

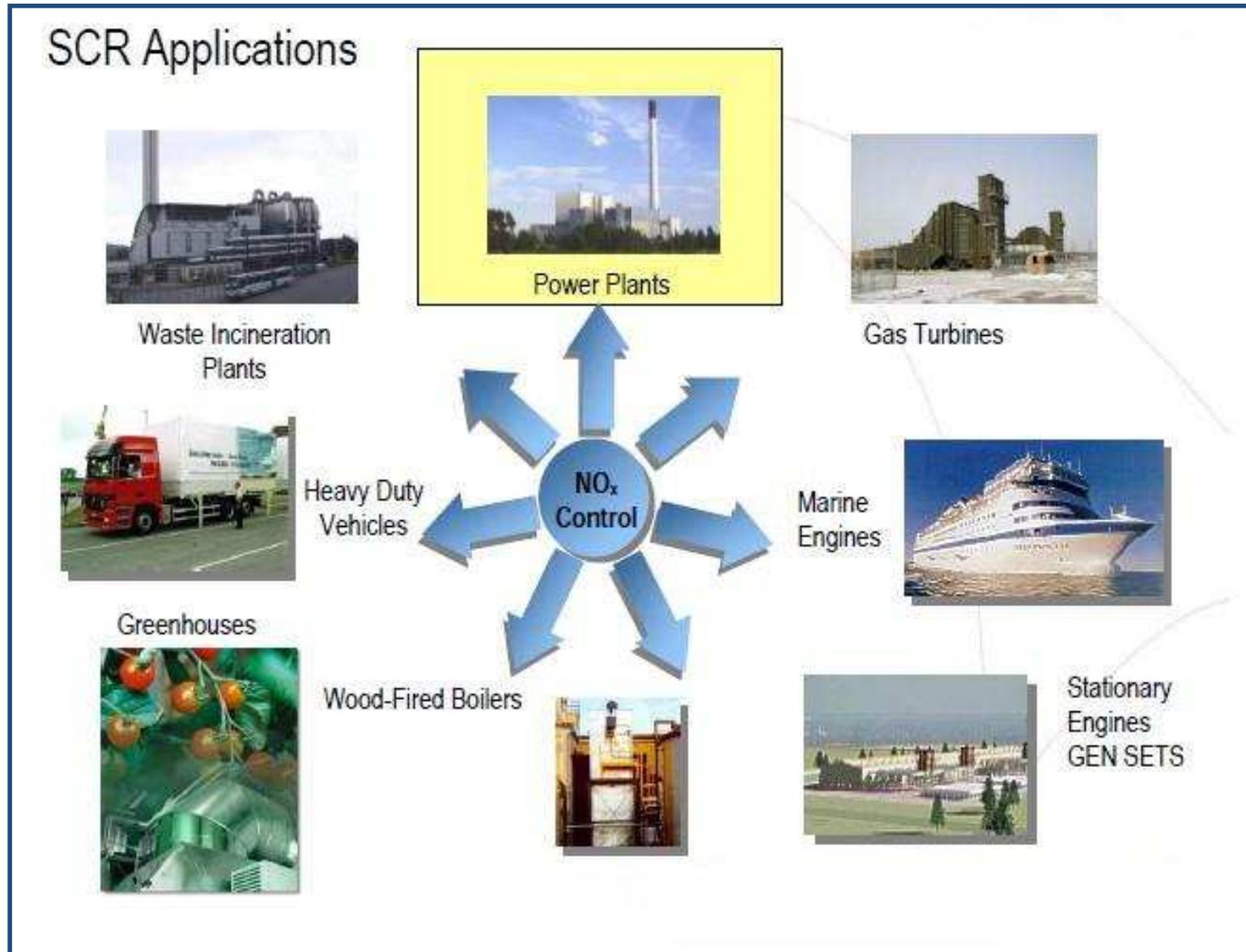
Gli Impianti DeNO_x

Dott. Ing. Roberto Lauri

**Inail, Settore Ricerca, Verifica e Certificazione
Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti,
Prodotti ed Insediamenti Antropici**

E-mail: r.lauri@inail.it

Campi di applicazione del processo SCR



Limiti di emissione degli NO_x per le centrali termoelettriche a vapore: D. Lgs. 152/06

Valori limite di emissione degli NO_x (tenore di O₂ di riferimento: 6% per i combustibili solidi, 3% per quelli liquidi e gassosi) per impianti esistenti

Combustibile solido

Potenza termica nominale (P) (MW)	Valore limite di emissione NO _x (mg/Nm ³)
50 ≤ P < 500	600
P ≥ 500	200 

Combustibile liquido

Potenza termica nominale (P) (MW)	Valore limite di emissione NO _x (mg/Nm ³)
50 ≤ P < 500	450
P ≥ 500	200

Combustibile gassoso

Potenza termica nominale (P) (MW)	Valore limite di emissione NO _x (mg/Nm ³)
50 ≤ P < 500	300
P ≥ 500	200

Valori limite di emissione degli NO_x (tenore di O₂ di riferimento: 6% per i combustibili solidi, 3% per quelli liquidi e gassosi) per impianti nuovi

Combustibili solidi

Potenza termica nominale (P) (MW)	Valore limite di emissione NO _x (mg/Nm ³)
50 ≤ P < 100	400
100 ≤ P ≤ 300	200 (300 nel caso in cui il combustibile utilizzato sia costituito da biomasse)
P > 300	200 

Combustibili liquidi

Potenza termica nominale (P) (MW)	Valore limite di emissione NO _x (mg/Nm ³)
50 ≤ P < 100	400
P ≥ 100	200

Combustibili gassosi (gas naturale⁴)

