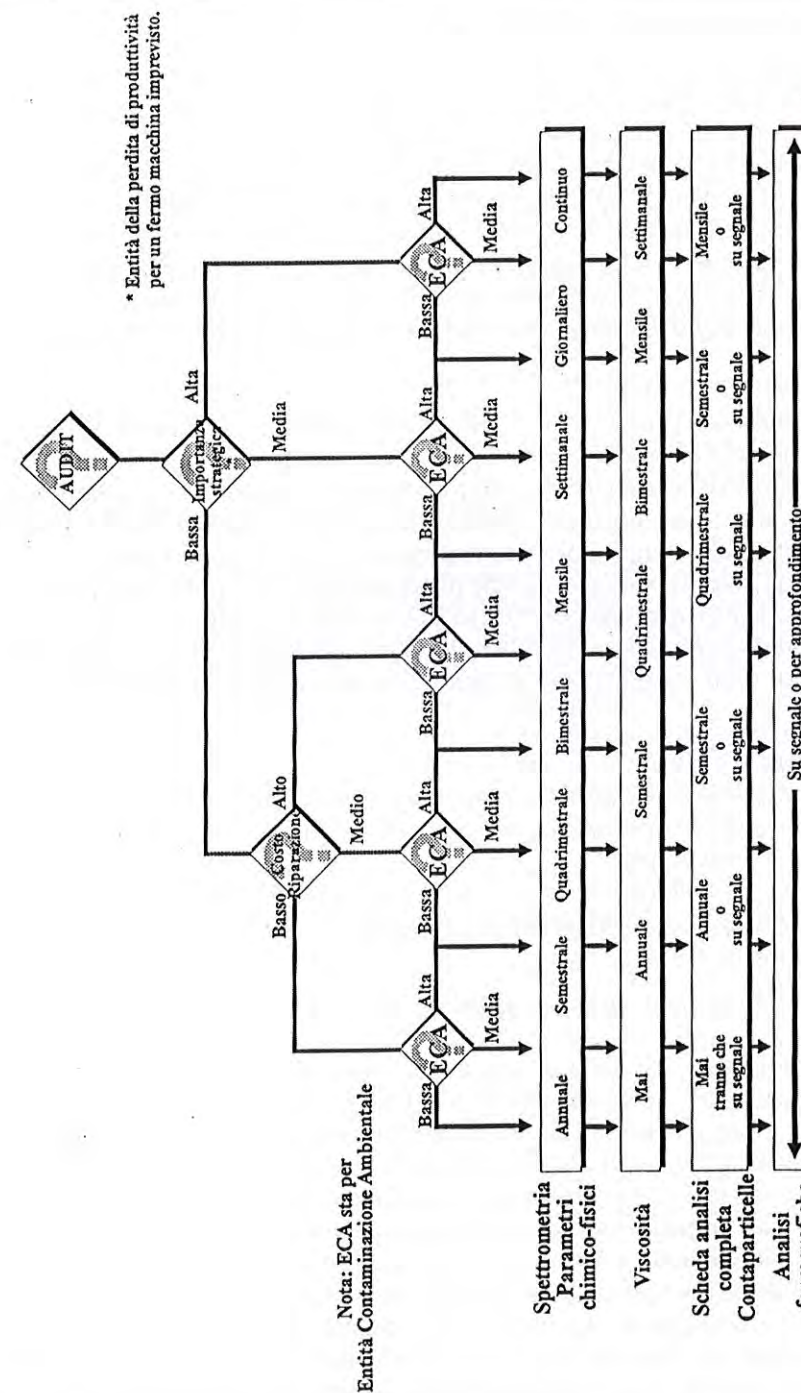
1. *Analisi delle proprietà del fluido.* È un'indagine essenziale per assicurare un buon livello qualitativo del lubrificante, le cui caratteristiche vanno ciclicamente confrontate con quelle di un olio nuovo, con particolare riferimento a viscosità, TAN, TBN, punto di infiammabilità.
2. *Analisi dei contaminanti.* È importante compiere test come il computo delle particelle, l'analisi dell'umidità, il test del glicole (per segnalare eventuali fuoriuscite del fluido refrigerante), il controllo del combustibile presente.
3. *Analisi dei detriti da usura.* È il tipo di analisi più direttamente correlabile con lo stato di salute della macchina.

Nei paragrafi seguenti ci si sofferma sulle tecniche più utilizzate.

**La ferrografia**

La ferrografia, sviluppata fin dagli anni '70 del secolo scorso, ha raggiunto nell'ultimo decennio un'elevata affidabilità d'impiego come risultato di un continuo miglioramento delle apparecchiature, delle metodologie di utilizzo, delle procedure di prelievo e analisi dei campioni e interpretazione dei risultati. Questa tecnica offre le seguenti opportunità:

- raccolta delle particelle di usura disperse nei fluidi lubrificanti e deposito delle stesse in ordine di massa su un substrato trasparente (ferrogramma);
- selezione e separazione delle particelle grandi (maggiori di 10 μm - usura severa) e piccole (circa 5 μm - usura normale) in due gruppi, con localizzazione in zone diverse del substrato;
- determinazione della concentrazione di particelle grandi e piccole mediante un lettore densitometrico;



**Figura A.14** Diagramma delle frequenze di campionamento [Fonte: Mecoil].

- studio delle particelle significative per la definizione delle proprietà morfologiche e della natura dei materiali costituenti.

Il principale vantaggio della ferrografia rispetto alle altre tecniche è rappresentato dalla capacità di depositare e ancorare le particelle di usura sul ferrogramma in ordine di massa. Quest'ultimo permette, infatti, di condurre in modo agevole e preciso le varie analisi, altrimenti difficilmente realizzabili, per la determinazione delle caratteristiche dei frammenti. La ferrografia, inoltre, risulta più sensibile ai primi sintomi di usura nei motori, quando le particelle rimangono nell'olio sotto forma di colloidi stabili; inoltre garantisce l'individuazione di particelle con dimensioni variabili da meno di 1  $\mu\text{m}$  a circa 250  $\mu\text{m}$ , cosa impossibile per la spettrometria.

Ha lo svantaggio di essere lenta e costosa e di richiedere personale specializzato.

#### La spettrometria

La spettrometria è la tecnica più comunemente applicata per l'analisi dei detriti da usura: è in grado di riportare in parti per milione (ppm) le concentrazioni di almeno 20 elementi diversi, sia metallici (ferro, alluminio, cromo, rame, stagno, piombo ecc.) sia additivi (calcio, bario, magnesio, zinco, fosforo, boro e molibdeno). Ciò è chiaramente molto vantaggioso per l'operatore, il quale, per esempio, se l'analisi evidenzia la crescita della percentuale di alluminio e ferro, potrà restringere la fase ispettiva soltanto a quei componenti che sono fatti di questi due metalli.

Numerose altre tecniche, meno utilizzate ma vantaggiose in specifiche condizioni di prova, sono disponibili per effettuare l'analisi degli oli. Tra queste si possono ricordare:

- detector magnetico;
- test di assorbimento dell'olio usato;
- cromatografia a strato sottile;
- analisi al microscopio;
- microscopio a televisione;
- monitoraggio della distribuzione del particolato;
- monitoraggio in linea;

Nel seguito se ne riportano le caratteristiche principali.

**Detector magnetico.** Si tratta di una tecnica complementare alla SOAP (di cui si parlerà nel seguito): quest'ultima mira a individuare particelle metalliche fini in sospensione, come quelle causate dall'usura dei cuscinetti o delle chiavette, mentre questo sistema permette di rilevare scaglie di metallo come quelle tipiche delle rotture per fatica. Il metodo consiste nel catturare queste particelle dal nucleo ferroso utilizzando un magnete; un detector è costituito infatti da una struttura montata sul sistema di lubrificazione e da una sonda magnetica inserita in modo da essere esposta al liquido lubrificante, in una posizione che consenta la massima efficacia (per esempio l'esterno di un gomito in un condotto, in cui la forza centrifuga spinge le particelle sul magnete). Una valvola a chiusura automatica consente di sostituire la sonda usata, senza perdita di olio, a intervalli regolari (generalmente ogni 25 ore-macchina), con una nuova, così da effettuare l'analisi delle scaglie catturate fino a quel momento.

**Test di assorbimento dell'olio usato.** Si deposita una goccia di olio su una carta da filtro, in modo che le particelle inquinanti più grandi rimangono sulla superficie formando una corona circolare di piccolo raggio. Successivamente l'olio filtra attraverso la carta, lasciando su di essa delle ben definite zone circolari, sulle quali giacciono le particelle trasportate dal lubrificante, disposte per dimensioni via via decrescenti. Dopo circa 24 ore, necessarie per il completo assorbimento dell'olio, si può procedere all'analisi fotometrica delle particelle, disponendo la carta su una lastra illuminata dal basso, per far meglio risaltare le caratteristiche del particolato.

**Cromatografia a strato sottile.** In generale la cromatografia si basa sul fatto che i componenti di una miscela possono avere differente grado di affinità per un assorbente: in questa particolare applicazione, si applica, su un supporto inerte, un sottile strato di assorbente selettivo spesso 0.25 mm. La struttura è posta verticalmente in una vaschetta contenente il solvente; questo, salendo per capillarità, trasporta anche i componenti del campione di lubrificante, che viene posto all'inizio del test sul fondo della vaschetta. I vari componenti possono così essere individuati in base al livello raggiunto o mediante un'analisi selettiva del colore.

**Analisi al microscopio.** Quando il particolato è stato estratto dall'olio per evaporazione o assorbimento, lo si può studiare con il microscopio ottico o, se necessario, elettronico, dopo averlo agitato con etere e averne depositato una goccia su una pellicola da analizzare; quest'ultima operazione permette di ottenere una buona dispersione delle particelle. Lo studio si basa su una classificazione numerica che tiene conto delle proprietà caratteristiche delle particelle, così come suggerito da un apposito atlante. Il sistema numerico utilizzato è di tipo binario, dove "0" indica la presenza e "1" l'assenza di ciascuna delle sei caratteristiche riportate in Tabella A.7. Il tutto fornisce un numero di 6 cifre che individua univocamente la particella o un gruppo di esse.

**Tabella A.7** Sistema binario per l'analisi al microscopio

Caratteristiche	Significato della cifra 1 per ciascuna caratteristica
Trasparenza	La particella è opaca
Colore	La particella ha un qualche colore
Anisotropia	La particella è anisotropa
Indice di rifrazione	Si usa per un indice maggiore di 1662
Dimensioni	Una dimensione è un quarto o meno di ciascuna delle altre due
Forma	Si tratta di un ago, cioè con una dimensione almeno pari a quattro volte le altre due

**Microscopio a televisione.** Con questo strumento si riducono i tempi dell'analisi rispetto a un normale microscopio, in quanto fornisce istantanea lettura del numero e della forma delle particelle contenute in un certo settore. L'immagine è proiettata da una telecamera su un monitor e trasmessa a un sensore elettronico che segnala le variazioni intervenute durante la scansione; i dati sono infine elaborati da un computer in grado di operare una suddivisione dei frammenti in base alle loro dimensioni.

**Monitoraggio della distribuzione del particolato.** Si tratta di una tecnica recentemente sviluppata dalla Marina Militare degli Stati Uniti, la quale tiene conto dell'attenuazione luminosa dovuta a una degradazione chimica e termica dell'olio. Quando un raggio luminoso diretto verso il flusso dell'olio in uscita da un contenitore viene interrotto dalla presenza di particelle, una fotocellula invia un segnale a un contatore automatico, il quale, in base all'entità del segnale, è in grado di fornire anche una suddivisione del particolato in base alle dimensioni dei singoli frammenti. Il tutto confluisce in un elaboratore che permette di correlare il trend osservato con l'eventualità di un guasto incipiente.

**Monitoraggio in linea.** Esistono oggi dispositivi portatili che rendono possibile una prima analisi dell'olio, alla ricerca di particelle da usura o altro, così da individuare in prima istanza quei campioni che necessitano di uno studio più accurato in un laboratorio specializzato. Si basano su fenomeni di magnetismo e di permeabilità e la loro limitata sensibilità ne restringe l'utilizzo a sistemi caratterizzati da usura accelerata o da un'alta concentrazione di particelle (per esempio scatola del cambio o organi di trasmissione).

Per quanto riguarda l'analisi spettrometrica degli oli (in inglese, SOAP: *Spectrometric Oil Analysis Procedures*), è possibile individuare 4 fasi fondamentali:

1. prelievo dei campioni di olio;
2. analisi spettrometrica;
3. diagnosi - interpretazione dei dati;
4. convalidazione della diagnosi.

Sulle procedure di campionamento si è già detto in precedenza. L'analisi si basa sulla conoscenza di alcuni principi di fisica atomica riguardanti i fenomeni collegati agli scambi energetici tra atomi. In questo contesto rivestono particolare importanza gli scambi energetici causati da transizioni di elettroni: tali fenomeni, infatti, causano un assorbimento o un'emissione di luce in corrispondenza della regione ultravioletta e visibile dello spettro, cioè per lunghezze d'onda comprese tra 2000 e 8000 angstrom (Å), dove  $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ , in relazione allo specifico elemento chimico. Lo spettrometro è appunto uno strumento progettato per identificare e misurare le radiazioni in quest'intervallo; in Tabella A.8 sono segnalate alcune tipiche lunghezze d'onda.

**Tabella A.8** Lunghezza d'onda per gli elementi più comuni

Elementi chimici	Lunghezza d'onda (Å)
Rame	3247
Ferro	3270
Cromo	3579
Nichel	3415
Piombo	2833
Alluminio	3092
Magnesio	2852
Argento	3281

Il processo di valutazione può essere sia manuale sia computerizzato; si basa sull'utilizzo di apposite guide per i materiali da usura, ma tiene in conto anche una serie notevole di variabili: le condizioni operative dell'apparecchiatura (durante il periodo di rodaggio, per esempio, un'elevata concentrazione di metalli da usura non è motivo di preoccupazione), le caratteristiche ambientali, le ore macchina dall'ultimo cambio d'olio. Se una macchina viene lasciata ferma a lungo, sarà normale riscontrare la presenza di ruggine; si dovrà tenere conto pure dell'età del macchinario e delle variazioni intervenute nelle sollecitazioni cui è sottoposto.

#### Gli strumenti di analisi

##### a) Strumenti di analisi per la ferrografia

**Lo strumento a lettura diretta (DR).** L'esigenza di dover rilevare con tempestività la situazione tribologica di sistemi operativi variamente dislocati, ha creato la necessità di sviluppare uno strumento a lettura diretta denominato DR (*Direct Reading*) che, oltre a essere facilmente collocabile, permette in modo semplice e rapido di determinare i parametri quantitativi in termini di concentrazione e distribuzione dimensionale delle particelle.

Un campione di olio di 1 ml contenente le particelle di usura, prelevato dal circuito di lubrificazione del sistema tribologico che si vuole monitorare, viene opportunamente diluito e fatto fluire attraverso un capillare di vetro calibrato posto tra i poli di un magnete statico. Il magnete costituisce il cuore dell'apparecchiatura ed è dotato di un elevato gradiente di flusso nella direzione in cui fluisce l'olio nel capillare. Le particelle magnetiche grandi ( $> 10 \mu\text{m}$ ) vengono precipitate in corrispondenza della prima fibra ottica, mentre quelle piccole (circa  $5 \mu\text{m}$ ) in corrispondenza della seconda, sistemata 6 mm più a valle. Dopo una fase di lavaggio delle particelle, ottenuta facendo fluire attraverso il capillare un opportuno solvente per asportare ogni traccia residua di olio o sostanze opacizzanti, viene fatto passare un raggio luminoso monocromatico di appropriata sezione la cui intensità viene rilevata dai fotoresistori. La densità di particelle grandi  $DL$  e piccole  $DS$  viene rilevata come attenuazione dei raggi luminosi prodotti dalla percentuale di superficie occupata dalle particelle.

I valori di  $DL$  e  $DS$  forniscono l'indice quantitativo, rappresentativo del volume totale di particelle prodotte:

$$Q = DL + DS$$

La differenza tra  $DL$  e  $DS$  fornisce l'indice di severità rappresentativo dell'intensità dei fenomeni di usura:

$$S = DL - DS$$

Per tenere sotto controllo i vari fenomeni di usura, in particolare i processi di corrosione che producono grandi quantità di particelle molto piccole provocando una riduzione di  $S$ , è stato adottato [Maciga, 1989] l'indice di usura definito da:

$$I_s = Q \times S = (DL + DS) \times (DL - DS) = DL^2 - DS^2$$

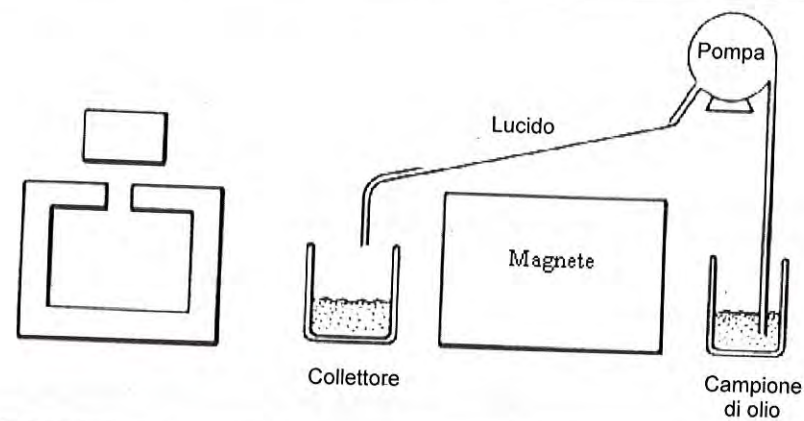


Figura A.15 Strumento analizzatore [Fonte: Collacott, 1977].

Quest'indice rappresenta un parametro particolarmente sensibile nel rilevare modeste variazioni nella densità di particelle grandi e piccole e, quindi, l'insorgere precoce di stati di usura anomali. Il DR è essenzialmente utilizzato come sensore di allerta e per lo sviluppo della *trend analysis* finalizzata al monitoraggio dei sistemi operativi.

*Lo strumento analizzatore.* L'analizzatore è lo strumento di base della ferrografia ed è l'unico in grado di raccogliere efficientemente le particelle di usura e distribuirle in ordine di massa su un substrato trasparente denominato ferrogramma. Lo schema funzionale è presentato in Figura A.15.

Un volume di olio di 3 ml contenente i prodotti di usura viene opportunamente diluito e fatto fluire mediante una pompa peristaltica sul ferrogramma, posto leggermente inclinato tra i poli di un magnete statico ad alto gradiente di flusso (che raggiunge il massimo a un estremo del ferrogramma), analogo a quello utilizzato per il DR. Il substrato, lungo 60 mm, è trattato in modo da resistere senza deteriorarsi sino a una temperatura di oltre 600 °C. Nella zona centrale del ferrogramma viene prodotta, con un'opportuna cera, una barriera a U che agevola il flusso dell'olio verso l'uscita. Un tipico ferrogramma è schematicamente rappresentato in Figura A.16.