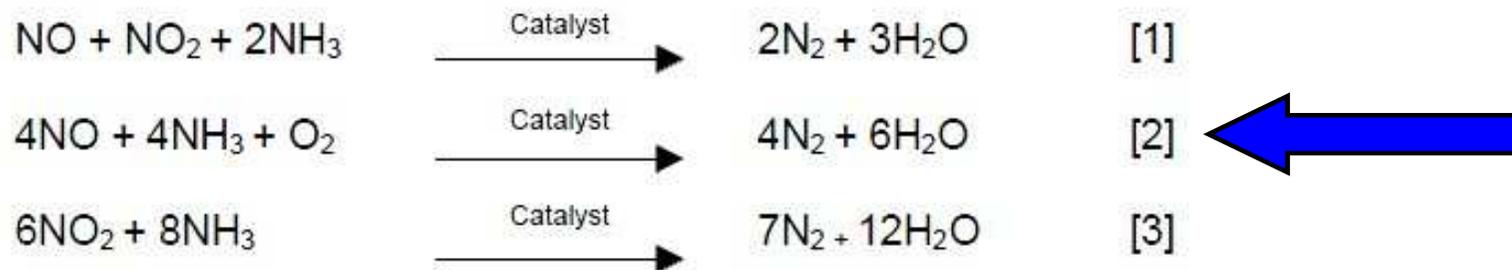
Potenza termica nominale (P) (MW)	Valore limite di emissione NO _x (mg/Nm ³)
50 ≤ P ≤ 300	150 ⁵
P > 300	100 ²

L'abbattimento degli NO_x nelle centrali termoelettriche a vapore

- Nelle centrali termoelettriche a vapore le tecnologie di regolazione del processo di combustione (**interventi primari di denitrificazione**) non sono sufficienti a garantire il rispetto dei limiti vigenti per le emissioni in aria degli NO_x ;
- E' necessario ricorrere quindi ad interventi secondari di denitrificazione (processo SCR attuato dagli impianti DeNO_x), operanti a valle del processo di combustione.

Interventi secondari di denitrificazione: il processo SCR

- Il processo di riduzione catalitica selettiva (SCR) consente di convertire gli NO_x in N_2 ed H_2O , mediante l'utilizzo di ammoniaca (reazioni di riduzione);
- Viene installato un catalizzatore all'interno del condotto fumi del generatore di vapore al fine di garantire un'adeguata cinetica di reazione (T di lavoro del catalizzatore compresa tra $260 - 420^\circ\text{C}$);
- Il termine "selettiva" si riferisce alla capacità dell'ammoniaca di reagire con NO invece di essere direttamente ossidata dall'ossigeno presente nell'aria;

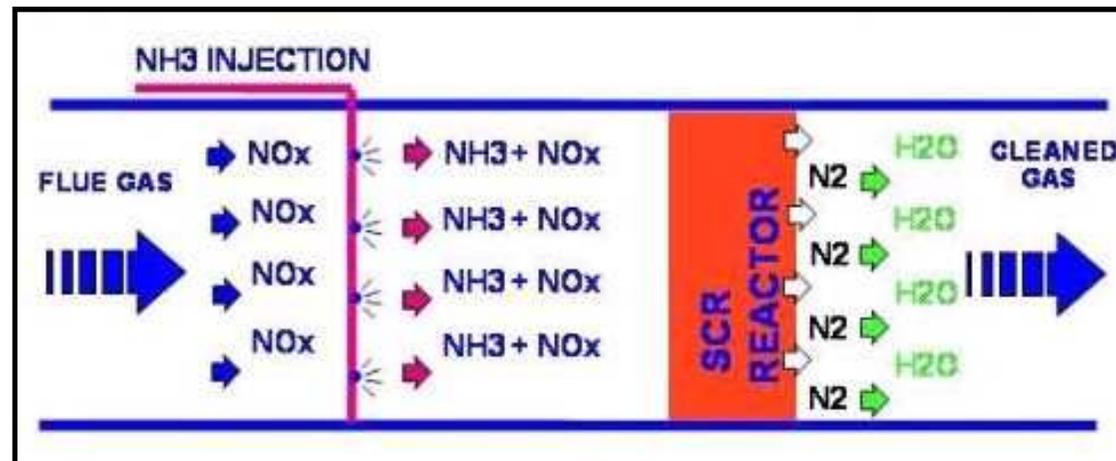


• Nei fumi prodotti dalle reazioni di combustione, che avvengono nei gruppi termoelettrici a vapore, gli NO_x sono composti per più del 90% da NO (monossido di azoto), mentre la quantità di biossido di azoto (NO_2) è pari al 5% circa.

Actual Stoichiometric Ratio (ASR)

- **ASR (rapporto tra le moli di NH₃ e le moli degli NO_x) indica la quantità realmente necessaria di NH₃ per ottenere il prefissato valore di emissione per gli NO_x (D. Lgs. 152/06);**
- ASR viene regolato in base ai seguenti parametri:
 - 1) Grado di miscelazione tra l'agente riducente (ammoniaca) e la corrente dei gas combusti (contenenti gli NO_x);
 - 2) Temperatura di esercizio;
 - 3) Tempo di residenza della miscela gassosa NH₃/fumi nel catalizzatore;
 - 4) Attività catalitica (k);
 - 5) Rilascio di ammoniaca nei fumi (**ammonia slip**), indicante la concentrazione di NH₃ nella corrente gassosa uscente dal reattore catalitico.
- **Nella reazione 2 il rapporto stechiometrico tra NH₃ e NO è pari a 1, ma, dal momento che la distribuzione dell'agente riducente nei fumi non sarà mai perfettamente omogenea, è necessario incrementare la portata di ammoniaca richiesta (ASR è circa uguale a 1,1-1,15);**

$$\bullet \text{ ASR} = \text{moli NH}_3 / \text{moli NO}_x = \frac{\eta_{\text{NO}_x} (\%) + \frac{\text{slip}_{\text{NH}_3} (\text{ppmvd})}{\text{NO}_{x\text{INLET}} (\text{ppmvd})}}{100}$$



Riduzione degli NO_x

Impianti DeNO_x: componenti

- 1) Serbatoi di stoccaggio dell'ammoniaca in forma anidra (gas liquefatto per compressione) o della soluzione acquosa di NH₃ (**la percentuale in peso dell'ammoniaca è solitamente compresa tra il 19% ed il 25%**). Attualmente in Italia negli impianti DeNO_x è previsto solamente lo stoccaggio di soluzioni ammoniacali;
- 2) Stazione di vaporizzazione;
- 3) Sezione di diluizione;
- 4) Sezione di iniezione dell'ammoniaca nei gas combusti (AIG: ammonia injection grid);
- 5) Miscelatore statico corrente riducente/fumi (static mixer);
- 6) Palette deviatrici (turning vanes);
- 7) Griglia rettificatrice (rectifier layer);
- 8) Catalizzatore;
- 9) Trombe acustiche (sonic horns) per la rimozione di composti indesiderati dalla superficie del catalizzatore.