I frammenti vengono magneticamente precipitati man mano che il lubrificante fluisce sul ferrogramma. Le particelle con dimensioni maggiori di 10  $\mu\text{m}$  si depositano nella zona di ingresso sul vetrino, mentre quelle più piccole si depositano circa 6 mm più a valle; dopo un ciclo di lavaggio con solventi appropriati, le particelle aderiscono perfettamente al ferrogramma e possono essere agevolmente studiate al microscopio. Il tutto si svolge attraverso operazioni estremamente semplici e codificate e il tempo richiesto è dell'ordine dei dieci minuti, senza contare che, dall'analisi al microscopio, si può risalire alle modalità di usura che hanno generato i frammenti. Tuttavia, per la formulazione di una diagnosi corretta attraverso lo studio del vetrino occorre personale specializzato e un tempo di circa 20 minuti.

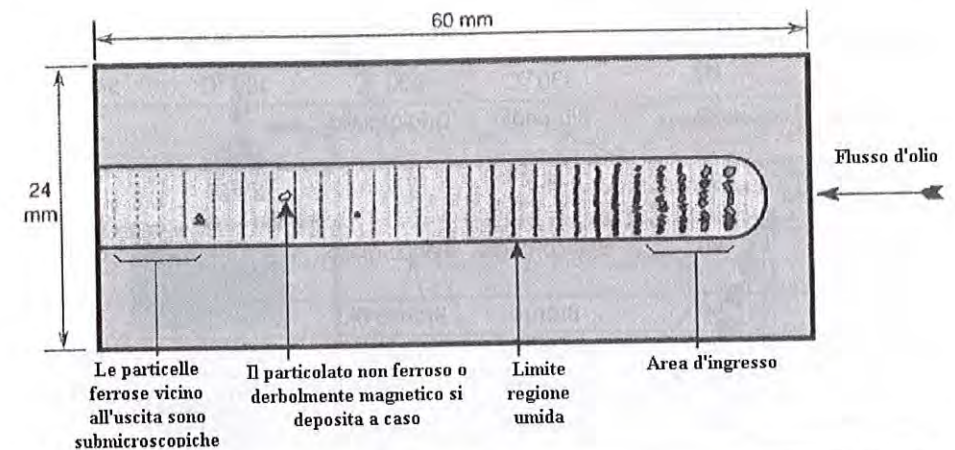


Figura A.16 Esempio di ferrogramma [Fonte: Booser, 1997].

*Il ferroscoPIO.* Il ferroscoPIO viene utilizzato per lo studio della morfologia e della natura delle particelle depositate sui ferrogrammi: si tratta di uno strumento studiato per offrire il maggior supporto possibile all'analisi qualitativa dei frammenti da usura.

È costituito da un microscopio bicromico interconnesso con videocamera e monitor ad alta risoluzione. Il microscopio permette di illuminare il ferrogramma con due raggi luminosi monocromatici di colore diverso contemporaneamente focalizzati sulle particelle di usura. Generalmente il raggio che illumina per riflessione è di colore rosso, invece quello che illumina per trasmissione è di colore verde. Mentre l'analisi quantitativa delle particelle non presenta difficoltà operative poiché il DR procede in modo automatico a una corretta e precisa lettura di *DL* e *DS*, nel caso dell'analisi qualitativa mediante ferroscoPIO, la preparazione dell'operatore incide ancora in modo deciso sulla bontà del risultato. Per agevolare tale compito sono state sviluppate tecniche di osservazione delle particelle con il ferroscoPIO estremamente semplici ma sufficienti a fornire gli elementi necessari a una diagnosi precisa. Sono stati altresì realizzati cataloghi delle particelle particolarmente completi, che permettono di raggruppare le particelle in funzione delle condizioni operative dei sistemi. Analogamente, per la determinazione e trattamento delle particelle che permettono di raggrupparle in classi di materiali.

All'interno di ogni classe di materiali è poi possibile distinguere leghe specifiche utilizzando la tecnica di ossidazione selettiva (TOS): la TOS consiste nel riscaldare i ferrogrammi in atmosfera ambiente a determinate temperature e per tempi controllati. In tali condizioni la superficie delle particelle si ricopre di un microstrato di ossido il cui spessore è funzione della temperatura, del tempo e delle caratteristiche di reattività dei materiali costitutivi dei frammenti. Per diversi spessori dello strato di ossido le particelle assumono una diversa colorazione se osservate col ferroscoPIO. Le principali correlazioni tra temperatura, tempo, colore e materiale sono riportate in Tabella A.9.

Tabella A.9 Caratteristiche TOS per alcuni materiali [Fonte: Maciga, 1989]

Materiale	Tempo riscaldamento (s)	Colore alle varie temperature			
		330 °C	400 °C	480 °C	540 °C
Acciai da cuscinetti	90	Blu-grigio	Grigio-giallo	-	-
Acciai bonificati	90	Blu	Grigio	-	-
Acciai cementati	90	Bianco-grigio	Bianco-giallo	-	-
Ghise	90	Bronzo	Bronzo-blu	-	-
Leghe nichel	90	Invariato	Invariato	Bronzo-blu	Blu
Inox	90	Invariato	Giallo	Bronzo	Bronzo-blu
Leghe piombo	90	Invariato	Invariato	-	-

Il ferrospectro può anche essere dotato di un lettore del ferrogramma (FR) costituito da una cellula fotoelettrica che, utilizzando l'illuminazione del microscopio, permette di determinare la densità delle particelle in un punto qualunque del ferrogramma. Mentre il DR può rilevare tale densità in due zone ben definite del substrato, corrispondenti all'usura severa e all'usura normale, il FR può rilevarla lungo tutto lo spettro dimensionale delle particelle sino a valori inferiori al micron (tipici dei frammenti che precipitano nella zona di uscita del ferrogramma). L'impiego del FR permette di monitorare accuratamente processi di usura atipici come quelli corrosivi presenti nei sistemi operativi lubrificati.

#### b) Strumenti di analisi per la spettrometria

La spettrometria si avvale fondamentalmente di un unico strumento di analisi: lo spettrometro. Tuttavia, i tipi di spettrometro utilizzati sono molteplici, ciascuno con vantaggi e svantaggi.

**Spettrometro a emissione.** Eccitando direttamente ad alto voltaggio (15 000 V) le impurità metalliche presenti nel campione di olio, queste emettono radiazioni con lunghezza d'onda caratteristica del metallo, che possono essere analizzate mediante lo spettrometro. Si tratta di uno strumento formato da una fessura, cui fanno seguito un prisma, necessario per separare la radiazione nelle varie lunghezze d'onda che la compongono dopo che la stessa ha attraversato la fessura, e un sistema fotoelettrico che individua e misura le varie radiazioni (Figura A.17).

Esistono due tipologie di spettrometro a emissione:

1. RDE (*Rotating Disk Electrode*);
2. ICP (*Inductively Coupled Plasma*).

Nel primo tipo, un elettrodo a disco rotante trascina in continua il campione d'olio nella zona compresa tra il disco stesso e l'altro elettrodo fisso, costituito da una barretta di grafite; si fa poi scoccare l'arco elettrico in modo che in ciascun atomo del

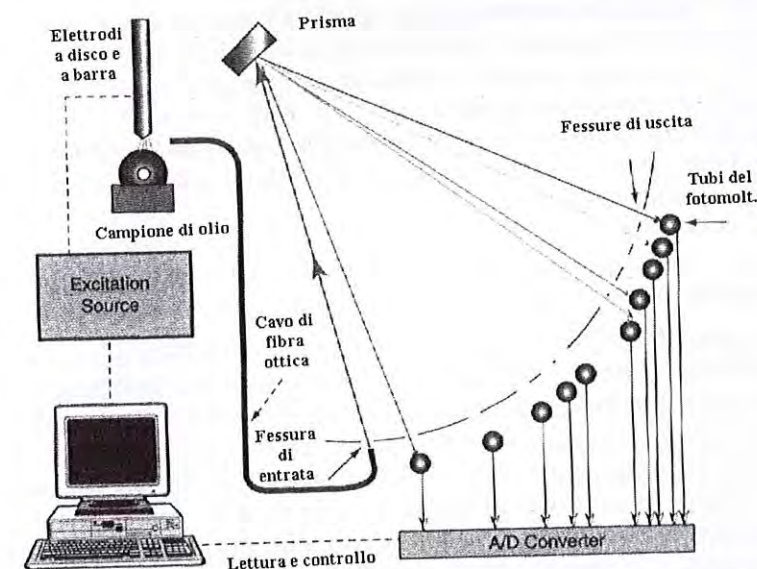


Figura A.17 Schema di uno spettrometro a emissione [Fonte: Booser, 1997].

campione gli elettroni vengono inizialmente spostati su orbite instabili più esterne, per poi ritornare sull'orbita di competenza emettendo energia radiante.

Il principale svantaggio della RDE, come si vede in Tabella A.10, consiste nella limitata precisione dovuta alle differenze esistenti tra i segnali di ritorno in caso di utilizzo di diversi derivati del petrolio, per un fenomeno noto come "effetto matrice".

Nel secondo tipo di spettrometro si utilizza invece un plasma creato senza l'ausilio di elettrodi, bensì per mezzo di un flusso di gas inerte (argon) che funge da avvolgimento secondario di un trasformatore, raggiungendo temperature altissime (8 000-10 000 °C) e ionizzandosi. Il campione di olio viene aspirato dentro il plasma così da dar luogo alla dissociazione degli atomi e al loro eccitamento.

Tabella A.10 Vantaggi e svantaggi delle tecniche RDE e ICP

Tecnica	Vantaggi	Svantaggi
RDE	Semplicità d'uso	Effetto matrice
	Senza preparazione del campione	Solo con campioni di olio
	Robustezza	Inefficiente per particelle > 10 μm
ICP	Niente liquido o gas refrigerante	
	Poca manutenzione	
	Performance	Richiede preparazione del campione
	Limitato effetto matrice	Richiede personale specializzato
	Flessibilità	Inefficiente per particelle > 5 μm
	Automazione	Necessita di gas (argon)

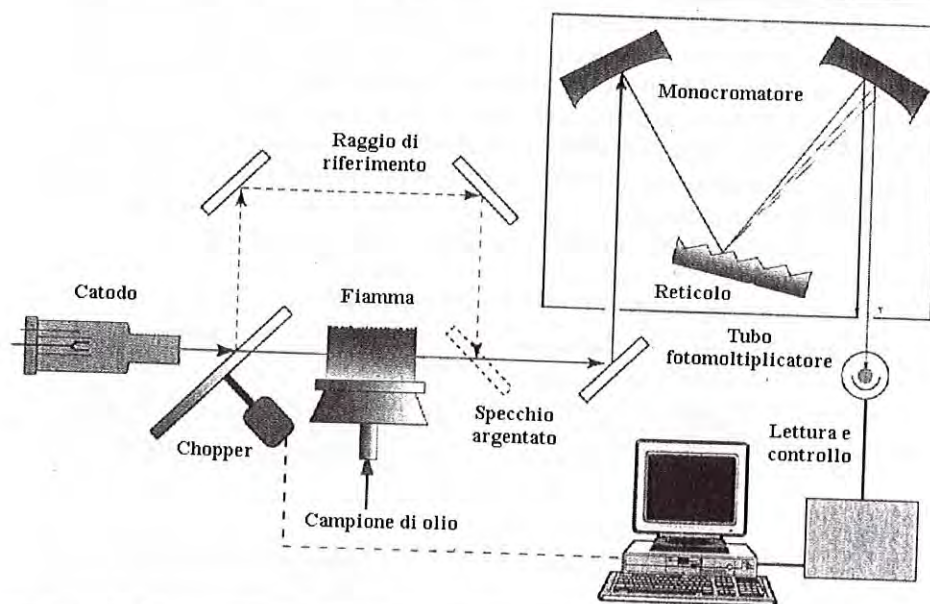
In entrambi i casi si utilizza una fibra ottica per canalizzare e focalizzare l'energia radiante fino a un reticolo concavo che suddivide il fascio nelle varie linee di spettro associate agli elementi presenti; successivamente, i canali fotomoltiplicatori traducono l'energia emessa in un segnale elettrico, la cui intensità fornisce una misura della concentrazione degli elementi presenti.

Grazie poi alla presenza di fotosensori separati per ciascun elemento e di una macchina telescrivente in uscita, la tecnica in questione garantisce l'immediata disponibilità del risultato dell'analisi.

*Spettrometro ad assorbimento atomico (AAS).* Per effettuare questo tipo di analisi sono necessari cinque elementi:

1. una sorgente di energia che emetta luce caratteristica dell'elemento di cui si vuole determinare la presenza (in pratica un catodo a elettroluminescenza);
2. una sorgente di energia per trasformare in vapore atomico gli elementi metallici presenti (generalmente una fiamma al protossido di azoto-acetilene);
3. un selettore di lunghezza d'onda, per selezionare quella utile per la luce di misura (generalmente è un prisma con un sistema di lenti e fessure);
4. uno strumento che converta l'energia luminosa in segnale elettrico (un tubo fotomoltiplicatore con annesso circuito amplificatore);
5. un dispositivo di lettura che misuri quantitativamente l'intensità del segnale elettrico, per esempio una stampante.

La disposizione di questi strumenti è mostrata schematicamente in Figura A.18.



**Figura A.18** Schema di uno spettrometro ad assorbimento atomico [Fonte: Booser, 1997].

La fiamma vaporizza il campione di olio e porta gli atomi a un più alto livello energetico, il che li rende idonei ad assorbire la luce emessa dal catodo: quest'ultimo emette un fascio luminoso con la lunghezza d'onda specifica dell'elemento da analizzare, in base alla quale viene regolato il monocromatore che riceve contemporaneamente, grazie al chopper, anche il segnale di riferimento proveniente dal catodo stesso. In questo modo la porzione di energia luminosa assorbita può essere posta in relazione, mediante algoritmi implementati sul computer, con la concentrazione dell'elemento presente nell'olio.

Vantaggi e svantaggi di questa tecnica sono riassunti in Tabella A.11.

**Tabella A.11** Vantaggi e svantaggi della tecnica AAS

Vantaggi	Svantaggi
Semplice da usare	Lenta, un elemento per volta
Approccio analitico	Necessita preparazione campione
Virtualmente priva di interferenze	Inefficiente per particelle > 5 $\mu$ m
Basso prezzo di acquisto	Richiede una sorgente luminosa

Il metodo a emissione rimane il più utilizzato, nonostante l'elevato investimento che richiede, grazie alla elevata velocità di prova (40 campioni/ora per 20 elementi diversi), mentre la spettrometria ad assorbimento ha il vantaggio della maggiore riproducibilità per basse concentrazioni di particelle.

*Spettrometro a raggi X (XRF).* Bombardando il campione di olio con i raggi X, si fa in modo che gli atomi delle particelle di usura, dei contaminanti e degli additivi espellano degli elettroni, rimanendo allo stato di ioni (Figura A.19). A questo punto gli elettroni più esterni, caratterizzati da legami deboli, vanno a occupare le vacanze lasciate dagli elettroni espulsi, perdendo energia sotto forma di fluorescenza, cioè emettendo un secondo fascio di raggi X il cui spettro è tipico dell'elemento e la cui intensità è proporzionale alla concentrazione dell'elemento stesso. Questa tecnica ha una capacità di detezione di 0-550 p.p.m., un'accuratezza di  $\pm 6$  p.p.m. e un range di temperatura utile da quella ambiente a 400 °F. I principali vantaggi e svantaggi sono riportati in Tabella A.12.

**Tabella A.12** Vantaggi e svantaggi della tecnica XRF

Vantaggi	Svantaggi
Analisi di più elementi	Scarsa sensibilità
Niente preparazione del campione	Solo per numero atomico > 10
Non distruttiva	Costi elevati
Analisi di particelle grandi	

*Fourier Transform-Infrared Spectroscopy (FT-IR).* Per ultima, questo tipo di analisi spettrometrica non è indirizzata alla ricerca di particelle da usura bensì alla misurazione delle seguenti caratteristiche dell'olio, utili a stabilirne l'efficienza e la vita residua:

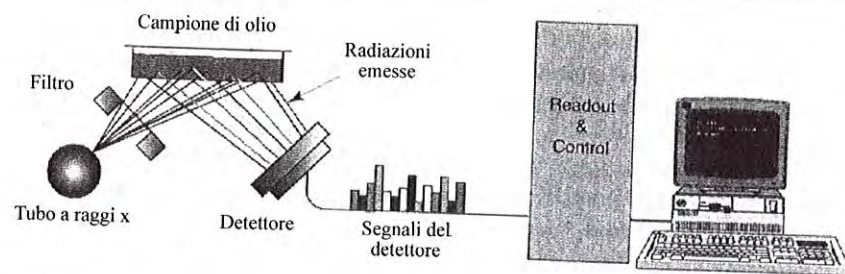


Figura A.19 Schema dello spettrometro a raggi X [Fonte: Booser, 1997].

- livello di ossidazione;
- livello di nitrizzazione;
- residui di combustione;
- livello di solfato;
- presenza di acqua;
- contaminazione da combustibile;
- glicole;
- additivi.

Questo spettrometro misura l'energia nella regione infrarosso dello spettro ed è costituito da tre componenti (Figura A.20): una sorgente, un interferometro di Michelson e un rivelatore.

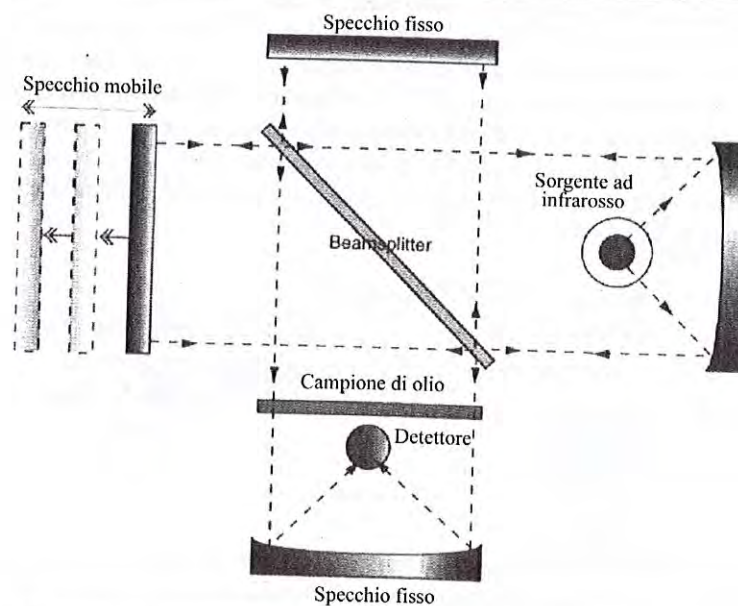


Figura A.20 Schema di uno spettrometro FT-IR [Fonte: Booser, 1997].

L'interferometro, a sua volta, è formato da un separatore di fascio (*beamsplitter*), uno specchio fisso e uno mobile. Una luce infrarossa a larga banda proveniente dalla sorgente viene divisa dal separatore in due fasci di uguale energia che vengono riflessi uno dallo specchio fisso e l'altro da quello mobile, tornando a ricombinarsi sul separatore.

Ha luogo, così, un'interferenza costruttiva o distruttiva, a secondo della posizione relativa fra i due specchi; in questo modo il fascio infrarosso può poi essere indirizzato verso il campione da esaminare il quale assorbirà le lunghezze d'onda corrispondenti agli elementi chimici in esso contenuti. L'intensità della parte del raggio infrarosso che riesce ad attraversare il campione viene rilevata dal rivelatore e inviata al computer, il quale utilizza algoritmi basati sulla trasformata di Fourier per convertire valori tempo/intensità in frequenza/intensità da cui il software è poi in grado di ricavare le informazioni richieste (Figura A.21).

La spettrometria ha però tre importanti limitazioni:

1. la strumentazione è complessa e costosa; il suo uso è quindi generalmente limitato ai laboratori specializzati, con gli inevitabili ritardi che ciò comporta;
2. questa tecnica misura solo particelle più piccole di 6-7 micron, per l'impossibilità di atomizzare particelle più grandi: questo è un difetto grave, se si considera che frammenti di dimensioni maggiori sono sintomo di un'usura severa;
3. la spettrometria non distingue tra particelle metalliche, ossidi e sali: in presenza di ruggine ciò può portare a errori di valutazione.

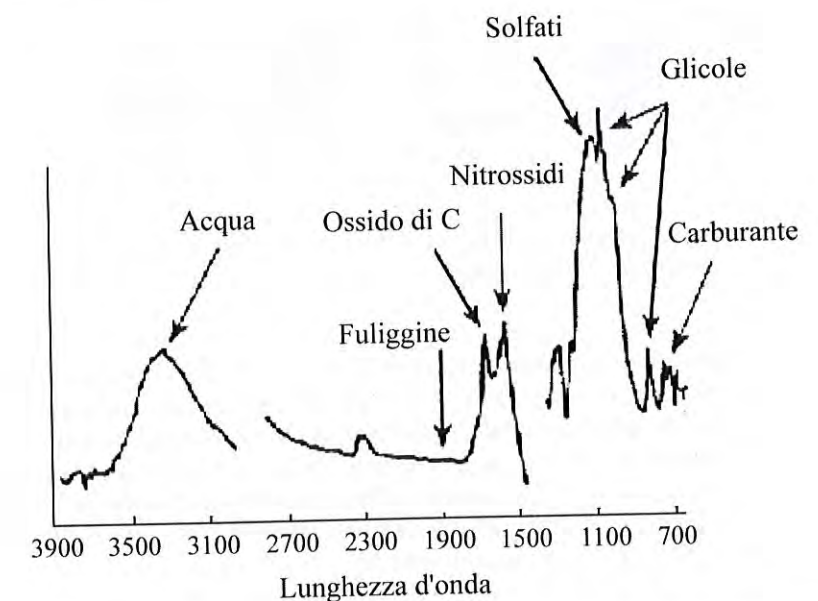


Figura A.21 A ciascun picco sul diagramma corrisponde un elemento la cui presenza può così essere evidenziata [Fonte: MECOIL].



### Il monitoraggio delle proprietà del lubrificante

La seconda parte di un programma di analisi degli oli, come detto, mira a valutare il deterioramento delle proprietà chimico-fisiche del lubrificante. Molte di queste caratteristiche possono essere misurate attraverso lo spettrometro FT-IR già descritto; le altre, con i relativi strumenti per valutarle, sono descritte nel seguito (Figura A.22).

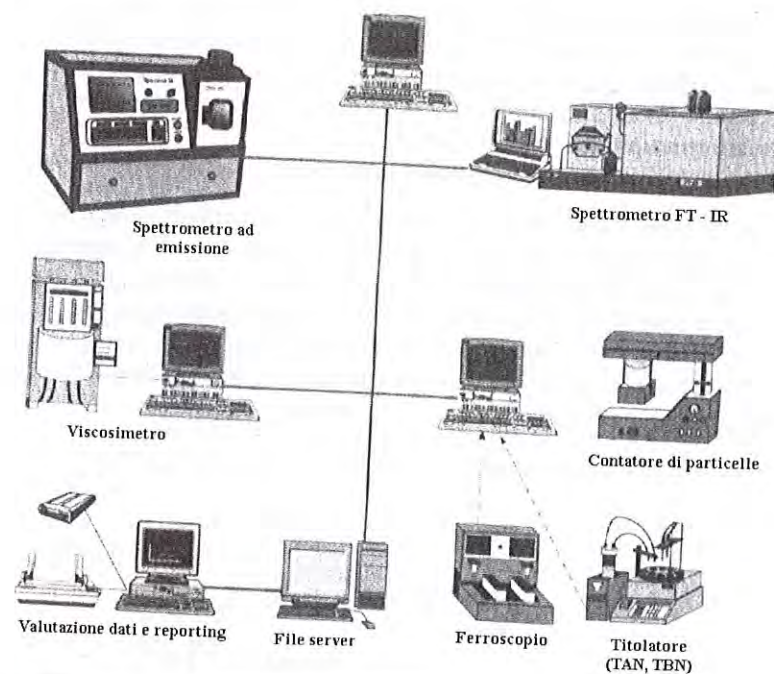


Figura A.22 Strumentazione completa di un laboratorio attrezzato per l'analisi dell'olio usato [Fonte: Booser, 1997].

#### Viscosità

Il test più utilizzato è quello individuato dalla sigla ASTM D 445 e consiste nel collegare un flaconcino, contenente il campione da studiare, con un tubo capillare precedentemente pulito, alla temperatura di 40 °C. Si fa fluire l'olio all'interno del tubo e si misura il tempo necessario per attraversare un tratto di riferimento; la centralina di elaborazione fornisce in uscita il valore della viscosità in centistoke (cSt), funzione del tempo misurato e del fattore di calibrazione del tubo. L'insieme delle apparecchiature descritte costituisce un viscosimetro.

#### TAN-TBN

Il test per il calcolo del TAN è contrassegnato dalla sigla ASTM D 974 e semplicemente implica una valutazione del colore del campione, dopo che vi si è immessa una soluzione di idrossido di potassio (KOH), prevedendo un'accuratezza del 15%.

Discorso analogo per il calcolo del TBN con il test ASTM D 2896; il tutto per mezzo di strumenti detti "titolatori" capaci di procedure quasi totalmente automatizzate.

#### Insolubili

Questo tipo di misurazione può avvenire mediante deposito di una goccia d'olio su un'apposita carta filtrante con successiva valutazione visiva della macchia lasciata: si tratta evidentemente di un metodo che lascia molto all'interpretazione del singolo. Un test codificato è l'ASTM D 893, in cui il campione di olio viene mescolato con pentano e poi centrifugato; il precipitato viene poi asciugato e pesato per misurare il contenuto di insolubili, in base all'aumento percentuale del peso della membrana utilizzata per il filtraggio.

### A.3 I sistemi informatici a supporto del CM

I computer giocano un ruolo molto importante per l'attività di *condition monitoring*: essi garantiscono una maggiore efficienza nella raccolta dei risultati delle misure, che si traduce in un guadagno di tempo e, quindi, nella possibilità per l'operatore di effettuare più test e su più macchine. La struttura di un sistema computerizzato di monitoraggio, che comprenda analisi di tipo diverso, può essere schematizzata come in Figura 21.23.

Esistono sul mercato diversi modelli di questi sistemi, capaci di soddisfare le più diverse esigenze: si va dai più semplici, in grado di effettuare la registrazione permanente e le prime analisi dei dati forniti dall'utente, fino a quelli più complessi, studiati per compiere indagini più approfondite con l'ausilio di tecniche flessibili di immagazzinamento delle informazioni. Si tratta, in questo secondo caso, di sofisticati sistemi di monitoraggio *multi-channel* che effettuano analisi di spettro, delle prestazioni (consumo di elettricità, efficienza degli scambi termici ecc.), analisi esperte dei dati per identificare le specifiche condizioni di guasto e valutarne la severità.

Ultimamente si è fatto notare che molti di questi sistemi on-line, invece di utilizzare le informazioni di processo correnti per valutare le condizioni della macchina, si limitano ad accettare i dati che vengono forniti da un PLC (*Programmable Logic Controller*) quali indicano che la macchina è in condizioni operative di regime. Se, però, il sistema meccanico viene sollecitato a regime (cioè a pieno carico) solo occasionalmente le analisi di trend basate su rilevamenti periodici forniscono, in presenza di un vasto range di stati operativi, risultati fuorvianti. Per questo motivo sono stati sviluppati sistemi esperti integrati con sistemi di elaborazioni dati, in grado di effettuare una valutazione accurata della salute della macchina, riuscendo a pronosticare la vita residua anche sotto condizioni cangianti di funzionamento.

Un esempio del genere è fornito dal sistema per la CBM sviluppato dalla Honeywell Corporation in collaborazione con la Predict/DLI per la Marina Militare degli Stati Uniti e denominato MPROS (*Machinery Prognostics/Diagnostics System*). Il sistema in questione fa uso di MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*), di sensori convenzionali posti sul macchinario, di unità intelligenti per l'elaborazione dei segnali chiamate *Data Concentrators* (DCs) e di un sottosistema centrale chiamato PDME (*Prognostics, Diagnostics, Monitoring Engine*). Questo MPROS raccoglie i dati in continua dai sensori delle vibrazioni e da quelli per la temperatura, la pressio-

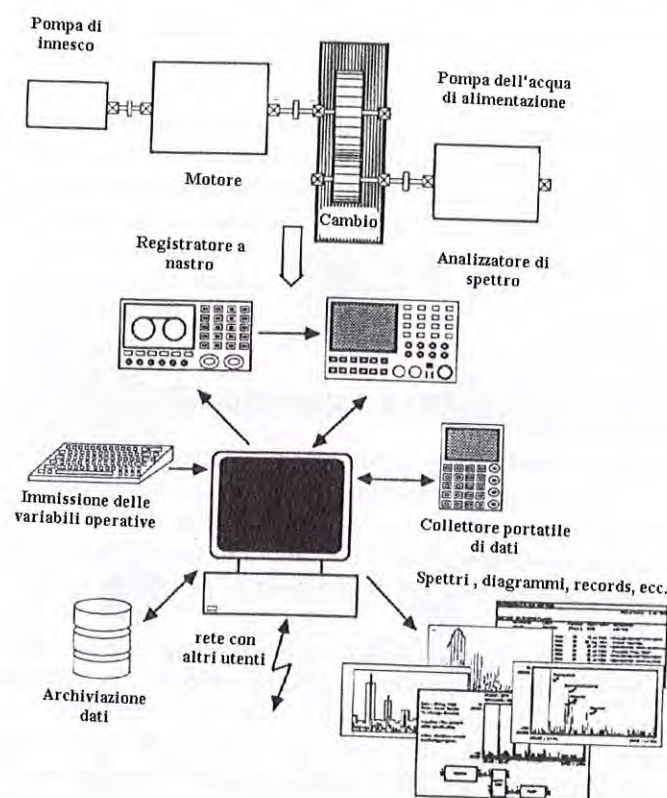


Figura A.23 Struttura di un sistema computerizzato di monitoraggio [Fonte: Tranter, 1990].

ne, il voltaggio ecc.; il flusso di informazioni che ne consegue viene integrato una prima volta dai DCs, per permettere una fusione dei dati (*data fusion*) e poi dal PDME. A questo punto i risultati dei diversi algoritmi di diagnostica e di prognostica confluiscono per dar luogo all'analisi più completa possibile.

Una necessità comune a tutti i pacchetti software più potenti è quella di configurare correttamente il lay-out del database, cioè di quella porzione di memoria del sistema informatico destinata all'immagazzinamento e alla gestione dei risultati forniti dalle misurazioni effettuate: occorre, in sostanza, progettare il database in modo da poter amministrare tutte le macchine che si è deciso di monitorare.

È in questa fase, inoltre, che si devono dare al sistema le indicazioni utili per stabilire ogni quanto devono essere compiute le misurazioni, quali sono le soglie di allarme, come deve essere settata la strumentazione prima di ogni misura, fornendo anche i dettagli sulla natura della macchina (parametri dei cuscinetti, caratteristiche degli ingranaggi) in modo da individuare, attraverso lo studio delle frequenze di guasto, qual è il componente che necessita di riparazioni.

Una volta fatto questo, il sistema praticamente fa tutto da solo, rendendo necessari solo rari interventi in futuro. Nell'analisi che viene svolta, è importante rendere

possibile anche il confronto sia tra valori di trend relativi alla stessa macchina, sia tra macchine differenti, sia, infine, tra dati di diversa natura (per esempio vibrazioni e contaminazione dell'olio). Il confronto potrà essere di tipo grafico o statistico, purché metta in luce le correlazioni esistenti; in questo modo l'operatore sarà chiamato a effettuare un'analisi estensiva soltanto nel caso in cui si sia superata la soglia di attenzione.

### A.3.1 Gli sviluppi futuri nel condition monitoring

I progressi compiuti nel campo dell'*Information Technology* (IT)<sup>2</sup> permettono, allo stato attuale, un'acquisizione dei dati "in tempo reale" e un'analisi degli stessi, contemporanea al processo produttivo, consentendo così l'implementazione di tecniche di *condition monitoring* finora solo teoriche. Allo stesso tempo tale tecnologia rende possibile la progettazione di sistemi di produzione avanzati, che fanno uso di "macchine intelligenti" per garantire un maggior livello d'automazione. L'IT, cioè, "rende possibile individuare l'informazione, decifrarla, trasmetterla, riceverla, immagazzinarla, interpretarla e promuovere conseguentemente azioni appropriate sul sistema" [Davies, 1998]. In teoria, tutte queste attività dovrebbero essere svolte automaticamente, sulla base della conoscenza delle condizioni correnti in tempo reale: *Real Time Actual Condition Knowledge* (RTAK). Ciò implica l'utilizzo di processi informatici in tempo reale, di una rapida interpretazione dei dati e di un automatico processo logico-decisionale.

In questo scenario la manutenzione deve evolvere in un'organizzazione efficiente, che utilizza le capacità dell'information technology per metterle al servizio di sistemi industriali molto complessi e altamente tecnologici. Oggi lo stato dell'arte è tale che è possibile implementare questi concetti su macchine utensili a controllo numerico (CNC, *Computer Numerical Control*) e su sistemi flessibili di produzione (FMS, *Flexible Manufacturing System*), tramite metodologie di controllo adattivo, con un conseguente aumento del tasso di utilizzo dei macchinari, della qualità dei componenti e della vita del sistema, e una riduzione del costo del lavoro e dello spazio richiesto.

Il *controllo adattivo* (AC) è "una tecnica che permette, a un sistema equipaggiato di sensori, di individuare un cambiamento nell'ambiente e, se tale variazione è sfavorevole, di intraprendere automaticamente delle azioni correttive, in modo da ottimizzare il sistema sotto controllo secondo un dato criterio" [Williams, Davies, Drake, 1994]. In base a questa definizione è possibile classificare i sistemi di controllo adattivo in due gruppi:

1. *Technological Adaptive Control* (TAC) che a sua volta contiene due distinte tipologie di sistema:
  - *Adaptive Control of Constraints* (ACC), una tecnica che mira a ottenere lo svolgimento in sicurezza delle operazioni di sistema, nel rispetto di certi vincoli fisici correlati alla macchina ed è l'unica delle tre che ha già avuto qualche consistente applicazione commerciale;

<sup>2</sup> Con una semplice definizione si può affermare che la IT è "il modo con cui noi raccogliamo, registriamo, elaboriamo e usiamo l'informazione" [Davies, 1998].

- *Adaptive Control of Optimization* (ACO), una tecnica che mira a ottimizzare l'economicità dei criteri di produzione;
- 2. *Geometrical Adaptive Control* (GAC) che, orientata al prodotto, ha lo scopo di perfezionare la conformità dei componenti alle specifiche, tramite continui aggiustamenti della posizione degli utensili in funzione, per esempio, della loro usura progressiva.

I recenti sviluppi nella tecnologia dei circuiti integrati e in optoelettronica sono arrivati al punto da rendere possibile l'assimilazione delle funzioni di più sensori, in una singola unità. Inoltre, si possono combinare le informazioni provenienti da diverse sorgenti di dati, per dar luogo a quello che si potrebbe chiamare "un sensore intelligente". Questi sensori possiedono anche la capacità di valutare, in un certo qual modo, i dati in ingresso, così da poter, per esempio, amplificare il segnale oltre il rumore di fondo, filtrarlo o combinarlo con altri segnali provenienti da fonti diverse. Attualmente si è già in grado di costruire prototipi con queste caratteristiche e, grazie all'uso della microelettronica, è anche possibile incorporarli in un sistema integrato di sensori. Le successive ricerche in tal senso sono mirate a ottenere sensori veloci, accurati e con capacità di autodiagnosi, dal design semplice se possibile e preferibilmente affidabili, non intrusivi e tali da lasciare inalterata la complessità del sistema.

I metodi di misurazione optoelettronica sembrano rispettare queste specifiche abbastanza bene, e potrebbero trovare presto delle interessanti applicazioni industriali. L'uso di questo tipo di sensori in un sistema automatico dovrebbe consentire di:

- ridurre la frequenza di prodotti difettosi;
- eliminare la possibilità di un processo casuale di errore dovuto a incontrollabili parametri ambientali;
- fornire informazioni riguardanti il prodotto e il processo utili per un'attività di previsione dei guasti, assicurazione di qualità, controllo e diagnostica.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] J.H. Williams, A. Davies, P.R. Drake, *Condition - based Maintenance and Machine Diagnostic*, Chapman & Hall, Londra 1994.
- [2] A. Baldin, L. Furlanetto, *La Manutenzione secondo condizione*, Franco Angeli, Milano, 1979.
- [3] A. Baldin, L. Furlanetto, A. Roversi, F. Turco, *Manuale della Manutenzione degli Impianti Industriali*, Franco Angeli, Milano, 1986.
- [4] A. Davies, *Handbook of Condition Monitoring*, Chapman & Hall, Londra, 1998.
- [5] A. Maciga, *Ferrography: predictive maintenance theory and practice*, Proceedings of the International Conference on Monitoring, Surveillance and Predictive Maintenance of plants and structure, pp. 738-751, Giardini Naxos; 16-17-18 ottobre 1989.
- [6] D. Troyer, *Lubricant Condition Monitoring - The proactive strategy of the future*, 8<sup>th</sup> Annual Handbook of CMMS & PdM, 1996.
- [7] D. Babbo, L. Fedele, M. Franci, *La Manutenzione: dalla manutenzione su guasto alla manutenzione migliorativa*, Ed. Esagrafica, Roma, 2001.

## CASI DI STUDIO

---



# Ottimizzazione della lista delle parti di ricambio di una turbina a gas mediante la metodologia ACM (Availability Centered Maintenance)

Giuseppe Fabio Ceschini - *RAMS Engineering Manager*  
 Fiorenzo Giuntini - *Direttore Technical Services*

## Introduzione

Negli ultimi venti anni il mondo della manutenzione è stato caratterizzato da una continua evoluzione, e gli operatori del settore stanno continuamente rispondendo a nuove esigenze. In particolare maggiore attenzione è posta sugli effetti dei guasti dei sistemi su Ambiente e Sicurezza e c'è una crescente attenzione a ottenere valori più elevati di Affidabilità e Disponibilità dagli impianti industriali.

Nel mondo Oil&Gas molti costruttori come il GE ENERGY Oil&Gas forniscono ai loro clienti sia le macchine sia il servizio di manutenzione e molte grandi società del settore tendono a formulare dei contratti specifici detti di "Lungo Termine" (LTSA, dai 6 ai 10 anni rinnovabili). In tali contratti vengono concordate soglie minime garantite di disponibilità di impianto, contenente uno o più turbogruppi e altre apparecchiature connesse, sulle quali si definiscono formule di Bonus/Malus commerciale.