Serbatoi di stoccaggio

• I materiali impiegati nella costruzione dei serbatoi di stoccaggio sono i seguenti (per contrastare l'insorgere di fenomeni corrosivi legati alla presenza di una soluzione acquosa di NH_3):

1) acciai strutturali saldabili in conformità alla EN 10025;

2) acciai a grana fine in conformità alla EN 10028-3;

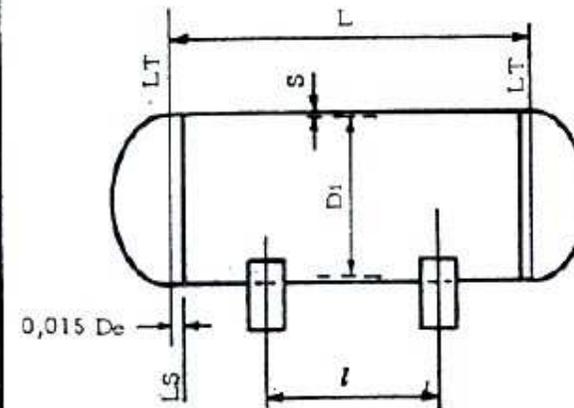
3) acciai inox austenitici stabilizzati e acciai inox austenitici con contenuto di carbonio $\leq 0,03\%$, conformemente alla EN 10028-7 (acciai AISI 304 L, acciai AISI 316 L);

• **Pressioni di stoccaggio : 2-4 bar (soluzione ammoniacale), 17-20 bar (ammoniaca anidra).**

Serbatoi di stoccaggio: caratteristiche geometriche

- Vengono impiegati generalmente serbatoi ad asse orizzontale, posizionati su ancoraggi di supporto per bilanciare le oscillazioni dovute all'azione del vento e le vibrazioni prodotte da eventuali eventi sismici.

Capacità m^3	D_i mm	L mm	l mm	S_{min} mm
1	800	2.000	1.200	5
2	1.000	2.500	1.500	5
3	1.200	2.500	1.500	5
5	1.300	3.500	2.100	6
10	1.600	4.500	3.100	6
15	1.800	5.500	4.200	6
20	2.000	6.000	4.700	6
25	2.200	6.000	4.700	7
30	2.400	6.500	5.200	7
50	2.800	8.000	6.600	8
100	3.200	12.000	10.400	10



LT = linea di tangenza

LS = linea di saldatura

Esempi di serbatoi di stoccaggio installati in gruppi termoelettrici a vapore



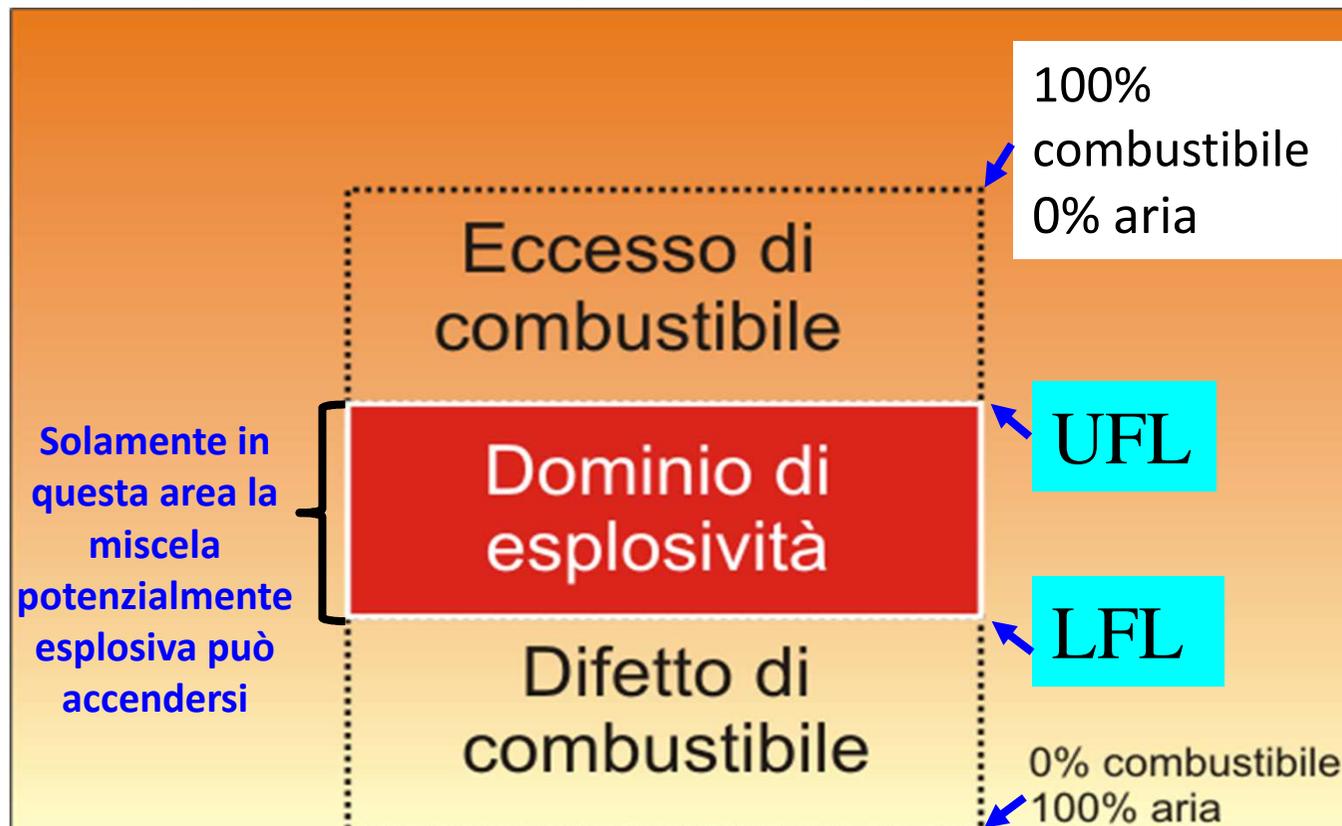
Serbatoi di stoccaggio della soluzione ammoniacale

Pericolosità dell'ammoniaca

- Facendo riferimento al Regolamento (CLP) CE n°1272/2008, l'ammoniaca è caratterizzata dalle seguenti indicazioni di pericolo:
- H 221 (**gas infiammabile**);
 - H 314 (provoca gravi ustioni cutanee e gravi lesioni oculari);
 - H 331 (tossico se inalato).
- Affinchè si verifichi l'accensione (esplosione) di una nube di vapori di NH₃ devono essere verificate contemporaneamente le 3 seguenti condizioni:
- 1) presenza del comburente (**ossigeno presente nell'aria**);
 - 2) **concentrazione della sostanza infiammabile compresa all'interno del suo campo di infiammabilità;**
 - 3) sorgente efficace di innesco, cioè in grado di fornire l'energia di attivazione alla miscela potenzialmente esplosiva.