Essendo i fornitori della manutenzione i primi a essere interessati a contenere i costi della stessa, essi sono motivati a contenerli senza però far calare la disponibilità dell'impianto a causa di inaffidabilità, guadagnando così i bonus previsti dal contratto e assicurando al cliente la massima produttività del suo impianto.

La corretta definizione delle parti di ricambio disponibili presso gli impianti è cruciale per il raggiungimento degli obiettivi congiunti di massimizzazione della disponibilità e contemporanea minimizzazione delle scorte a magazzino. Con la metodologia ACM, sviluppata per la prima volta in GE ENERGY Oil&Gas per la gestio-

ne delle parti di ricambio, l'ingegneria della manutenzione ha un nuovo tool per rispondere a queste esigenze (Figura 1).

## Acronimi

ACM	Availability Centred Maintenance
AI	Availability Importance
GT	Gas Turbine
LTSA	Long Term Service Agreement
MDT	Mean Down Time
MTBM	Mean Time Between Maintenance
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTFF	Mean Time To First Failure
MTTR	Mean Time To Repair/Restore
P&ID	Process & Instrumentation Diagram
RBD	Reliability Block Diagram
RCM	Reliability Centred Maintenance
RI	Reliability Importance

## Comparazione tra RCM e ACM

Le tecniche classiche dell'RCM definiscono una ben nota serie di passi da seguire nella definizione della giusta strategia manutentiva, delle attività di dettaglio e della frequenza con la quale espletarle, coerentemente con lo scenario dei modi di guasto dei componenti più critici e dei loro effetti sul sistema globale. Nel seguire tale metodologia tutti gli impatti su sicurezza, ambiente e disponibilità devono essere considerati. L'RCM è stato ampiamente usato per quasi 30 anni nel settore aeronautico per il quale fu inizialmente sviluppato; le relative tecniche si sono evolute in una serie di standard. D'altro canto però, l'RCM tradizionale non è adatto a trattare tutti gli aspetti della manutenzione che impattano sulla disponibilità in quanto il focus è più indirizzato sulla affidabilità.

In generale, la disponibilità di un sistema è una funzione non lineare della affidabilità (in termini di vita dei componenti e dei loro legami funzionali e del MTBM), della manutenibilità (in termini di MTTR, ispezionabilità e durata delle attività) e della logistica (attrezzature e magazzino di impianto). Questi tre aspetti non possono e non devono essere considerati separatamente. Con l'RCM classico, invece, essi si affrontano semiquantitativamente e indipendentemente l'uno dall'altro.

È necessario un nuovo strumento per soddisfare le esigenze dell'utilizzatore dell'impianto e del fornitore dell'ingegneria di manutenzione. Questo nuovo strumento si chiama ACM e permette di quantificare l'impatto di Affidabilità, Manutenibilità e Logistica sulla Disponibilità totale del sistema.

L'ACM, basato su tecniche RBD unite a simulazione Monte Carlo, è già stato descritto nell'articolo 'Reliability Centred Maintenance (RCM) Techniques for heavy Duty Gas Turbines in Oil & Gas Applications'.

Il processo ACM può essere sintetizzato attraverso la seguente figura:

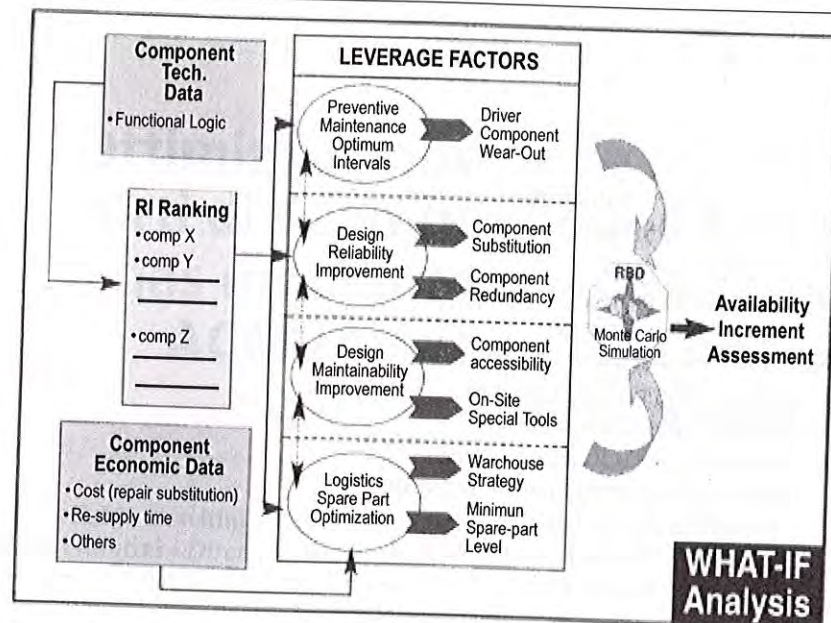


Figura 1 Processo ACM.

Come mostrato nella precedente figura questo processo produce quattro risultati principali:

- Intervalli ottimali di manutenzione preventiva.
- Miglioramenti del design basati su affidabilità.
- Miglioramenti del design basati su manutenibilità.
- Ottimizzazioni della logistica e dei ricambi.

Nei paragrafi seguenti viene presentata un'applicazione a un caso reale di ottimizzazione delle parti di ricambio: *il set di magazzino per una turbina a gas GE Oil & Gas Nuovo Pignone, modello GE10B/2*.

## Ottimizzazione della lista ricambi

Le diverse fasi di questo processo sono:

- Analisi dei P&I e delle specifiche
- Analisi delle condizioni operative della GT
- Raccolta dati e Analisi di Affidabilità
- Definizione del Programma di Maintainability
- RBD del flangia-flangia e dei sistemi ausiliari
- Simulazione Monte Carlo e classificazione in base all'indice Availability Importance
- Definizione della lista ottimale Parti di ricambio in accordo al livello richiesto di GT availability.

## Analisi dei P&I e delle specifiche

Questa fase permette di comprendere il sistema trattato in termini di:

- Tipo e modello di valvole, strumentazione, pompe, motori e tutti gli altri componenti del sistema
- Relazioni logico-funzionali tra i componenti, per esempio, per stabilire se ci sono legami di serie o parallelo dal punto di vista affidabilistico
- Logica di controllo e protezione (loops)

In questa fase la turbina GE10B/2 è stata divisa nei seguenti 11 sottosistemi:

- Lube Oil System
- Lube Oil Cooler and Gas Heater
- Vapour Oil Separator
- Hydraulic Oil System
- Fuel Gas System
- Combustion System
- Starting Means
- Cooling and Sealing Air System
- Control and Protection Devices System
- Air Intake System
- Flange – Flange (Gas Turbine core subsystems)

## Analisi delle condizioni operative della turbina a gas

Per ottenere risultati realistici dalla simulazione è essenziale non trascurare le reali condizioni operative e ambientali dell'impianto. Esse devono essere definite in modo da interpretare correttamente i dati di guasto o di riparazione.

Più precisamente, è molto importante pesare i dati di Reliability o di Maintainability tenendo conto delle condizioni al contorno: per esempio, i tassi di guasto relativi a un dato componente sono notevolmente diversi se lo stesso è installato on-shore od off-shore.

Altro aspetto essenziale è il profilo operativo della GT nello specifico impianto: la frequenza del numero di avviamenti o il numero programmato di ore in stand-by hanno impatto sul piano manutentivo e di conseguenza sulla disponibilità globale, a causa dei differenti livelli di danno accumulato sui componenti critici.

Anche il sito geografico dove è installata la GT riveste di importanza in quanto ha influenza sui tempi di riapprovvigionamento lordi delle parti di ricambio laddove esse non siano non disponibili presso il sito stesso.

## Raccolta dati ed analisi di affidabilità

Le simulazioni sono basate sulla tecnica RBD accoppiata al metodo di Monte Carlo. Il software utilizzato è stato Reliasoft BlockSim, versione 1.5.

Nella Figura 2 è mostrato un esempio di RBD con collegamenti serie e parallelo molto semplici.

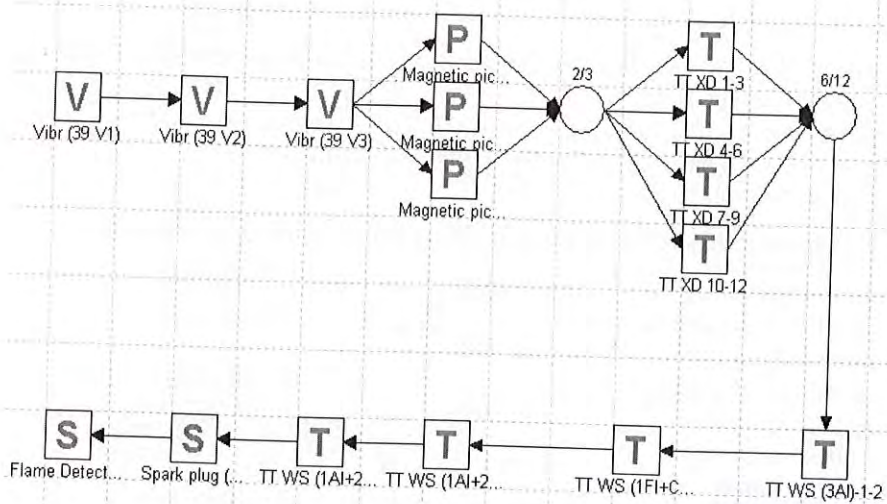


Figura 2 Un esempio di RBD (GT).

Per ogni blocco devono essere correttamente inserite le seguenti informazioni:

- La Distribuzione di Guasto, che è la curva statistica che descrive la vita caratteristica del componente rappresentato dal blocco (Figura 3).

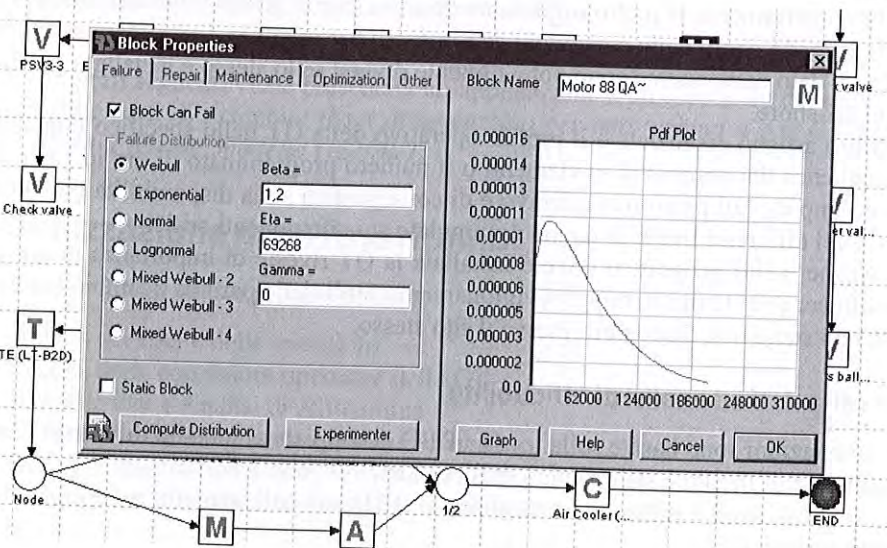


Figura 3 Distribuzione di guasto nel blocco.

Tale curva può essere ricavata da diverse fonti. Prima fra le altre, se lo studio si riferisce a una macchina già operante, la fonte più importante si basa sull'analisi di Weibull dei dati dal campo. Il software usato allo scopo da GE ENERGY Oil&Gas è Reliasoft Weibull versione 6++.

Questi dati possono e devono essere integrati, laddove il campione non sia abbastanza significativo, con altri dati provenienti dal database aziendale e riferentesi a macchine simili e operanti in condizioni simili.

In alcune situazioni si possono usare dati di letteratura tecnica specializzata o appartenenti ad altri database.

Per la presente analisi, sono stati utilizzati solo dati provenienti da database interni a GE ENERGY Oil&Gas.

- La distribuzione normale o log-normale descrivente la statistica dei tempi di riparazione o sostituzione del componente successivamente al guasto, detta Time To Repair/Restore (Figura 4).

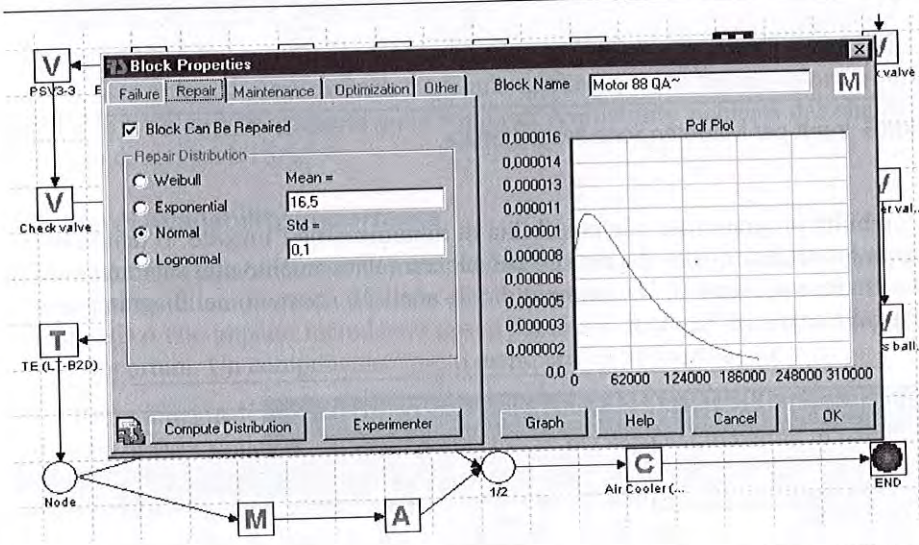


Figura 4 Distribuzione TTR.

- Gli intervalli di Manutenzione Preventiva e la durata della stessa (Figura 5).
- Il tempo Logistico, che consiste nel tempo d'attesa da aggiungersi al TTR ogniqualvolta il ricambio del componente guasto non è disponibile a magazzino (Figura 5).

### Definizione del programma di maintainability

Per ogni tipo di fuori-servizio pianificato è stato definito un diagramma di Gantt per stabilire la durata attesa della manutenzione.

Tale diagramma è un 'Bar Chart' nel quale ogni attività è descritta nel dettaglio in termini di durata, correlazioni, risorse impiegate; lo scopo è capire l'entità dell'in-

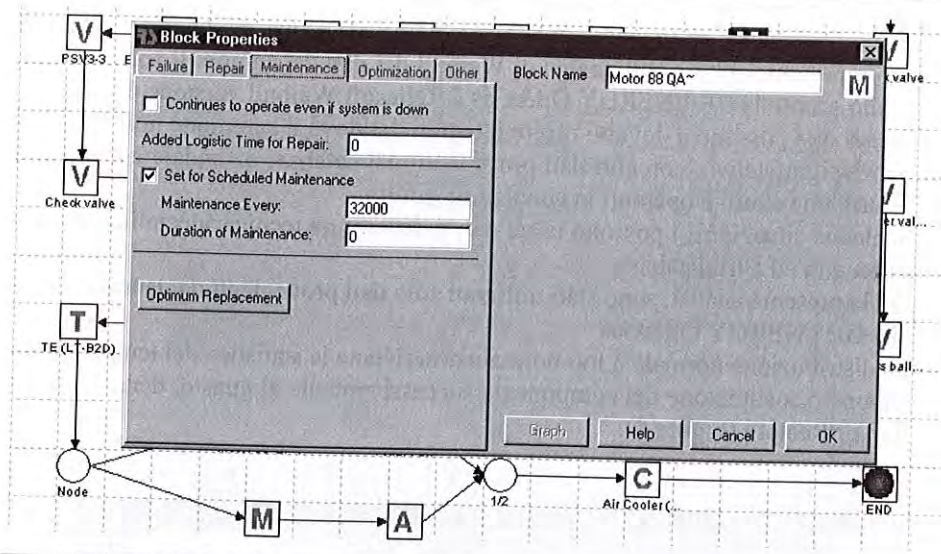


Figura 5 Input per Manutenzione Programmata.

disponibilità programmata e le possibilità di minimizzarne l'impatto. Il tempo di in-viluppo totale sarà quello da inserire nel blocco relativamente alla schermata della manutenzione preventiva. Un esempio di tale analisi è riassunto nel diagramma mo-strato nella seguente Figura 6.

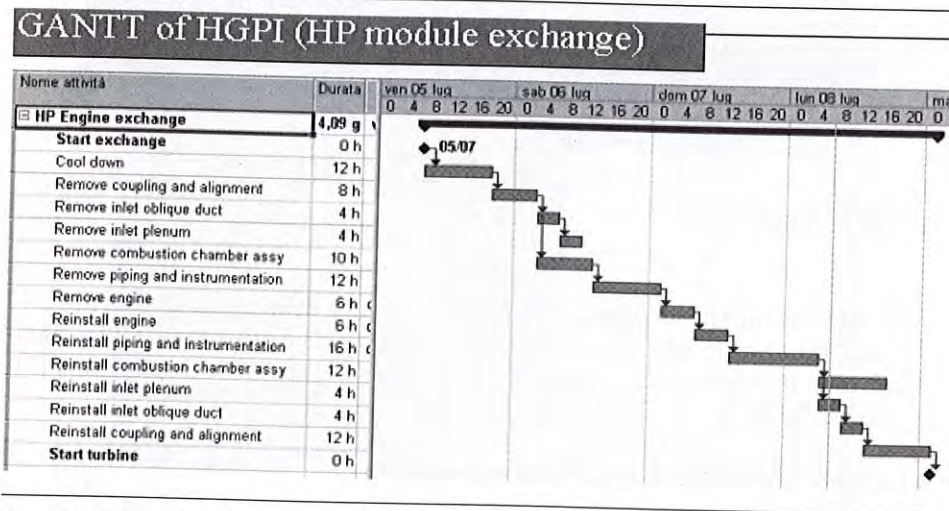


Figura 6 Esempio di diagramma di GANTT di Manutenzione Preventiva.

### Costruzione dell'RBD

Una volta definiti i sottosistemi della GT, si costruiscono gli RBD relativi a ciascuno di essi, esprimendo i legami funzionali a un livello di dettaglio più alto. Ogni blocco viene corredato dalle informazioni descritte nei passi precedenti.

### Simulazione Monte Carlo e Availability Importance Ranking

La prima simulazione del sistema viene eseguita supponendo la disponibilità infinita di parti presso il magazzino del sito. I risultati sono due: il primo consiste nella de-terminazione del massimo valore di Availability ricavabile dalla GT mentre il secon-do consiste nel ranking dei componenti della turbina in accordo alla loro influenza più o meno elevata sulla disponibilità totale. Per questo ultimo punto si utilizza il pa-rametro 'Availability Importance (AI)', descritto nel seguente paragrafo.

### Definizione della lista ottimale ricambi

Una volta simulata la situazione con ogni componente disponibile in magazzino lo-cale, la lista ottimale viene definita togliendo quelle parti che hanno valori di AI più bassi ai fini del raggiungimento della soglia di Availability richiesta dal cliente nel contratto di service LTSA.

### L'indice di Availability Importance

L'impatto dell'affidabilità e della manutenibilità di un componente sulla disponibi-lità del sistema di cui fa parte, dipende da molti parametri. E necessaria una formula che sintetizzi tale impatto includendo questi parametri in modo integrato e seguendo criteri opportuni. Un componente è più o meno critico in funzione di:

1. schema funzionale affidabilistico: lo stesso item è più critico all'interno di un si-stema in cui è collegato in serie, piuttosto che nel caso in cui risulta in parallelo.
2. MTTR: è il tempo medio per ripristinare la funzionalità del componente dopo il suo guasto. Tale parametro, anch'esso derivabile statisticamente, tiene conto del-le problematiche di accessibilità e della presenza di attrezzi speciali per lo smon-taggio e il rimontaggio.
3. ritardo logistico: è il tempo aggiuntivo di cui bisogna tenere conto se il compo-nente non è disponibile presso il magazzino locale di impianto al momento del guasto.
4. MTBF: per tenere conto dell'affidabilità intrinseca del componente.
5. costo della parte: per considerare anche il peso della stessa sull'inventario del-l'impianto.

La formula costruita deve pesare correttamente i criteri sopra descritti, sia con coef-ficienti teorici o mediante fattori semiempirici basati su iterazioni successive.

Una parte della formula messa a punto in GE ENERGY Oil&Gas è la seguente:

$$AI_i = RI_{Subsys}(MTTFF_{Sys}) \cdot [f(RI_i(MTTFF_{Subsys}))] \cdot \left[ \frac{g(MTTR_i + LogisticDelay_i)}{MDT_{Sys}(simulation) \cdot MTBF_i(simulation)} \right]$$

dove i vari termini hanno i seguenti significati:

$RI_{Subsystem}(MTTFF_{System})$  è la Reliability Importance (R.I.) del sottosistema a cui il componente 'i' appartiene e MTTFF è il 'mean time to first failure' per l'intero sistema.

$RI_i(MTTFF_{Subsystem})$  è la Reliability Importance del componente 'i' e MTTFF è il 'mean time to first failure' per il sottosistema al quale appartiene il componente.

$MTTR_i$  è il 'mean time to restore' del componente 'i'.

$LogisticDelay_i$  è il ritardo logistico, che è il tempo aggiuntivo di cui bisogna tenere conto se il componente non è disponibile presso il magazzino locale di impianto al momento del guasto.

$MDT_{System}$  è il 'mean down time' per il sistema intero.

$MTBF_i$  è il 'mean time between failure' del componente 'i'.

I valori di MTBF, MTTR e MTTFF sono riferiti a ore di marcia e non di calendario.

La 'Reliability Importance' identifica l'importanza relativa di un componente in un sistema rispetto alla affidabilità totale del sistema stesso. In tale senso, essendo la affidabilità del sistema una funzione di più variabili consistenti nelle affidabilità dei costituenti il sistema, essa si può esprimere in termini di derivata parziale:

$$R.I._i = \frac{\partial R_s}{\partial R_i}$$

dove,

$R_s$  è la 'system reliability',

$R_i$  è la 'i-component reliability'

Ovviamente, il ranking derivato da questa formula deve avere la caratteristica di essere invariante rispetto al modo di scomporre il sistema in sottosistemi.

## Risultati

Il ranking che risulta dall'analisi è parzialmente riportato nella seguente Tabella 1 in cui sono mostrati il componente, il sottosistema di appartenenza e la relativa AI normalizzata.

In questo caso e come in analoghe applicazioni si ottengono due risultati principali, uno di ordine tecnico e l'altro di ordine economico.

Il primo consiste nella definizione della lista di parti necessaria e sufficiente a garantire la disponibilità globale richiesta, per la quale si sono utilizzate a pieno le informazioni affidabilistiche relative sia ai componenti, sia ai loro legami logico-funzionali, basati sullo studio dei P&I.

Il secondo risiede nella generale ottimizzazione, spesso minimizzazione, del magazzino di impianto: risparmi fino al 25% sono frequenti ogniqualvolta si applichi la presente metodologia. Tale risparmio è tanto più elevato quanto più è complesso l'impianto e può ulteriormente essere migliorato là dove si ipotizzi l'utilizzo di magazzini centralizzati che servono più siti.

Tabella 1 Availability Ranking

Subsystem	Component	A.I. Norm.
Flange to Flange	Liner	1,54E-02
Flange to Flange	1st & 2nd stage shrouds +Hcomb (*)	1,13E-02
Hydraulic Oil System	Main pump gear (PH-1)	9,21E-03
Lube/Oil System	Main pump gear (PL-1)	7,12E-03
Flange to Flange	Transition Piece	6,48E-03
Flange to Flange	3rd&4th stage shrouds +Hcomb (*)	4,98E-03
Flange to Flange	#2 journal bearing (*)	4,97E-03
Flange to Flange	#3 journal bearing (*)	4,95E-03
Cooling & Sealing Air	Solenoid valve (20CB-1)	4,22E-03
Flange to Flange	2nd stage nozzle (*)	4,13E-03
Flange to Flange	2nd stage buckets (*)	4,12E-03
Combustion Chamber	Flame Detector (28FD-1)	4,07E-03
Flange to Flange	1st stage buckets (*)	4,07E-03
Oil Vapour Separator+Air Intake	PdT 63TF-3A/3B/3C 1003	3,70E-03
Lube/Oil Cooler & Gas Heater	Axial Fan	3,57E-03
Fuel Gas System (Electric Actuation)	Solenoid valve (20FG-1)	3,31E-03
Lube/Oil Cooler & Gas Heater	Axial Fan	3,29E-03
Lube/Oil Cooler & Gas Heater	Solenoid Drain valve (20 OD-1)	2,88E-03
Fuel Gas System (Electric Actuation)	LVDT (96GC-1)	2,66E-03
Oil Vapour Separator+Air Intake	Motor 88QV"	2,53E-03
Starting Means	Solenoid valve (20SV-1)	2,52E-03
Starting Means	Speed Changer (20SG-1)	2,52E-03
Starting Means	Brake Solenoid (20SB-1)	2,46E-03
Fuel Gas System (Electric Actuation)	Solenoid valve (20VG-1)	2,42E-03
Starting Means	Solenoid valve (20SV-2)	2,41E-03
Lube/Oil System	Turning Gear	2,27E-03
Cooling & Sealing Air	ZSL 33AS-11 (Limit Switch)	2,21E-03
Fuel Gas System for DLN	33GP-12 (Limit Switch)	2,20E-03
Flange to Flange	3rd stage buckets (*)	2,13E-03
Starting Means	33SB-1 (Limit Switch)	2,11E-03
Cooling & Sealing Air	ZSH 33AS-12 (Limit Switch)	2,10E-03
Flange to Flange	4th stage buckets (*)	2,08E-03





# Ingest Facility

## La gestione informatizzata del "global service" di un patrimonio immobiliare

*Staff Building Support - Ingest Facility*

Il contratto descritto prevede la gestione di 358.000 m<sup>2</sup> di immobili, ripartiti in 88 tra sedi principali e periferiche, con oltre 15.000 utenti.

La metodologia descritta rappresenta un esempio di gestione di un patrimonio immobiliare con l'ausilio di una strumentazione informatica che interviene in tutte le fasi del processo.

La descrizione è articolata in:

1. **CONTRATTO**
  - 1.1 Norme Contrattuali
  - 1.2 Service Level Agreement
2. **ORGANIZZAZIONE DEL SERVIZIO**
  - 2.1 Struttura Organizzativa
  - 2.2 Strumenti Tecnologici di Gestione
  - 2.3 Piano di qualità e procedure gestionali
  - 2.4 Sistema di Reporting
3. **ATTIVITÀ OPERATIVE**
  - 3.1 Call Center - Gestione delle Attività a Chiamata o a Evento
  - 3.2 Gestione delle Manutenzioni
  - 3.3 Gestione delle Attività Straordinarie e dei Progetti Immobiliari
  - 3.4 Gestione Attività EAH&S e Security
  - 3.5 Gestione degli Spazi e del "Moving"

## 1. Contratto

### 1.1 Norme contrattuali

#### Servizi

Oggetto del contratto è il conferimento in appalto da parte del Cliente a Building Support (BS) di una serie di servizi definiti nel Service Level Agreement (SLA) attinenti ad attività di Facility Management.

Il contratto prevede specifici requisiti per la gestione e il controllo dei servizi, la cui implementazione da parte di BS è descritta nel piano di qualità, nelle procedure gestionali correlate e nelle specifiche tecniche/manuali operativi determinati per ciascun servizio.

Il contratto ha durata quinquennale.

L'importo contrattuale, fatturato su canone mensile, è suddiviso in:

- **Operation Cost**  
Costo dell'attività operativa, svolta prevalentemente tramite subappalti gestiti in "open book", ovvero con costi passanti e scelta del fornitore con procedure di gara e possibilità di ispezione da parte del Cliente fissate da contratto.
- **Management Cost**  
Costo del personale operante nella commessa.
- **Management charge**  
Spese generali e utili.

Annualmente è effettuato un conguaglio finale dei costi effettivamente sostenuti e rendicontati previo audit del cliente.

Il contratto, la cui durata è 5 anni, prevede un piano di saving con una progressiva riduzione dei costi dal primo al quinto anno.

#### Servizi in Business Driven

Il contratto comprende anche l'affidamento in gestione dei contratti con sub-fornitori definiti direttamente dal Cliente.

I servizi comprendono:

- Noleggio fotocopiatrici e fax.
- Gestione mense e ristoranti convenzionati.
- Materiali di cancelleria e consumabili.
- Trasporto persone.

Il sistema di remunerazione prevede l'applicazione di Fee sul fatturato dei sub-fornitori quale riconoscimento del Management Cost.

#### Service Level Agreement

Il Service Level Agreement, definito in accordo con il cliente, stabilisce il livello di prestazione per ciascun tipo di servizio richiesto dall'utente.

## 2. Organizzazione del servizio

### 2.1 I servizi

I servizi sono stati suddivisi in due categorie principali in relazione all'importanza del servizio erogato:

**Servizi di Tipo 1:** sono i servizi tecnici finalizzati sia alla salvaguardia delle strutture e del personale del Cliente, sia al regolare espletamento dell'attività lavorativa per il conseguimento degli obiettivi aziendali. In sintesi, tale categoria include tutti i servizi afferenti alle seguenti attività:

- Conduzione e manutenzione edifici e impianti
- Pulizia
- Sicurezza delle sedi (Security)
- Ambiente, salute e sicurezza (EH&S)
- Call desk

**Servizi di Tipo 2:** sono servizi di supporto alle attività di business del Cliente di seguito elencati:

- Servizi di cancelleria
- Posta e Merci
- Servizi di tipografia e fax
- Mantenimento del verde
- Servizi di facchinaggio
- Gestione spazi
- Altri di supporto meglio definiti nelle specifiche per area geografica (per esempio aule riunioni, gestione affitti ecc.)

### 2.2 Struttura organizzativa

L'organizzazione del personale si rifà a un modello a matrice che prevede:

- funzioni operative dedicate che sono presenti nelle sedi del Cliente
- funzioni di supporto/staff facenti capo o alla direzione di divisione IFM o ad altre direzioni centrali, che secondo competenza intervengono nella gestione dei servizi per perseguire gli obiettivi contrattuali;
- Centri di competenza che garantiscono il supporto specialistico e l'eccellenza delle prestazioni fornite nelle diverse discipline affrontate nel contratto

Il modello organizzativo a matrice assicura la disponibilità, quindi, di risorse dedicate al Cliente e nello stesso tempo di competenze specialistiche condivise che sono rese disponibili in base alle necessità del Cliente (Figura 1).

In particolare, BS ha nominato un Direttore Operativo dedicato che ha la responsabilità globale del contratto e di tutti rapporti con il Cliente per tutte le attività.

Ai vari sites del Cliente sono stati assegnati dei Site managers, che gestiscono le attività operative in campo interfacciando gli utenti e che rappresentano BS per la gestione del contratto e dei rapporti con il Cliente in site, secondo le direttive del direttore operativo e dei contenuti contrattuali.

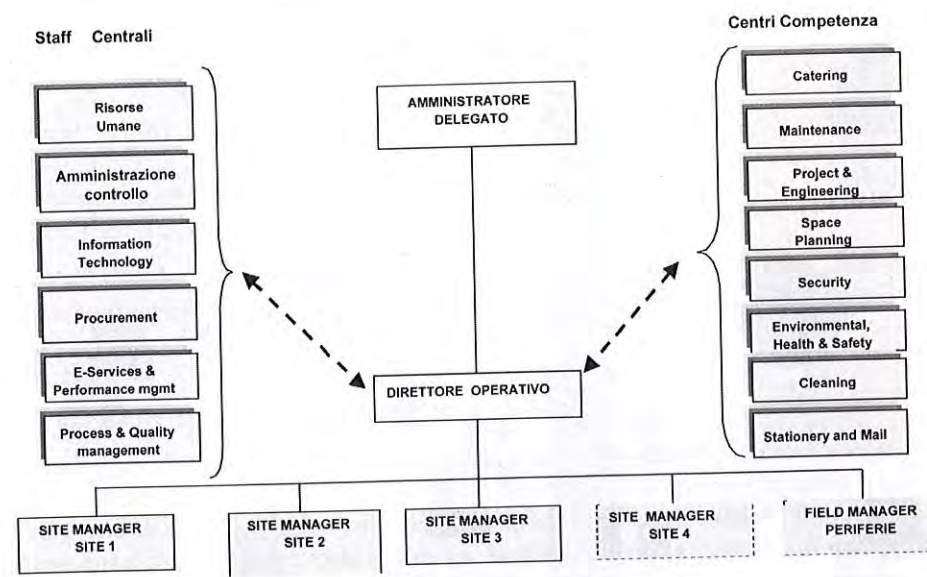


Figura 1 Organigramma di commessa

Per quanto riguarda i siti periferici, al fine di rendere più omogenea ed efficace la gestione delle attività anche nelle sedi di minore complessità è stato nominato un Field manager, con il compito di supervisionare e coordinare le attività svolte in tali sedi minori.

### 2.3 Strumenti tecnologici di gestione dei servizi

#### Network

L'infrastruttura informatica (IT) prevede componenti applicativi di prodotto e componenti di servizio con connessioni Intranet e Internet previa apposita protezione Firewall (Figura 2).

Riferimento generale del sistema è un Data Center primario che fa capo essenzialmente a:

- Server Oracle (Data Base)
- Server di Servizio Citrix (in configurazione load balancing-alta affidabilità)
- Server applicativo Maximo Enterprise
- Server Test (per le operazioni di verifica delle nuove installazioni)

Il Data Center primario è collegato a una rete Intranet (Wide Area Network) gestita con protocollo Citrix sino ai server e relative LAN di sede.

#### I Programmi applicativi

Con le tecnologie poste a fondamento della rete Internet è possibile riorganizzare i servizi ponendo l'utente finale al centro del processo, accelerando il processo di

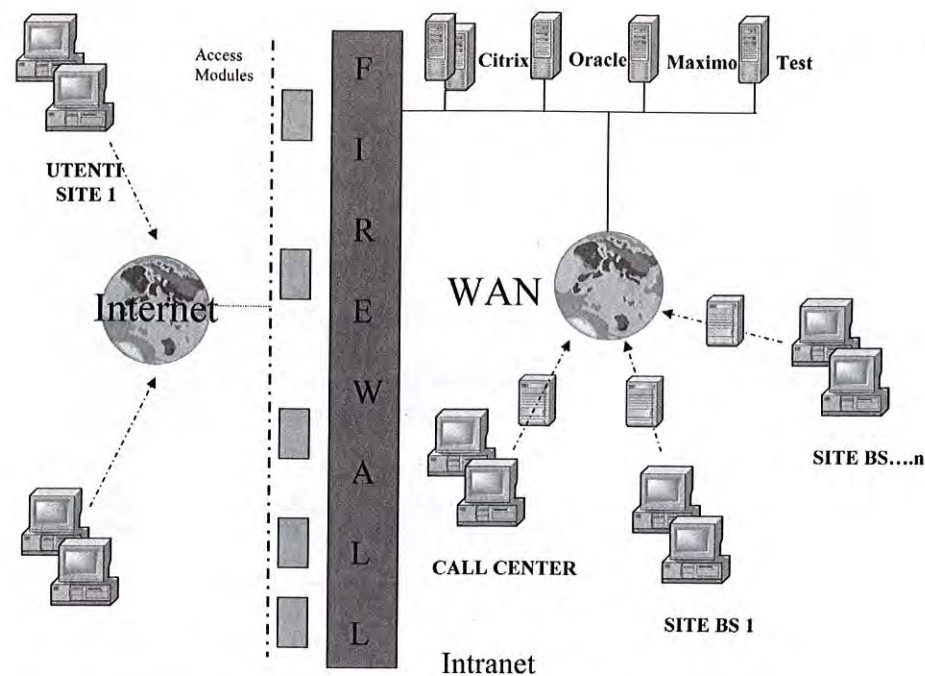


Figura 2 Schema infrastruttura.

contabilizzazione/controllo degli eventi ed, infine, rendendo fruibili in rete tutte le informazioni relative alla qualità del servizio erogato.

In tal modo, gli utenti possono inoltrare al sistema informatico le loro richieste o attraverso il Call Center o direttamente attraverso l'accesso alla rete, avendo la piena visibilità sullo stato di avanzamento, la risoluzione e i tempi di risposta a ogni chiamata.

Building Support opera sulla base di un sistema integrato implementato per facilitare l'accesso alle transazioni funzionali alla base dei servizi.

In sintesi i software applicativi standard adottati, che permettono al sistema integrato nel suo complesso di gestire le attività sono riportati di seguito:

**Call Center per:**

- Inoltro richieste di servizio.
- Pianificazione degli interventi.
- Tracking.
- Reclami.

**MAXIMO Enterprise per:**

- Gestione manutenzione.
- Gestione materiali.
- Gestione facilities.

**Auto Desk e Draw Base per:**

- Gestione spazi e moving.
- Aree shared (posti di lavoro, conference rooms, ecc.).

**Crystal Report e Cognos per:**

- Contabilizzazione.
- Reportistica on line.
- Customer satisfaction.

RDBMS Oracle è il supporto alle applicazioni elencate, in quanto unico Data Base in cui confluiscono i risultati delle attività registrate che diventano disponibili per ogni successiva attività di analisi e di reporting.

**2.4 Piano di qualità e procedure gestionali**

Il piano di qualità di commessa è finalizzato alla determinazione univoca e organica dei contenuti del contratto e delle procedure necessarie alla sua applicazione.

Il piano di qualità regolamenta pertanto, in accordo con i requisiti contrattuali e in coerenza con i piani aziendali, tutti gli aspetti attinenti la gestione di commessa quali:

- Organizzazione della commessa, stabilendo organigramma e mansionari;
- Piano di formazione e aggiornamento del personale;
- Procedure di gestione degli SLA, integrate dalle specifiche tecniche e dai manuali operativi di servizio;
- Implementazione di precise regole di gestione economica e finanziaria;
- Processi di aggiornamento e valutazione dei fornitori;
- Processi di comunicazione;
- Processi di reporting e di misurazione delle performances (Key Performance Indicators - KPI);
- Attività di benchmarking;
- Processi di Auditing;
- Rilevazione e valutazione della Customer e User Satisfaction.