Campo di infiammabilità

- L'esplosione di un composto gassoso infiammabile può avvenire solamente se la sua concentrazione in aria è compresa tra il limite inferiore di infiammabilità (LFL: Lower Flammability Limit) e il limite superiore di infiammabilità (UFL: Upper Flammability Limit);
- L'ammoniaca ha un campo di infiammabilità compreso tra il 15% (v/v) ed il 33% (v/v);
- La miscela (nube) potenzialmente esplosiva è composta da aria e vapori di NH_3 .



Serbatoi di stoccaggio della soluzione ammoniacale: dispositivi di sicurezza (Norma UNI EN 12952-14)

- **Dispositivi di protezione dalle sovrappressioni (il serbatoio deve lavorare a p inferiori a quella di progetto)**: si installano due valvole di sicurezza indipendenti (la pressione di intervento della valvola è minore di quella di progetto), ognuna delle quali è provvista a monte di una valvola di intercettazione, in modo che, anche durante le operazioni di manutenzione, vi sia almeno una valvola di sicurezza attiva (Norma UNI EN 12952-14);
- **Dispositivi di protezione finalizzati a fronteggiare condizioni di eccessivo riempimento**: si ricorre a due sistemi di controllo/allarme dell'eccessivo riempimento tra loro indipendenti:
 - 1) **Un sistema di controllo di alto livello con preallarme (LAH)**;
 - 2) **Un sistema di allarme e blocco automatico per altissimo livello (LAHH)**;
 - 3) **Un sistema di controllo con allarme e blocco sulla valvola di intercettazione, posta sulla tubazione in ingresso al serbatoio, indipendente dalle misure già previste (per fronteggiare eventuali guasti contemporanei dei due sistemi)**;
- **Bacino di contenimento per fronteggiare eventuali perdite da serbatoi o da elementi**: deve essere realizzato con materiale impermeabile e con bassa conducibilità termica (cemento) al fine di ridurre la trasmissione di calore dal terreno verso il liquido accumulato. Il fondo del bacino deve essere dotato di un'adeguata pendenza (>1%) in modo da convogliare la soluzione ammoniacale in un pozzetto di raccolta, dotato di rilevatori (uno in funzione e l'altro in stand-by), che attivino un allarme locale, sonoro e visivo in sala controllo (tempestività della rilevazione e quindi dell'intervento delle misure di sicurezza).

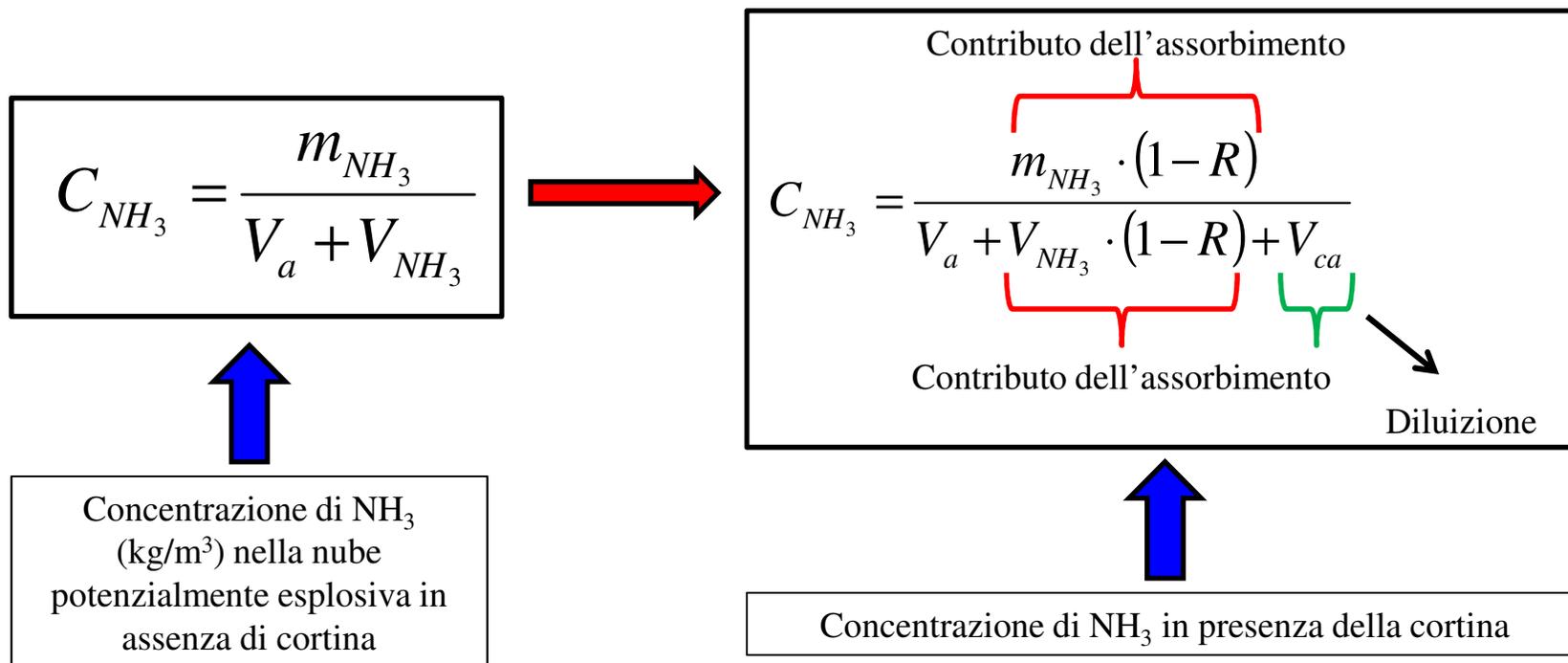
Misure di sicurezza applicabili ai bacini di contenimento: le cortine di acqua

Rilasci di soluzione ammoniacale nel bacino dovuti a fessurazioni nei serbatoi, nelle tubazioni o a perdite da valvole, flange, etc. (formazione di una pozza)



Formazione di vapori (nube) di NH_3 tossici ed infiammabili (rischio di esplosione) in seguito all'evaporazione dell'ammoniaca (NH_3 è molto più volatile dell'acqua) dalla pozza

➤ Le cortine di acqua, applicabili lungo il perimetro del bacino, consentono di abbattere i vapori di ammoniaca (viene ridotta la loro concentrazione in aria) attraverso la diluizione con aria richiamata (V_{ca}) dagli ugelli erogatori dell'acqua e l'assorbimento (NH_3 ha una marcata solubilità in acqua);



➤ Si verifica un assorbimento ($R < 1$) di NH_3 pari al 80%, per concentrazioni in aria $> 2\%$ in volume, considerando un rapporto tra la portata di acqua erogata e quella dell'ammoniaca superiore a 70;

➤ η_{ca} (efficienza della cortina) = portata massica di NH_3 abbattuta/portata massica di acqua erogata;

Cortina di acqua: applicazione ai serbatoi di stoccaggio della soluzione ammoniacale

- L'aria di diluizione viene richiamata dalla quantità di moto del getto di acqua in pressione (10-12 bar) erogata dalla cortina.



Altre misure di sicurezza applicabili ai bacini di contenimento: l'impianto schiuma

- In caso di rilasci di soluzione ammoniacale nel bacino è l'ammoniaca a passare più rapidamente in fase gassosa, in quanto ha una T di ebollizione ($T_{eb} = -33^{\circ}\text{C}$) nettamente inferiore rispetto all'acqua;
- Per inibire l'evaporazione (conseguente riduzione della formazione dei vapori) dell'ammoniaca dalla soluzione rilasciata (formazione di una pozza) nel bacino in caso di perdite si può ricorrere ad un sistema di immissione di schiuma nel bacino (copertura della pozza).



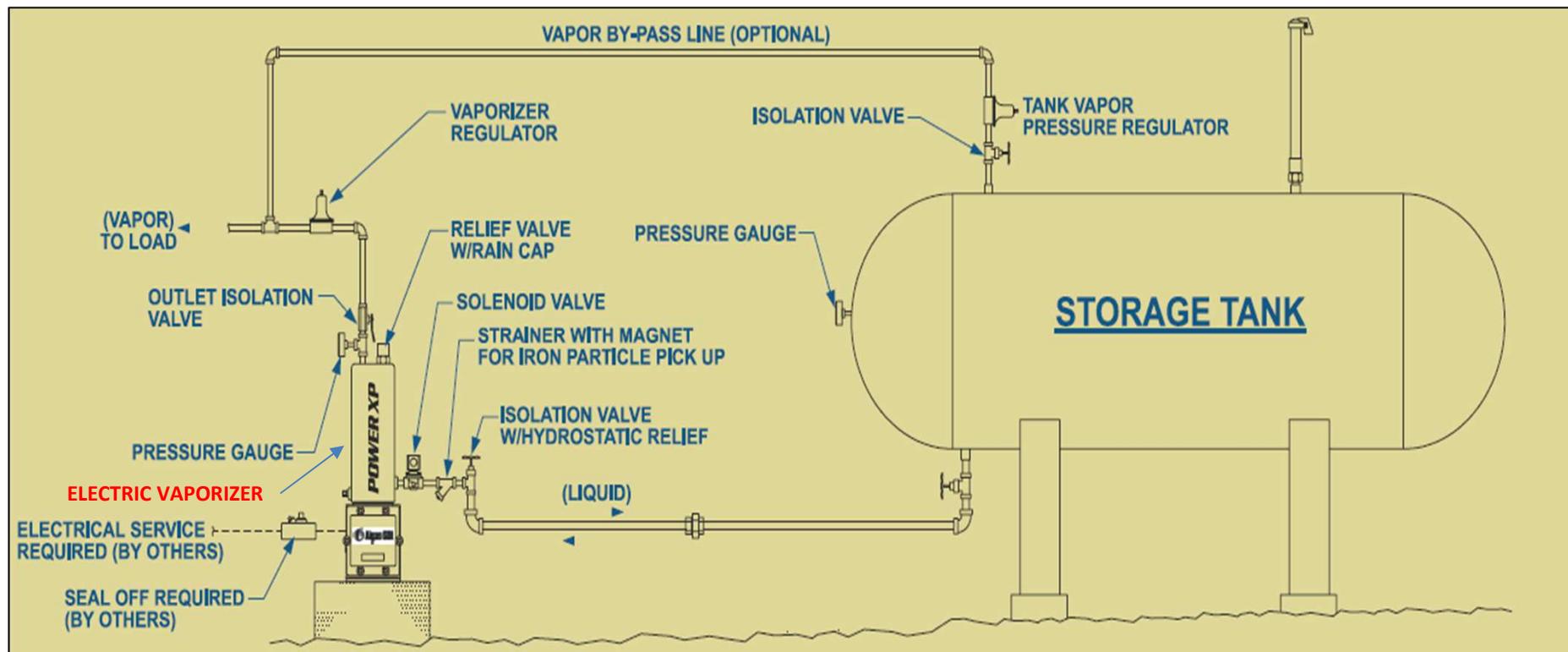
Sistema di immissione della schiuma nel bacino

Modalità di vaporizzazione della soluzione acquosa di NH_3

- 1) Produzione dei vapori di NH_3 mediante vaporizzatore elettrico;
- 2) Produzione dei vapori di NH_3 mediante aria preriscaldata elettricamente;
- 3) Produzione dei vapori di NH_3 mediante vapore di processo.