Un adeguato processo di formazione deve garantire che suddetti processi siano efficaci per tutte le differenti funzioni organizzative:

- a livello centrale aziendale;
- a livello locale di gestione singola sede;
- a livello cliente/utente;
- a livello subfornitori.

**2.5 Sistema di reporting delle attività**

I risultati del sistema dei processi sopra definiti, di gestione e controllo delle attività attuato da BS, è certificato a cura di quest'ultima nei confronti del Cliente attraverso un sistematico e documentato flusso di reporting periodico, che si compone di differenti Reports.

Il documento di base è costituito dal **Report Operativo**, nel quale vengono riunite tutte le schede di gestione e di controllo dei servizi definiti nei singoli Service Level Agreements, in cui BS certifica al Cliente le attività, relative ai servizi oggetto del Contratto, svolte in un determinato periodo di tempo. Ovvero: attività eseguite nel periodo, attività in corso e attività straordinarie programmate per il periodo successivo, con i relativi tempi di esecuzione, elaborazioni statistiche e indicatori di performance riferiti all'operatività e alla qualità dei servizi stessi.

Tale report operativo, in linea di massima, contiene:

- la descrizione dei servizi nel periodo di riferimento e gli eventi significativi in base alla documentazione concordata negli SLA;
- i dati statistici e indicatori di performance;
- le aree di miglioramento identificabili, in base a richieste degli utenti o ad analisi di BS sulle stesse;
- le conseguenti proposte di piani d'azione.

A titolo di esempio si descrivono in dettaglio le fasi di sviluppo e successivo esame del report operativo dei servizi tecnici di sede (Figura 3).

SEDE DI.....	GESTIONE SERVIZI											
	Gen	Feb	Maz	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Servizi												
Ilizia	G											
sto di lavoro	G											
ngresso Reception/Aule riunioni	G											
ree comuni	Y											
ezature	G											
ervizi igienici	G											
Iudizio complessivo	G											
rde												
appeti erbosi/Arbusti/Siepi/Aiuole fiorite	G											
archeggi	G											
erda interno	Y											
iante	G											
Iudizio complessivo	G											
FM) Copier/fax/vdc/aule riunione												
empi di ripristino/rifornimento	G											
renotazione aule	G											
Iudizio complessivo	G											
FR) Copier/fax	G											
isinfestazione	R											
sta	G											
icevimento merci	G											
raslochi Interni	G											
azi	G											
cazioni	G											
GIUDIZIO COMPLESSIVO	G											

Legend to be used:  
 G: GREEN  
 Y: YELLOW  
 R: RED

Figura 3 Cruscotto per sede.

Nella tabella di sintesi di gestione della sede vengono introdotte colorazioni diverse, per evidenziare la situazione in essere riferita alla sede/servizio:

- colore verde: situazione e processi nella norma;
- colore giallo: criticità lieve o azione correttiva in corso;

- colore rosso: criticità grave o perdurare ingiustificato di criticità lieve, mancanza dei processi.

Le diverse colorazioni sono anche indicative dell'andamento degli indicatori di performance, per cui sono stabilite delle soglie di controllo.

I reports delle varie sedi vengono consolidati a livello Italia a cura del Direttore operativo della BS. Tale report contiene le stesse sezioni del report di sede con le informazioni rilevanti a livello Italia e viene discusso formalmente tra Direttore operativo della BS e referente contrattuale del Cliente.

### 3. Attività operative

#### 3.1 Gestione dell'utente (attività a chiamata o a evento)

Le chiamate degli utenti sono gestite attraverso un Call Center unico nazionale. Il servizio di Call Center consente la gestione di tutte le richieste dell'utente relative ai seguenti servizi:

- Manutenzione a guasto e straordinaria
- Traslochi
- Pulizia e verde straordinari
- Prenotazione aule riunioni e videoconferenze
- Prenotazione servizi Ristorazione e coffee break
- Assistenza per copiers/fa/printer di rete
- Duplicazione chiavi

BS attraverso il flusso del servizio di Call Center riceve la segnalazione e, dopo aver valutato il grado di urgenza, programma l'intervento correttivo a seguito delle richieste pervenute, assegnando automaticamente, tramite sistema informativo, l'incarico alla squadra operativa del sub-fornitore, che agisce nel site di competenza, emettendo le necessarie schede di intervento (Ordine di Lavoro - ODL).

Il Site Manager ha la responsabilità globale di tutte le operazioni descritte nella presente procedura e costituisce anche l'interfaccia formale con il Cliente per le attività di controllo del servizio e per qualsiasi evenienza di difformità dai livelli di servizio concordati.

I tecnici di sede sono responsabili di attuare operativamente le attività di programmazione, gestione e controllo dei servizi di competenza, riguardo all'evasione delle richieste e di controllare l'erogazione degli interventi da parte dei sub-fornitori.

#### 3.2 Gestione delle manutenzioni

La gestione di tutte le attività di manutenzione è eseguita tramite il tool Maximo Enterprise, che costituisce lo standard CMMS (Computerized Maintenance Management System).

Tramite Maximo Enterprise, lo staff locale comunica con i sub-Fornitori, il personale operativo e le strutture centrali, provvedendo alla gestione delle attività di pianificazione e controllo delle attività; tale organizzazione permette il monitoraggio costante delle operazioni (siano esse richieste utente o attività pianificate) oltre alla normalizzazione dei flussi e del reporting generato.

L'utilizzo di tale sistema consente in definitiva la gestione integrata delle attività manutentive e la possibilità di ottenere miglioramenti valutabili in relazione all'affidabilità degli impianti, al livello del servizio, alla riqualificazione delle spese di manutenzione e alla gestione efficiente delle risorse umane.

#### Classificazione attività manutentive

Come già anticipato le attività manutentive possono essere suddivise in varie tipologie. La principale classificazione è di seguito descritta:

##### A. Manutenzione preventiva /ordinaria programmata

Per manutenzione preventiva deve intendersi l'esecuzione di tutte le operazioni, necessarie a mantenere gli impianti in buono stato di funzionamento e a garantirne il corretto mantenimento nel tempo, facendo ricorso ad azioni di pulizia, riparazione, ripristino, revisione, sostituzione di parti, componenti o apparecchiature.

Si tratta di una manutenzione "eseguita a intervalli predeterminati", in accordo ai criteri stabiliti nel piano di manutenzione, e "volta a ridurre la probabilità di guasto o degrado di funzionamento" degli impianti.

Si realizza con la collocazione degli interventi in un arco temporale definito ed è eseguita a fronte delle Schede di Manutenzione, riportate nel sistema informativo e la conseguente elaborazione di tutti i dati necessari e disponibili per identificare modalità e tipologia degli interventi programmati.

Le Schede di Manutenzione, citate in precedenza, descrivono gli interventi Preventivi Programmati eseguiti su componenti codificati degli impianti.

Tale codifica è riconducibile ai Tag Number, inseriti a livello di programmazione nel sistema informativo di gestione. Essi identificano le varie apparecchiature oggetto di interventi e, conseguentemente, riportano ove necessario una statistica sulle quantità e tipologia di interventi effettuati a carattere temporale.

##### B. Manutenzione correttiva/ a guasto

Per manutenzione correttiva si intende il mantenimento del regolare funzionamento degli impianti mediante la riparazione, ovvero sostituzione – in tutti i casi in cui non siano più riparabili – di tutti i componenti degli impianti e dei relativi accessori.

BS, in presenza di anomalie rilevate in corso di operazioni ordinarie o a seguito di segnalazioni fatte, dovrà prontamente eseguire tutti gli interventi necessari al mantenimento della corretta funzionalità degli impianti. Pertanto la manutenzione correttiva comprenderà tutte le riparazioni e sostituzioni che si potrebbero rendere necessarie per garantire il regolare funzionamento delle singole componenti.

Tali interventi vengono eseguiti conseguentemente al rilevamento di avarie su impianti o, più in generale, su apparati mantenuti, e possono avere vari gradi di urgenza, riferiti a situazioni che temporalmente definiscono il momento in cui l'esecuzione dell'attività dovrà essere effettuata.

##### C. Manutenzione straordinaria

Questo tipo di manutenzione si riferisce a tutte quelle attività che non rientrano direttamente nel contratto ma che, rendendo più funzionali gli impianti e le apparecchiature, ne garantiscono migliori performance e migliori riscontri sul livello di produttività.

#### Programmazione delle attività

La Programmazione dei Lavori è la denominazione generale delle attività che fondamentalmente provvedono alla distribuzione nel tempo dei lavori medesimi, ottimizzandone le risorse, rispettando i vincoli imposti dal sistema.

Essa copre un arco temporale che viene suddiviso in medio e lungo periodo.

Le attività che si riferiscono a questi periodi vengono sinteticamente definite come **programmazione e pianificazione**.

La pianificazione delle attività richiede innanzitutto un **censimento** degli impianti, dei macchinari e dei componenti oltre che dell'analisi del divario esistente tra il livello di servizio erogato e quello che è oggettivamente necessario al fine della soddisfazione del cliente.

La **Pianificazione** dei Lavori è il processo di valutazione nel lungo periodo (arco temporale solitamente annuale) delle necessità dei mezzi, delle risorse e della loro allocazione in modo ottimale, per consentire il corretto svolgimento delle attività.

Sulla base delle frequenze di intervento precedentemente identificate nelle schede di Manutenzione concordate e riportate in MAXIMO, viene elaborato il piano manutentivo programmato, denominato Programma Principale Lavori (PPL) al quale il personale interno ed esterno dovrà attenersi.

La **Programmazione** è il processo di gestione nel medio periodo dei lavori manutentivi attraverso l'elaborazione di programmi lavoro solitamente mensili (PL).

Mensilmente viene elaborato il PL del mese successivo, in modo tale da poter verificare eventuali spostamenti di date relativi agli interventi programmati e procedere poi alla stampa degli ordini di lavoro programmati.

#### 3.3 Gestione delle manutenzioni straordinarie e dei progetti

Il processo di gestione dei progetti è schematizzato nei seguenti diagrammi di flusso che si ritengono autoesplicativi. In tali flussi, sono identificate le responsabilità di BS e del Cliente, le attività e la documentazione di riferimento nelle seguenti Fasi (Figura 4):

- Attivazione Progetto
- Pianificazione di progetto
- Fase 1 (progetto di massima)
- Fase 2 (progetto esecutivo)
- Fase 3:
  - Gare d'appalto
  - Esecuzione Opere
  - Chiusura lavori, validazione progetto, presa in carico dell'opera.
- **Fase 1:** Progetto di massima, preventivo e computo metrico di massima suddiviso nelle principali voci di spesa e contenuto entro il budget assegnato, alternative proposte, programma lavori indicativo, iter per ottenimento delle autorizzazioni necessarie per l'esecuzione delle opere.
- **Fase 2:** Progetto esecutivo, particolari costruttivi, preventivo particolareggiato, capitolati e contratti d'appalto, specifiche tecniche, programma lavori, documentazione da presentare eventualmente agli Enti Pubblici preposti seguendone l'iter di approvazione.  
Alla Fase 2 segue l'attività di procurement con esecuzione di gare d'appalto,

comparazioni tecnico-economiche delle offerte, formulazione della miglior offerta al Cliente ed eventuale assegnazione ordini.

- **Fase 3:** Apertura cantiere, coordinamento dei lavori, coordinamento delle Imprese d'Appalto, direzione e assistenza lavori, verifica e approvazione stati avanzamento lavori (SAL), chiusura lavori, avviamento, collaudi, accettazione e liquidazione lavori, validazione dell'intero progetto, documentazione tecnica, eventuali corsi di formazione per il personale di manutenzione, consegna.

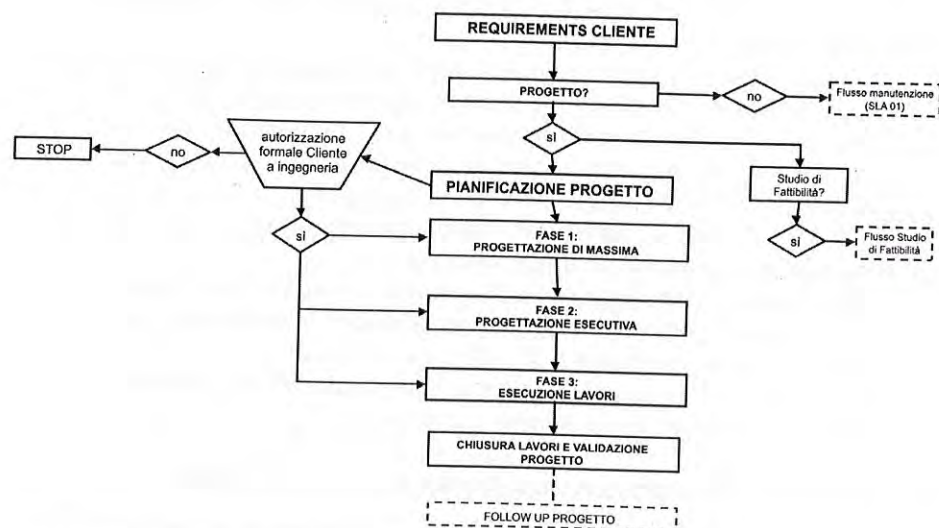


Figura 4 Diagramma di flusso generale.

### 3.4 Gestione delle attività specialistiche

Specifici centri di competenza seguono le attività connesse a:

- Igiene e Sicurezza Ambientale (Healthy and Safety).
- Sistemi Anti Intrusione e Controllo Accessi (Security).

I servizi, tramite apposite procedure supervisionano e regolamentano tutte le attività che vengono svolte in materia nelle singole sedi.

I principali servizi assicurati sono:

- gestione prodotti pericolosi (chimici, amianto, tossici ecc.);
- gestione rifiuti (speciali, pericolosi ecc.);
- pozzi e scarichi idrici;
- emissioni in aria;
- rumore;
- prevenzione incendi;
- piani di emergenza;
- gestione dell'energia;

- pratiche edilizie;
- training del personale.

Anche per queste attività specifiche è mensilmente redatto un report che, con metodologia analoga a quella previsto per i servizi, evidenzia le criticità, ovvero l'esigenza di azioni correttive in presenza di deviazioni rispetto alle normative di legge e/o normative di corporate.

### 3.5 Gestione degli spazi

Compiti e obiettivi della gestione spazi (Space Management) sono:

- analizzare gli edifici misurandone precisamente gli spazi e catalogandoli per idoneità d'uso;
- verificare le quantità di spazio usate;
- analizzare le caratteristiche distributive (lay-out);
- determinare l'efficienza dell'edificio/i in base alle superfici effettivamente utilizzate e ai costi di gestione;
- identificare le minus/plus valenze di spazio;
- ripartire gli spazi per Centri di Costo.

L'analisi degli spazi di un edificio ha come prima finalità quella di analizzare le aree distinguendole in lorda, utilizzabile, produttiva:

- Area Lorda
- Area Netta Affittabile (la precedente esclusi collegamenti verticali impiantistici)
- Area Netta Utilizzabile (la precedente esclusi i locali tecnici)
- Area Netta Produttiva (la precedente esclusi i locali accessori - aree break - infermeria - depositi - ecc.)

La determinazione delle diverse tipologie delle aree immobiliari consente valutazioni mirate all'ottimizzazione degli spazi, alla riduzione dei costi operativi di gestione, adottando anche soluzioni innovative, quali lo shared-desk (scrivania condivisa) in presenza di attività (nel caso, per esempio, di consulenza presso il cliente) che non prevedono l'occupazione della propria postazione di lavoro in modo continuativo.

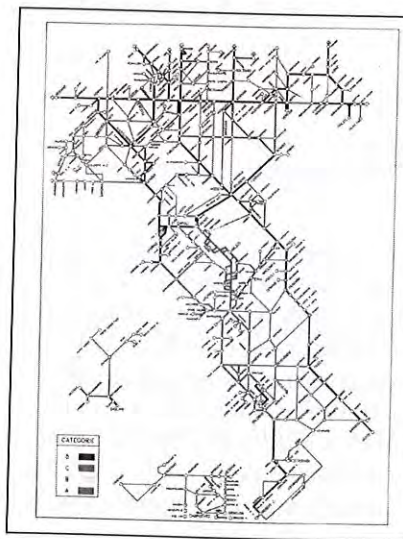
Il programma Draw Base e il suo data base consentono di individuare per ciascuna postazione di lavoro il nominativo dell'occupante e i relativi riferimenti aziendali (reparto di appartenenza, se trattasi di consulente o dipendente, ecc.), o il multiuso (shared-desk) nei casi in cui il posto di lavoro è destinato a più persone (mobile). Una speciale applicazione è prevista per la catalogazione degli arredi.

La gestione degli spazi prevede il continuo aggiornamento del data base in relazione all'"internal moving" (spostamenti interni) degli utenti.



## Il progetto DOMUS per il Bridge Management System della rete ferroviaria italiana

### Problematiche di gestione della manutenzione alle opere d'arte della rete ferroviaria italiana<sup>1</sup>



La rete ferroviaria costituisce un sistema viario di trasporto che percorre tutto il territorio nazionale, con oltre 16000 km di binario.

Il patrimonio d'opere d'arte e in particolare di ponti, risulta notevolmente ricco a causa delle caratteristiche morfologiche dei territori attraversati.

Sull'intera rete è oggi possibile individuare oltre 46000 ponti, tra opere di piccola media e grande luce, per uno sviluppo complessivo di 460 km, e tra questi oltre 2500 ponti in acciaio, per un totale di 47 km.

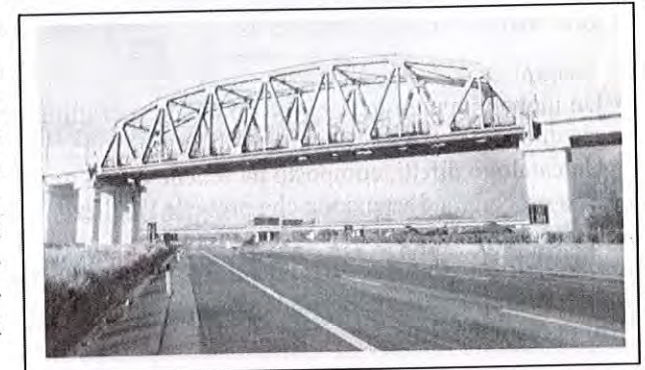
L'età media delle opere d'arte, sulla rete storica ferroviaria, risulta essere in alcuni casi relativamente elevata. La sostituzione delle opere è avvenuta in un ampio arco di tempo, non escludendo il mantenimento in esercizio di opere che, realizzate con margine di sicurezza nei confronti dei sovraccarichi, di fatto hanno dimostrato la loro attitudine a una lunga vita d'esercizio.

Tutto ciò ha causato una notevole eterogeneità della popolazione di ponti in esercizio sulle linee tradizionali. Si va dai più antichi ponti ad arco in muratura, ai ponti in acciaio, che coprono l'intero periodo storico, ai più recenti impalcati in c.a., c.a.p. e a struttura composta acciaio - calcestruzzo, realizzati per i più moderni ponti e viadotti.

<sup>1</sup> Gli autori di questo paragrafo sono R. Mele, P. Firmi, F. Iacobini, Direzione Investimenti, Ingegneria Civile RFI S.p.A., Rete Ferroviaria Italiana.

In questo quadro, che a ragione si può definire complesso, si inserisce il problema dell'ingegnerizzazione delle attività di manutenzione e in particolare delle visite d'ispezione.