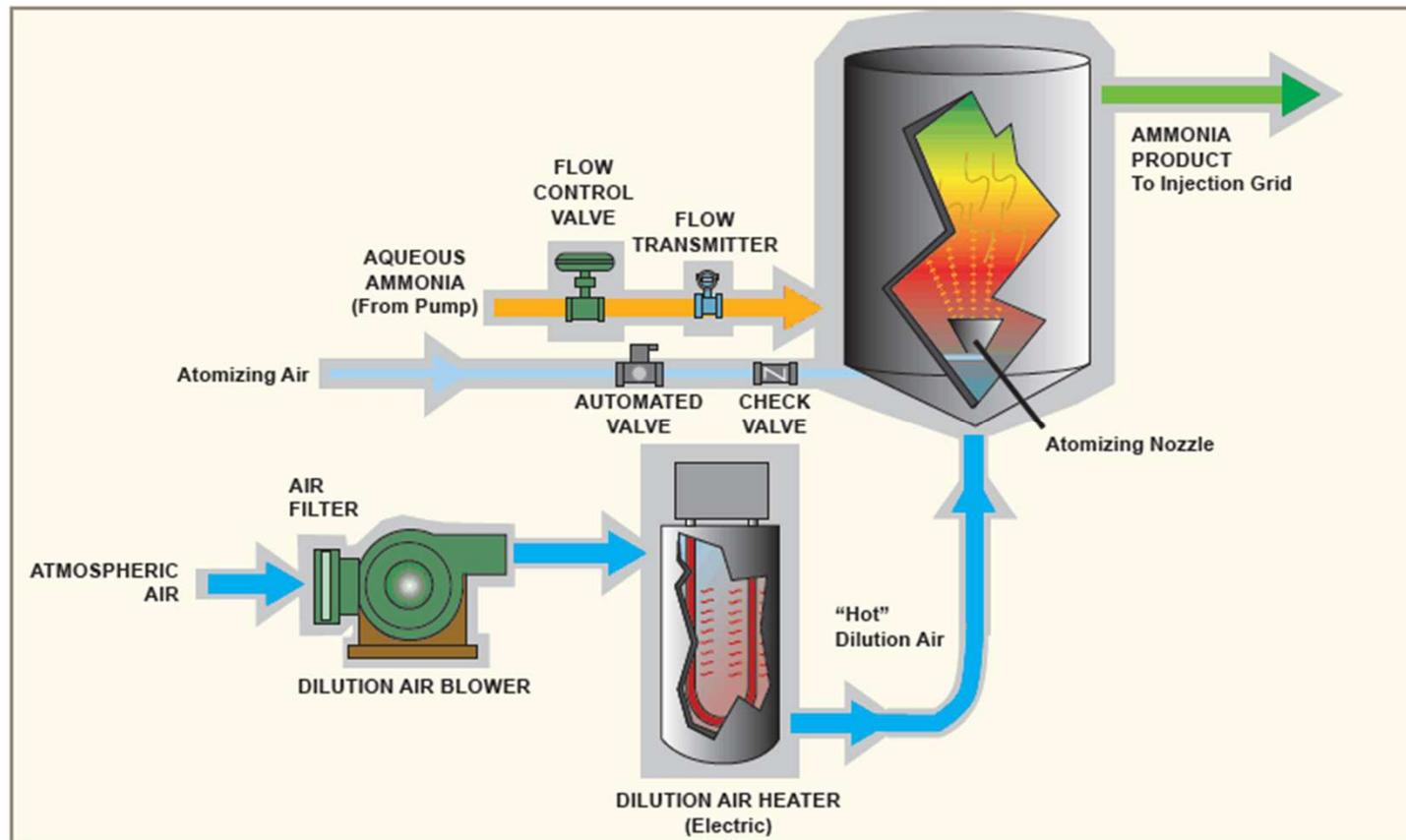
Stazione di vaporizzazione: il vaporizzatore elettrico

- Tale soluzione si usa prevalentemente in impianti di piccola taglia;
- La portata massima della soluzione ammoniacale, che può essere vaporizzata, è pari a circa **160 kg/h**.



Stazione di vaporizzazione: impiego di aria preriscaldata “elettricamente”

- L'aria “ambiente”, precedentemente riscaldata (fino a circa 340°C), viene finemente nebulizzata da appositi ugelli ed entrando in contatto con la soluzione acquosa di NH_3 ne provoca l'evaporazione;
- Tale sistema è in grado di vaporizzare fino a **250 kg/h** di soluzione ammoniacale.

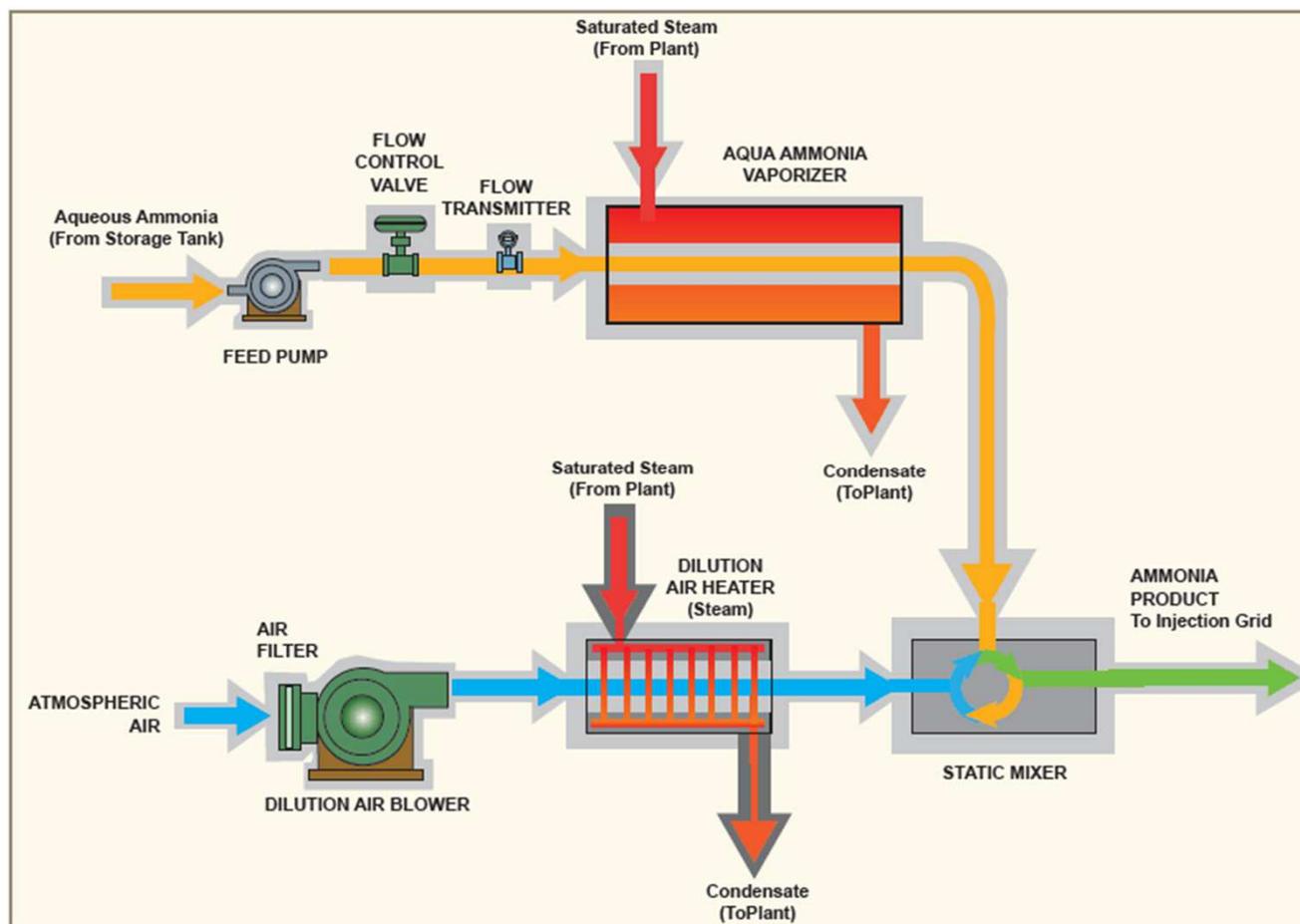


Stazione di vaporizzazione della soluzione ammoniacale mediante aria preriscaldata “elettricamente”



Stazione di vaporizzazione: impiego di vapore di processo

- La soluzione acquosa di NH_3 evapora in uno scambiatore di calore a tubi e mantello, ricevendo energia termica dalla condensazione del vapore di processo;
- Tale sistema è in grado di vaporizzare una portata massica di soluzione ammoniacale compresa tra **225** e **2600** kg/h (impianti di taglia grande).

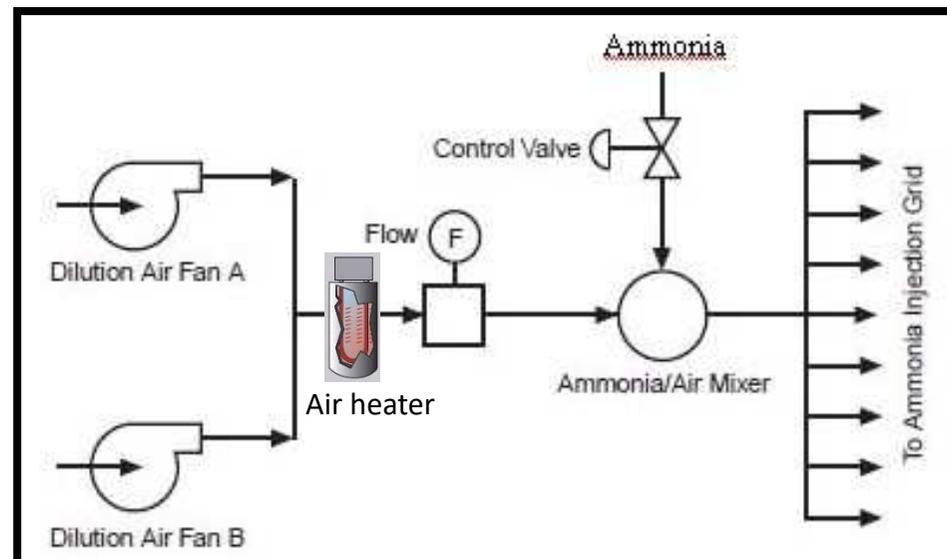


Sezione di diluizione: funzioni

- La sezione di diluizione deve garantire:
 - 1) un'ottima miscelazione tra il fluido di trasporto (aria) ed i vapori di NH_3 ;
 - 2) un adeguato grado di turbolenza (dipende dalla pressione del fluido di trasporto) in modo da miscelare nel modo più uniforme possibile la corrente riducente (contenente NH_3) con i gas combustibili.
- La portata di aria, aspirata dal ventilatore, è tale da rispettare i limiti di infiammabilità (**15-33% v/v**) dei vapori di NH_3 (il rapporto di alimentazione aria/ NH_3 è di circa 20:1);
- La pressione del fluido di trasporto viene desunta da prove sperimentali condotte sull'impianto.

Sezione di diluizione: componenti

- 1) Due ventilatori operanti in parallelo (uno in funzione e l'altro in stand-by, pronto ad entrare in azione in caso di guasto dell'altro);
- 2) Riscaldatore elettrico (per garantire che la corrente aria/vapori di NH_3 abbia un livello di temperatura compatibile con la “finestra di lavoro” del catalizzatore);
- 3) Valvole di regolazione della portata e della pressione dell'aria;
- 4) Strumentazione per la misura ed il controllo della portata, della pressione e della temperatura dell'aria;
- 5) Miscelatore statico aria/vapori di NH_3 (static mixer).