Nella gestione delle reti di infrastrutture viarie ci si trova quotidianamente a dover affrontare problemi di manutenzione, dovuti all'uso dell'infrastruttura e ad altre cause (agenti atmosferici, eventi naturali etc.). Dovendo gestire migliaia di chilometri di rete infrastrutturale, è necessario affrontare i problemi di manutenzione con razionalità e organicità, al fine di poter garantire la necessaria funzionalità delle infrastrutture, ottimizzando al contempo i costi e i tempi degli interventi e tenendo anche conto dei conseguenti disagi indotti sull'esercizio.



Il monitoraggio periodico dell'infrastruttura, viene attualmente effettuato secondo quanto prescritto dall'Istruzione 44 C, la quale distingue le visite di controllo periodiche, da effettuare annualmente per quelle opere risultate perfettamente integre alla visita precedente e per l'esercizio delle quali non è prevista alcuna limitazione o cautela, e semestralmente per le altre; le visite straordinarie nel caso di eventi eccezionali (alluvioni, terremoti, etc.); le visite speciali per opere di nuova costruzione o che siano state oggetto di importanti lavori strutturali. Visite speciali periodiche sono poi previste per le travate metalliche.

Il giudizio sullo stato dell'opera viene formulato e poi riportato su apposito verbale, in modo soggettivo dai tecnici che effettuano le visite. Non vengono quindi utilizzati criteri oggettivi o strumenti di lavoro che possano limitare l'influenza, su tale giudizio, della sensibilità e dell'esperienza del tecnico, e che possano quindi attribuire ai giudizi espressi dai diversi tecnici un carattere di uniformità indispensabile per renderli confrontabili.

Non sono altresì in uso algoritmi che, a partire dallo "stato di salute" delle opere individuino una classifica di priorità degli interventi.

Cosicché anche i programmi di manutenzione redatti in ambito compartimentale non sono elaborati sulla base di criteri comuni e per quanto possibile oggettivi e comunque tali da assicurare una diretta confrontabilità tra i programmi stessi. Nasce



così l'esigenza di avere uno strumento di lavoro che permetta al gestore della rete di risolvere in modo efficiente tutti i problemi connessi ai fenomeni di degrado che si sviluppano e che interessano le varie parti componenti le infrastrutture.

A questo bisogno si è cercato di fornire soddisfazione con l'implementazione di un Bridge Management System, realizzata tramite il progetto DOMUS - Diagnostica Opere d'Arte Manutenzione Unificata Standard che nella sua prima fase, portata avanti con la partnership del CNIM, Comitato Nazionale Italiano per la Manutenzione sono stati sviluppati i seguenti aspetti:

1. Anagrafica completa dei ponti.
2. Un inquadramento in famiglie omogenee per mitigare l'eterogeneità delle tipologie di opere presenti.
3. Un catalogo difetti, composto da schede difetti materiali e istruzione tecnica.
4. Una procedura d'ispezione che prevede l'utilizzo in campo di tablet-pc o di schede ispezione.
5. Un algoritmo di valutazione dei difetti che consente di ottenere degli indici di riferimento per razionalizzare la programmazione e l'effettuazione delle operazioni di manutenzione.

Per quanto concerne il primo e il secondo punto è stato fatto un notevole sforzo teso

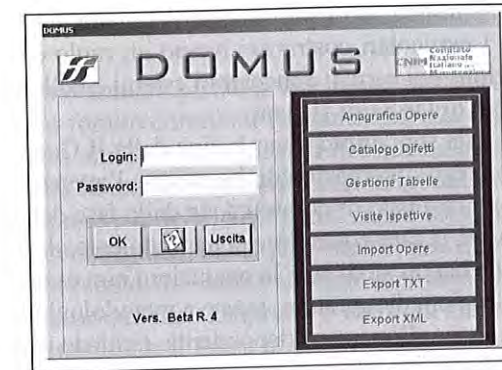
all'individuazione dei dati necessari a una descrizione esauriente ed efficace dei ponti in esame, non tralasciando di considerare l'impatto che ogni dato richiesto ha su un sistema di banca-dati, in termini di reperimento dell'informazione e di suo aggiornamento. Relativamente alla formulazione di un catalogo difetti invece va



sottolineato come sia stato necessario tenere conto della vasta tipologia di materiali utilizzati per la costruzione dei ponti attualmente in esercizio, prevedendo i difetti possibili riscontrabili per ciascuno di essi.

Per quanto riguarda le modalità d'effettuazione delle visite ispettive, accanto all'utilizzo delle tradizionali schede cartacee d'ispezione, peraltro conformabili da sistema in funzione delle caratteristiche dell'opera, è stato deciso di introdurre uno strumento che rendesse le attività stesse il più possibile agevoli per l'operatore, consentendo un input dati in situ il più possibile analogo a quello che può essere effettuato in ufficio su PC. Per questo è stato individuato come strumento il Tablet-PC che tramite l'uso di penna ottica e "Touch-screen" consente direttamente sul posto l'utilizzo di un'interfaccia grafica di input dati.

Infine per l'algoritmo di valutazione dei difetti vale lo stesso discorso fatto per il catalogo, sottolineando come sia stato necessario definire completamente ex-novo le soglie d'attenzione di molte tipologie di ponti considerati.



La diffusione sul territorio nazionale del sistema, ora in sperimentazione avverrà durante l'autunno.

I risultati dell'esperienza futura consentiranno di verificare la bontà dell'approccio scelto e l'opportunità di estendere quanto fatto per i ponti anche alle gallerie e alle altre opere d'arte.

## Aspetti metodologici specifici del progetto DOMUS<sup>2</sup>

Nel corso degli ultimi decenni si sono moltiplicate nei paesi industrializzati le osservazioni sistematiche sul comportamento delle strutture in esercizio, con particolare riguardo a quelle realizzate in cemento armato, sia normale che precompresso. Ciò ha stimolato la interpretazione scientifica delle cause dei fenomeni di degrado, riferimento indispensabile per definire le strategie di prevenzione, razionalizzando tali problemi e articolando in un complesso organico le varie fasi operative. È emersa la complessità degli argomenti in esame, dovuta in parte al loro carattere interdisciplinare, che richiede la conoscenza di concetti della Scienza e della Tecnologia dei Materiali, in parte alla non visibilità di tutti i sintomi. Non è casuale il parallelismo con le procedure utilizzate nella medicina, a tutti ben note, e che, proprio per questo, vengono ora richiamate.

Lo studio delle alterazioni di un qualsiasi sistema strutturale ha come naturale punto di partenza la conoscenza del funzionamento regolare, esente da difetti, del sistema stesso. Tale funzionamento è descritto, caso per caso, dal progetto costruttivo, redatto in modo da assicurare il soddisfacimento dei requisiti essenziali della struttura: la resistenza, la stabilità dell'equilibrio, l'efficienza funzionale, la durabilità.

Le Norme Tecniche, in continuo aggiornamento in armonia con i progressi scientifici e tecnologici, definiscono, in particolare, le azioni, dirette e indirette, le caratteristiche dei materiali, i coefficienti di sicurezza, per cui ogni struttura, realizzata in conformità alla normativa, all'inizio della sua vita di esercizio, dopo il collaudo statico, si comporta in maniera "fisiologica", in analogia con il comportamento degli organismi viventi sani.

<sup>2</sup> L'autore di questo paragrafo è Emanuele F. Radogna, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Comitato Scientifico CNIM - Coordinatore.



Si è fatto riferimento al progetto costruttivo, perché l'opera deve essere descritta nella sua completezza e i particolari costruttivi hanno un ruolo che diventa essenziale nelle zone di applicazione dei carichi concentrati esterni e delle reazioni vincolari, in cui non vale il principio di De Saint Venant.

L'esperienza, maturata soprattutto dopo la fine della II Guerra mondiale e messa in evidenza in vari convegni internazionali, ha attirato l'attenzione sulla necessità di includere riferimenti sul requisito di durabilità sin dalla fase della progettazione.

Ai fini della durabilità la fase costruttiva è, naturalmente, di rilevante importanza, per le conseguenze, che hanno su di essa le operazioni non eseguite a regola d'arte.

Nel caso delle costruzioni di muratura, legate a metodologie operative tradizionali, la rarefazione della mano d'opera corrispondente, richiede oggi, ovviamente, procedure di controllo della qualità, che nel passato non erano considerate necessarie.

Nel caso delle costruzioni di acciaio, l'utilizzazione di prodotti industriali, controllati in stabilimento e pronti all'uso, e le tecnologie, dettagliatamente disciplinate dalla normativa delle unioni bullonate e di quelle saldate, ha favorito la realizzazione di opere ben eseguite e, quindi, inizialmente sane. La conoscenza dei fenomeni di corrosione ha costantemente portato alla adozione di misure protettive delle superfici metalliche con apposite vernici.

Nel caso delle costruzioni di cemento armato la fase costruttiva risulta più articolata e complessa: sono richiesti studi preliminari sulle proprietà degli inerti disponibili, sulla composizione della miscela del calcestruzzo, sulle modalità di trasporto e di posa in opera nelle cassaforme, con specifico riferimento a quelle con prevalente sviluppo verticale, che richiedono particolare attenzione per garantire la uniforme compattazione su tutta l'altezza, sulle precauzioni da adottare nella fase di presa e di indurimento iniziale (curing).

Anche la posa in opera delle armature, le legature delle staffe, il rispetto del distanziamento delle armature dal bordo esterno del getto (copriferro) deve essere di lavorazione accurata, in armonia con le indicazioni dei disegni corrispondenti. Va inoltre tenuto conto che la esecuzione avviene all'aperto, con esposizione alle condizioni termiche e meteorologiche, diurne e notturne, che non sono controllabili.

Emerge quindi la possibilità che si verifichino, in maniera casuale, operazioni imperfette, tali da conferire la predisposizione localizzata alla diminuzione della durabilità senza poter escludere eventuali riduzioni della capacità prestazionale, rispetto a quella teorica, di progetto.

Le operazioni di collaudo statico offrono la opportunità di esaminare in dettaglio la costruzione e di rivelare la esistenza di eventuali difetti. Ciò è oggi facilitato dall'impiego di idonee tecniche di sperimentazione in situ, che nel passato non erano disponibili; per le costruzioni meno recenti non si può escludere quindi la presenza di qualche difetto non visibile dall'esterno. Comunque anche la struttura, inizialmente conforme a tutte le prescrizioni normative e progettuali, quindi fisiologicamente "sana", durante l'evolversi della vita di servizio, generalmente compresa fra 50 e 100 anni, subisce fenomeni di deterioramento, sia per azioni ambientali, sia per effetto dei carichi di utilizzazione, specialmente se ripetuti un gran numero di volte.

La conoscenza dei fenomeni di decadimento nel tempo delle proprietà degli elementi lapidei era nota sin dall'antichità. Vitruvio, nel secondo libro della sua opera sull'Architettura, raccomanda di esporre le pietre estratte da una nuova cava alle in-

temperie, per la durata di due anni, prima di deciderne la utilizzazione nelle costruzioni.

Nel caso del cemento armato, gli studi sistematici della Scienza e della Tecnologia dei Materiali hanno fornito contributi fondamentali alla conoscenza del comportamento dei calcestruzzi alle azioni ambientali dell'atmosfera e delle acque di deterioramento, in modo da limitarne l'influenza con interventi idonei. Il problema diventa più delicato in presenza delle costruzioni meno recenti, eseguite con norme tecniche precedenti a quelle attuali, nelle quali veniva data meno evidenza al requisito della durabilità. Col tempo si è messa a punto una metodologia di studio, che si articola essenzialmente in due fasi. La prima è dedicata alla raccolta sistematica di tutte le informazioni reperibili sull'opera in esame, dal progetto ed eventuali rapporti di visite tecniche con accertamento di eventuali difetti, sia di carattere globale - perdita di verticalità, rotazioni rigide, cedimenti assoluti o differenziali, apertura di giunti -, sia di carattere locale - fessurazioni, distacchi del copriferro, tracce di ruggine -.

Questa prima fase trova riscontro, in campo medico, con la "anamnesi", raccolta di dati riguardanti i precedenti fisiologici e patologici personali ed ereditari del paziente, compiuta a scopo diagnostico.

Preliminare alla interpretazione delle cause dei sintomi di degrado osservati è la conoscenza delle patologie dei materiali costitutivi. A tale scopo è necessario il contributo degli esperti della Scienza e della Tecnologia dei Materiali, in particolare della corrosione degli acciai e dei fenomeni di degrado che possono subire i calcestruzzi.

La descrizione delle cause di tali fenomeni, della loro evoluzione nel tempo e delle modalità con cui si manifestano, possibilmente corredata da una documentazione fotografica, fornisce gli elementi per procedere alla seconda fase, quella della "diagnosi", cioè dell'inquadramento di uno stato morboso in una malattia nota. Ai fini diagnostici può risultare opportuno o necessario utilizzare metodi di investigazione specifici, sia chimici che fisici, alcuni di esecuzione molto semplice, come nel caso della determinazione dello spessore del calcestruzzo, che ha subito il processo di carbonatazione, con l'applicazione di qualche goccia di fenolftaleina. La formulazione della diagnosi, a cui segue la "prognosi", cioè il giudizio clinico sulla evoluzione futura della malattia in esame, attiva ulteriori provvedimenti commisurati alla natura e all'importanza dei fenomeni di danneggiamento osservati.

In certi casi può risultare opportuno accertare il livello delle capacità prestazionali attuali dell'opera in esame con la elaborazione di nuove analisi statiche. Nel passato si faceva ricorso ad analisi lineari, le stesse utilizzate nel progetto delle nuove costruzioni; oggi è possibile utilizzare procedimenti di analisi non lineare, che permettono di tenere conto in maniera realistica dei difetti, in particolare della presenza di fessurazioni. Si tratta di procedimenti che hanno, peraltro, carattere specialistico e che richiedono la collaborazione di esperti della materia.

Richiamati, nelle linee generali gli aspetti metodologici delle indagini sulle costruzioni esistenti, che presentano deviazioni dal comportamento regolare, previsto nel progetto, possiamo renderci conto della portata innovatrice del processo di razionalizzazione della ispezione dei ponti ferroviari, impostato dalla Direzione Infrastruttura delle Ferrovie dello Stato con il progetto "Domus" e attuato dal CNIM.

Premesso che le opere d'arte in questione superano il numero di 44.000, emerge la importanza della caratterizzazione di ogni opera attraverso la corrispondente scheda anagrafica, che raccoglie, in modo organico, tutte le informazioni corrispondenti, continuamente aggiornate con le sintesi delle ispezioni effettuate. È quindi garantita l'anamnesi di ciascun manufatto.

Inoltre le schede consentono elaborazioni statistiche, di grande interesse e utilità, in particolare per migliorare la qualità delle opere future, tenuto conto delle esperienze acquisite su quelle esistenti. Per la redazione delle schede anagrafiche è stato messo a punto un apposito criterio di classificazione delle opere d'arte, articolato in famiglie e macrofamiglie.

Per quanto riguarda la descrizione delle varie patologie e dei sintomi corrispondenti, che ne consentono la diagnosi, è stato redatto un documento – il catalogo difetti – che, in maniera sistematica e innovativa, per ciascun tipo di difetto, ne espone la genesi, le cause e le manifestazioni. Si tratta di una impostazione rigorosa, che inquadra ciascun processo patologico con chiarezza, favorendo la formulazione della diagnosi corrispondente. Il documento fornisce inoltre informazioni pratiche sul tipo di strumentazione eventualmente necessaria per la individuazione del difetto, nonché criteri di valutazione dell'intensità dei difetti e delle anomalie, tramite il fattore  $K_{2i}$  di intensità del danno sul singolo elemento strutturale.

Il riferimento al fattore  $K_{2i}$  introduce a un altro aspetto qualificante del progetto Domus, quello della definizione di un algoritmo per la valutazione del degrado dei ponti ferroviari.

Tale algoritmo ha lo scopo di fornire un giudizio globale su una data opera d'arte, che permetta la individuazione degli eventuali interventi successivi, tramite l'aggregazione di giudizi parziali (fattore di importanza, fattore di intensità, fattore di estensione, fattore di urgenza).

Grazie a questo procedimento è possibile pervenire agevolmente alla valutazione delle condizioni di salute di una struttura danneggiata e ciò costituisce un risultato tanto più apprezzabile, in quanto la valutazione suddetta non richiede una specifica esperienza sulle costruzioni esistenti da parte dell'operatore, ma è calibrata in base ai pareri di professionisti esperti.

In base al valore del parametro il danno totale  $S$ , rapporto fra la somma effettiva dei valori del danno calcolato e la somma di riferimento, ottenuta adottando i valori massimi dei fattori di intensità ed estensione, vengono distinte le opere considerate integre, da sottoporre a ispezioni periodiche, da quelle che, a causa dello stato di degrado, richiedono ispezioni speciali, con la esecuzione di tutte le prove necessarie per completare lo studio delle anomalie riscontrate. Precisamente, quando l'indicatore numerico del danno dà segnali di rischio, il proseguimento delle indagini è affidato a un apposito "Comitato Tecnico di Gestione FS", che procede a tutte le verifiche di sicurezza e alle prove integrative ritenute necessarie. Una volta attuati i provvedimenti correttivi, l'opera rientra nelle procedure normali di ispezione periodica e di manutenzione, mentre la sequenza temporale dei vari interventi viene registrata sulla scheda anagrafica.

La gestione delle operazioni connesse con le varie attività del progetto Domus è assicurata da un apposito software, a sua volta in grado di integrarsi con il sistema informativo delle FS.

Le considerazioni precedenti, pur nella loro esposizione sintetica, hanno messo in evidenza gli aspetti scientifici del progetto Domus, in armonia con il progresso delle conoscenze nel campo della sicurezza e della durabilità delle strutture in generale e dei ponti ferroviari in particolare.

Il requisito della durabilità esteso alla intera durata della vita del servizio delle opere d'arte, richiede, caso per caso, la messa a punto di adeguate strategie di manutenzione, che, a loro volta, utilizzano, in maniera sistematica, procedure di ispezione agili e affidabili.

# Indice analitico

## A

- A. Kolmogorov, 72
- accelerometri, 306
- accuratezza, 272
- achieved availability (*disponibilità raggiunta*), 25
- acquisizione dati, sistemi integrati per l'acquisizione, 274
- Adaptive Control of Constraints (ACC), 341
- Adaptive Control of Optimization (ACO), 342
- adattamento, ordine dell', 217
- addestramento non supervisionato, 179
  - supervisionato, 179
- Adjusted Internal Rate of Return (AIRR), 55, 60, 66
- Administrative Delay Time (ADT), 24
- affidabilità, 20
  - dei dati, 272
  - strutturale, 83
- Advanced Second Moment Method (ASM), 85
- affidabilità, modellizzazione della, 112
- affidabilità, modellizzazione per diagrammi a blocchi di, 112
- albero dei guasti, 146
  - delle decisioni, 160
- algoritmi genetici, 178, 212
- algoritmo parametrizzato, 178
- alternativa migliore, 236
- AMDEC, 96
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 318
- analisi al microscopio, 327
- Analisi Costi-Benefici (ACB), 48
- Analisi Costi-Efficacia (ACE), 48
- analisi
  - dei contaminanti, 324
  - dei detriti da usura, 324
  - dei modi di guasto e degli effetti, 93
  - del costo del ciclo di vita, 54
  - del lubrificante, 296, 308
  - delle contingenze, 154
  - delle proprietà del fluido, 324
  - delle vibrazioni, 300
  - di sensitività, 116
  - FMECA, stima dei tempi, 111
  - statistica, 13
- analyse de mode, de défaillance, de leur effects e de leur criticité, 96
- annidamento (block nesting), funzione di, 132
- annually recurring costs, 60
- appartenenza, funzione di, 204
- approvvigionamenti di materiali tecnici, 239
- aritmetica fuzzy, 205
- asse spaziale, 284
  - temporale, 284
- attività critiche, 243
- attrezzature di supporto e di ispezione, 234
- attualizzazione, 63

## B

- banda di confidenza, 74
- base case, 61
- base date, 61
- base di conoscenza, 225
- base year, 61
- basic event, 147
- Bayes, teorema di, 16
- Bernoulli, distribuzione di, 18
- bias, 188
- blocchi
  - finali, 125
  - iniziali, 125
  - intermedi, 125
  - isolati, 125

- branch & bound, 253
- branch & cut, 253
- breakdown maintenance, 42, 51
- budget,
  - fase economica, 237
  - fase tecnica, 236

## C

- calorimetria, 299
- cambiamenti di stato, 163
- campionamento, regola di, 78
- capacità manutentiva, 233
  - manutentiva pianificata massima, 233
- cash flow, 61
- categoria di severità, 101
- causa, 142
- cause comuni di guasto, 28
- cepstrum analysis, 306
- cibernetica, 11
- classificazione
  - dei dati, 269
  - dei guasti, 50
- column generation, 253
- combined Generator, 79
- Common Cause Failures (CCF), 28
- complessità
  - ambientale, 113
  - intrinseca, 113
- componente, 70
- Computer Numerical Control (CNC), 341
- Condition Based Maintenance (CBM), 44
- condition monitoring, 296
- conditional expectation, 85-86
- condizione
  - di funzionamento, 163
  - di guasto, 163
- condizioni
  - di blocking, 254
  - no wait, 254
- conseguenza, 142
- controllo
  - adattivo (AC), 341
  - diagnostico, 208
- costi
  - affondati, 64
  - rilevanti, 64
- costo
  - unitario totale variabile rispetto al tempo, 246
  - elementi di, 58
- Craft Performance (CP), 290
- Craft Service Quality (CSQ), 290

- Craft Utilization (CU), 290
- Critical Path Method (CPM), 244
- criticità, analisi delle, 102
- criticità
  - funzionale, 240
  - logistica, 240
- cromatografia a strato sottile, 327
- cromosomi, 213
- cross block, 125
- crossover, 218
  - genetico, 178
- curva a vasca da bagno, 22

## D

- Data Concentrators (DCs), 339
- decision tree, 160
- definizione dei tempi e degli orari, 252
- delta di Dirac, 77
- densità di probabilità della manutenibilità, 26
- descrizione grafica dei dati, 270
- Design for Maintainability (DFM), 117
- Design for Reliability (DFR), 117
- detector magnetico, 326
- detriti da usura (*debris*), 50
- deviazione, 142
- diagrammi
  - child, 132
  - parent, 132
- differenza di spettri, 306
- Direct Reading (DR), 329
- discard policy, 166
- discount
  - factor, 61
  - rate, 61
- Discounted Payback (DPB), 67
- dispatching delle attività, 264
- disponibilità, 24, 289
- distribuzioni
  - continue, 77
  - di probabilità discrete, 77
- durata
  - economica, 244
  - fisica, 244
  - funzionale, 244

## E

- earliest due date, 263
- economic life, 61
- effetto
  - matrice, 333
  - transitorio, 114
- EIREDA-98, 281

end block, 125  
 energia di punta, 305  
 esperimento, 70  
 esponenziale, distribuzione, 18  
 euristiche  
 – procedure, 257  
 – tecniche, 223  
 european industry reliability data bank, 281  
 Event Tree Analysis (ETA), 159  
 eventi  
 – insieme completo degli, 15  
 – spazio degli, 15  
 expert systems, 223

**F**

fabbisogni, pianificazione dei, 232  
 failure avoidance, 43  
 failure mode effect analysis, 93  
 failure oriented, 45  
 Failure Reporting Analysis and Corrective Actions (FRACAS), 274  
 fattori correttivi, 103  
 Fault Tree Analysis (FTA), 28, 146  
 fenotipo, 213  
 ferrografia, 324  
 ferrogramma, 324  
 ferroscozio, 331  
 first come - first served, 263  
 First Order Reliability Method (FOR), 85  
 Fisher, test di, 269  
 fitness, 213  
 Flexible Manufacturing System (FMI), 341  
 flip, 220  
 FMEA, 93  
 – diagramma di flusso della, 101  
 – glossario della, 99  
 FMEA/FMECA, modulistica, 107  
 FMECA, 277  
 – di processo, 96  
 – di progetto, 96  
 forma d'onda nel tempo, 305  
 formazione del personale, 38  
 Fourier Transform-Infrared Spectroscopy (FT-IR), 335  
 frequenza, 301  
 – armonica, 301  
 – fondamentale, 301  
 – predominante, 301  
 – relativa, 14  
 FTA, simbologia, 148  
 Functional Block Diagram (FBD), 100  
 funzione

– di densità del campionamento, 86  
 – di densità della probabilità congiunta, 85  
 – di un sistema, 5  
 – importanza, 86  
 – obiettivo, 213  
 future value, 61  
 fuzzy logic, 177

**G**

gate, 146  
 Gauss, distribuzione di, 18  
 Geometrical Adaptive Control (GAC), 342  
 gestione  
 – a fabbisogno, 241  
 – a scorta, 241  
 Government/Industry Data Exchange Program (GIDEP), 269  
 guasto  
 – catastrofico, 51  
 – condizionale, 45, 50  
 – di prima specie, 120  
 – di seconda specie, 120  
 – imminente, 297  
 – improvviso, 51  
 – incipiente, 50, 297  
 – tasso di, 26

**H**

hard time maintenance, 43  
 hard-limiter, 187  
 hazard, 135  
 Hazard and Operability Analysis (HAZOP), 135  
 – glossario della metodologia, 142  
 Hebb, legge di apprendimento di, 185

**I**

importance sampling, 85  
 inaffidabilità, 21, 121  
 indici  
 – valutazione degli, 291  
 – della sicurezza, 286  
 – di efficacia, 286  
 – di efficienza, 286  
 – di struttura organizzativa, 286  
 – generali, 286  
 – globali, 284  
 – particolari, 284  
 indisponibilità, 25  
 Inductively Coupled Plasma (ICP), 332  
 Information Technology (IT), 341

informazioni, raccolta di, 39  
 inherent availability (disponibilità intrinseca), 24  
 initial investment costs, 61  
 insieme  
 –  $\alpha$ -cut, 204  
 – crisp, 204  
 – fuzzy, 204  
 insolubili, 339  
 intelligenza artificiale, 223  
 interazione, 215  
 Internal Rate of Return (IRR), 61  
 intervento, 143  
 intreccio a cascata (waterfall plot), 306

**J**

job, 253

**K**

Key Performance Indicator (KPI), 284  
 knowledge-based systems, 223

**L**

lagged Fibonacci generator, 79  
 lateness, 254  
 – massima, 255  
 LCCA  
 – le regole della, 62  
 – terminologia, 59  
 legge  
 – dei grandi numeri, 16  
 – della varietà necessaria, 7  
 – di Ashby, 7  
 – empirica del caso, 16  
 Levenberg-Marquardt, algoritmo di, 197  
 Life Cycle Cost (LCC), 61  
 Life Cycle Cost Analysis (LCCA), 61  
 linear congruential generator, 79  
 livello  
 – di picco, 305  
 – di prestazioni (efficienza produttiva), 289  
 – di qualità della produzione, 289  
 logica  
 – crisp, 204  
 – fuzzy, 202  
 – sfumata, 177, 202  
 Logistic Delay Time (LDT), 24  
 longest processing time, 263  
 Lord Rayleigh, 72

**M**

MAGEC, 96, 98  
 Maintenance Steering Group (MSG), 36  
 makespan, 255  
 Mann e Whitney, test di, 75  
 manodopera, 233  
 manutenibilità, 25, 34  
 manutenzione  
 – a guasto o correttiva, 42  
 – budget di, 236  
 – costo globale di, 48  
 – correttiva, costo di, 245  
 – indici di, 284  
 – migliorativa, 34-35, 45  
 – non programmata, 35  
 – on-condition, 43  
 – piani di, 233  
 – pianificazione della, 230  
 – predittiva, 35, 36, 45  
 – preventiva (preventive maintenance), 35, 42  
 – preventiva, costo di, 245  
 – produttiva, 34, 40, 45  
 – programmata, 35  
 – strategia di, 47  
 – su condizione (CBM), 36  
 Markov  
 – catene di, 162  
 – ipotesi di, 162  
 – modello di, 167  
 – processi di, 162  
 massimo tempo di completamento, 255  
 Master Maintenance Schedule (MMS), 240  
 Master Production Schedule (MPS), 240  
 materiali di consumo, 239  
 matrice di criticità, 103  
 Mean Active Maintenance Time (MAMT), 24  
 Mean Down Time (MDT), 24  
 Mean Time Between Failures (MTBF), 24  
 Mean Time To Failure (MTTF), 23  
 Mean Time To Repair (MTTR), 26  
 Mean Up Time (MUT), 24  
 metodi manuali, 256  
 metodo laser-olografico, 308  
 Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 339  
 microscopio a televisione, 327  
 Minimal Cut Set (MCS), 147  
 Minimum Acceptable Rate of Return (MARR), 67  
 misura delle prestazioni, 70  
 misure descrittive, 270  
 Multi Layer Perceptron (MLP), 195

modellizzazione RBD, 117  
 modello, 70  
 modi e analisi dei guasti e delle loro criticità, 96  
 modulo  
 – de-fuzzy, 208  
 – fuzzy, 208  
 molteplicità di un sistema, 6  
 monitoraggio  
 – dei detriti da usura (debris), 44  
 – del calore, 299  
 – della distribuzione del particolato, 328  
 – della performance, 297  
 – della rispondenza alle specifiche, 44  
 – delle vibrazioni, 296  
 – delle vibrazioni e del rumore, 44, 298  
 – del particolato da usura (wear debris), 298  
 – in linea, 328  
 – multi-channel delle deviazioni, 308  
 – visivo, 44, 297  
 – tecniche di, 297  
 Monte Carlo, metodo, 72  
 motore  
 – fuzzy, 208  
 – inferenziale, 225  
 Machinery Prognostics/Diagnostics System (MPROS), 339  
 MSG-1, 36  
 MSG-2, 36  
 mutazione, 215, 218

## N

Net, 185  
 Net Benefits (NB), 65  
 net input, 185  
 Net Savings (NS), 55, 61, 65  
 nodo, 142  
 non memoria, 22  
 nonelectronic parts reliability data, 281  
 normativa  
 – IEC 61165, 171  
 – IEC 61508, 162, 171  
 notazione di Graham, 255  
 note, 143  
 NPRD-95, 281  
 numeri  
 – pseudo-random, 79  
 – quasi-random, 79  
 – random, 78  
 – random, generatore di, 78  
 – random, generatori aritmetici di, 79  
 numero

– di criticità della parte o della apparecchiatura, 103  
 – di criticità per modo di guasto, 103

## O

offshore reliability data, 281  
 oggetti critici, 236  
 olismo, 11  
 operability, 135  
 Operating, Maintenance and Repair (OM&R) Costs, 61  
 operational availability (disponibilità operativa), 25  
 optoelettronica, misurazione, 342  
 OREDA-2002, 281  
 ottimizzazione, 178  
 – analitica, 257  
 – con inserimento di procedura euristica, 257  
 outsourcing, 292  
 Overall Craft Effectiveness (OCE), 290  
 Overall Equipment Effectiveness (OEE), 288

## P

parallelizzazione, 78  
 parametro di processo, 142  
 parole guida, 138, 142  
 parti di ricambio, 239  
 payback period, 55  
 Prognostics, Diagnostics, Monitoring Engine (PDME), 339  
 Pearson, coefficiente di correlazione di, 272  
 percorso critico, 243  
 periodicità dei controlli, 39  
 pianificazione e project management, 237  
 pirometro  
 – a radiazioni, 299  
 – ottico, 299  
 Planning/Construction (P/C) Period, 61  
 Poincaré, 12  
 Poisson, distribuzione di, 18  
 politica manutentiva, 35  
 power spectrum, 306  
 predictive limits, 320  
 preemption, 250  
 present value (present worth), 61, 62  
 prestazioni, degrado delle, 174  
 proactive limits, 319  
 proactive maintenance, 34, 45, 50  
 probabilità  
 – classica, 14  
 – condizionale, 15  
 – cumulata di guasto complessiva, 121

– delle cause, teorema della, 16  
 – funzioni di distribuzione della, 78  
 – teoria della, 13  
 – totali, teorema delle, 15  
 – soggettiva, 14  
 Problems Reporting Analysis and Corrective Action System (PRACAS), 278  
 processi markoviani, 26  
 professionalità della manodopera, 114  
 progetto Manhattan, 72  
 programmazione  
 – a capacità finita, 248  
 – a capacità infinita, 248  
 – a vincoli (constraint programming), 252  
 – dinamica, 253  
 Project Evaluation and Review Technique (PERT), 24

## Q

qualità dei lavori, 114

## R

random, 220  
 rank selection, 218  
 rateo di guasto, 87  
 Real Time Actual Condition Knowledge (RTAK), 341  
 Real-Time DataBase (RTDB), 282  
 registratore magnetico a nastro, 307  
 Reliability Block Diagram (RBD), 112, 115  
 Reliability Centered Maintenance (RCM), 35, 38  
 residual value, 62  
 resume policy, 166  
 rete  
 – effetto di, 185  
 – input di, 185  
 reticolari, tecniche, 241  
 reti neurali, 178  
 ricerca locale, 253  
 riconfigurazioni del sistema, 114  
 ridondanza, 9  
 – attiva, 30  
 – passiva, 30  
 riduzione della varianza, tecniche di, 78  
 rilevabilità del guasto (detectability), 104  
 riparazione, tasso di, 26  
 ripartizione, funzione di, 17  
 riproduzione, 215, 218  
 Risk Priority Number (RPN), 104  
 rnd, 220

Root Mean Square (RMS), 304  
 Rotating Disk Electrode (RDE), 332  
 routing, 253

## S

Savings-to-Investment Ratio (SIR), 55, 62, 66  
 scala di riferimento, 270  
 schedulazione, 250  
 – a macchina singola, 250  
 – a macchine parallele, 251  
 – ammissibile, 249  
 – della manutenzione, 262  
 – della produzione, 262  
 – flow shop, 251  
 – funzioni obiettivo, 255  
 – job shop, 251  
 – open shop, 251  
 – ottima, 249  
 – risoluzione dei problemi di, 256  
 scorrimenti, 243  
 selezione  
 – elitista, 218  
 – innaturale, 216  
 semi-markoviani, processi, 163  
 sensitività (sensibilità), 272  
 sensore intelligente, 342  
 separatore di fascio (beam splitter), 337  
 service date, 62  
 shift register generator, 79  
 Shock Pulse Method (SPM), 305  
 shortest processing time, 263  
 sigmoidal function, 188  
 signature, 302  
 Simon H.A., 8  
 Simple Payback (SPB), 67  
 Simple Payback (SPB) Period, 62  
 simulatore stocastico, 75  
 simulazione, 71  
 – forzata, 83  
 – ingegneristica, 70  
 sinapsi, peso della, 184  
 SIR (*Savings-to-Investment Ratio*), 55  
 sistema, 70  
 – a ingresso, 6  
 – a uno stato, 4  
 – adattivo, 6  
 – aperto, 3  
 – a scopo, 5  
 – attivo, 4  
 – autodeterminista, 5  
 – autonomo, 4  
 – chiuso, 3

- dinamico, 4
- identificazione e suddivisione del, 39
- multiobiettivo, 5
- multistato, 4
- obiettivo, 5
- omeostatico, 4
- reattivo, 4
- risponditore, 4
- statico, 4
- ultrastabile, 9
- sistemi
  - affidabilità dei, 13
  - analisi dei, 39
  - astratti, 2
  - classificazione dei, 5
  - concreti, 3
  - di monitoraggio multi-channel, 339
  - di protezione, 142
  - esperti (SE), 223
  - non ridondanti, 29
  - serie, 29
  - stand by, 32
- slack, 243
- soft-computing, 177
- soluzioni alternative, 236
- spazio di stato, 71
- spectrometric oil analysis procedures, 328
- spectrum analysis (analisi di spettro), 305
- spettro, 302
  - di riferimento (signature spectrum), 305
- spettrometria, 326
- spettrometro
  - a emissione, 332
  - a raggi X (XRF), 335
  - ad assorbimento atomico (AAS), 334
- start block, 125
- statistica, 13
- statistical limits, 321
- stima
  - dell'errore, 78
  - delle grandezze, 78
- strategia, 39
  - di contratto della fornitura, 114
  - manutentiva, 35
- stringhe, 212
- stroboscopio, 307
- strumenti titolatori, 339
- strumento
  - a lettura diretta, 329
  - analizzatore, 330
- study period, 62
- sunk cost, 64

Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA), 281  
 System Work Breakdown Structure (SWBS), 39

## T

- TAN-TBN, 338
- tangente iperbolica, 188
- tardiness, 255
  - massima, 255
- task, 253
- tasso
  - di guasto, 21, 87
  - di interesse, 62
  - di sconto, 63
  - di transizione, 163
- Technological Adaptive Control (TAC), 341
- Tecnica di Ossidazione Selettiva (TOS), 331
- tempi di set up, 253
- tempo di completamento, 254
  - somma pesata, 255
- teoria
  - degli algoritmi genetici, 11
  - dei rinnovi, 244
  - del caos, 11
  - dell'affidabilità, 13
  - delle catastrofi, 11
  - frequentista, 14
  - generale dei sistemi, 11
  - sui meccanismi riproduttivi cellulari, 11
- termocoppie, 299
- termografia, 299
- termometro resistivo, 299
- test di assorbimento dell'olio usato, 327
- threshold logic, 187
- time based maintenance, 43
- timetabling, 252
- titan handbook, 268
- top event, 146
- Total Productive Maintenance (TPM), 34, 40
- tournament selection, 218
- traiettoria, 163
- transazioni, 163
- trasduttori di velocità, 307
- trasferimento, funzione di, 186
- trasformata inversa, 75

## U

Ulam, 72

## V

- validazione, 71
- variabile
  - aleatoria, 16
  - di controllo, 86
- variabilità del livello di fornitura richiesto, 114
- varianza, riduzione della, 85
- varietà di un sistema, 6
- velocità, 301
- vettore di stato, 71
- vettorizzazione, 78
- vibrazione, carte della severità di, 304
- vincoli di precedenza, 254
- viscosimetro, 338
- viscosità, 338
- Von Neumann, 72

## W

- Weaver Warren, 8
- Weibull, distribuzione affidabilistica di, 23
- weighted longest processing time, 263
- weighted shortest processing time, 263
- Work Breakdown Structure (WBS), 237

## Z

- Zadeh, complessità di, 202