Schema della sezione di diluizione

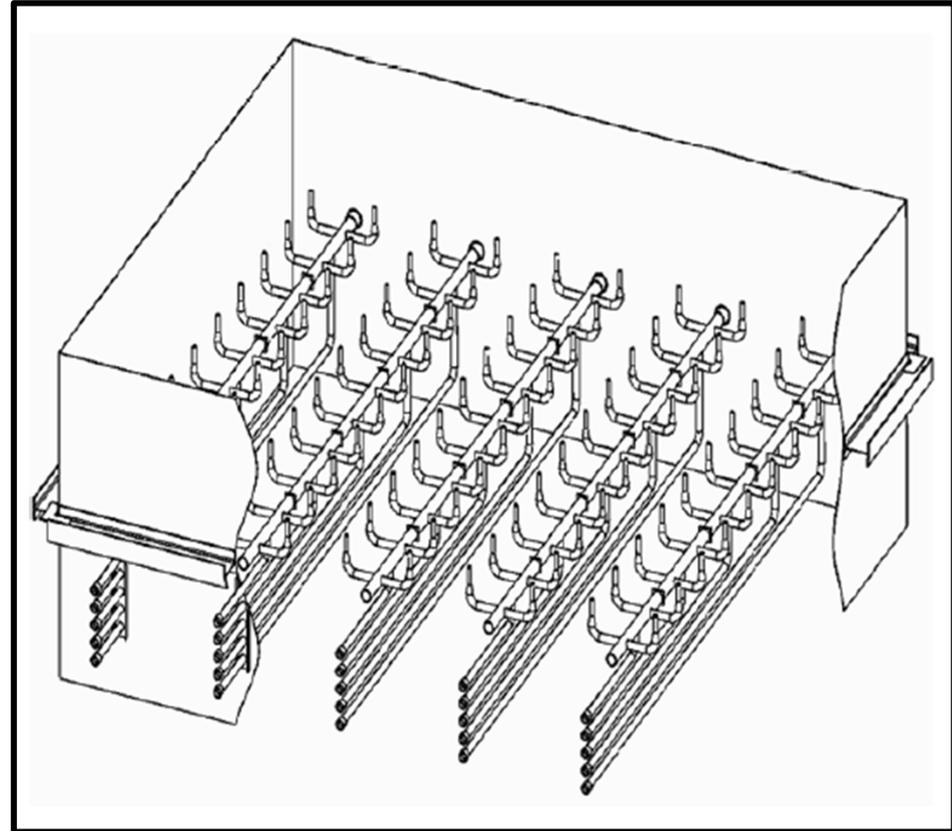
Sezione di diluizione



Sezione di diluizione dell'impianto DeNO_x

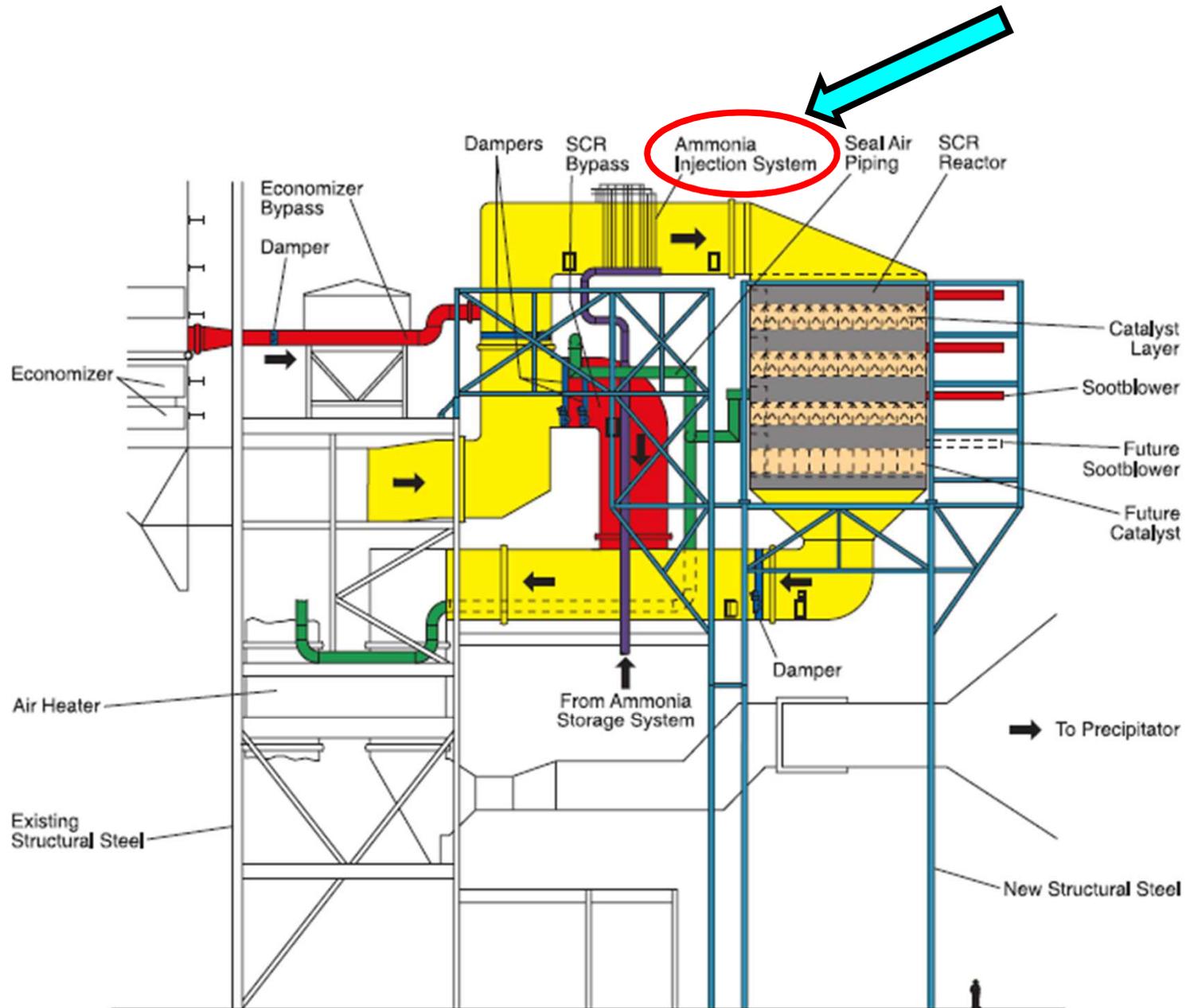
Sezione di iniezione della corrente riducente nel condotto fumi

- Il sistema di iniezione (AIG) della corrente gassosa aria/ NH_3 è costituito da stadi di immissione, posti a diverse altezze della camera di post-combustione (secondo percorso del generatore di vapore), ciascuno equipaggiato con gruppi di lance, dotati di iniettori multipli in grado di operare alternativamente a seconda dell'altezza desiderata;
- Il sistema di iniezione regola l'angolo di spruzzo degli iniettori e la velocità di immissione della corrente riducente (aria/vapori di NH_3) nei gas combusti;
- A causa delle elevate temperature di esercizio e del continuo contatto con fumi "polverosi" gli iniettori devono essere sostituiti periodicamente (erosione, corrosione).



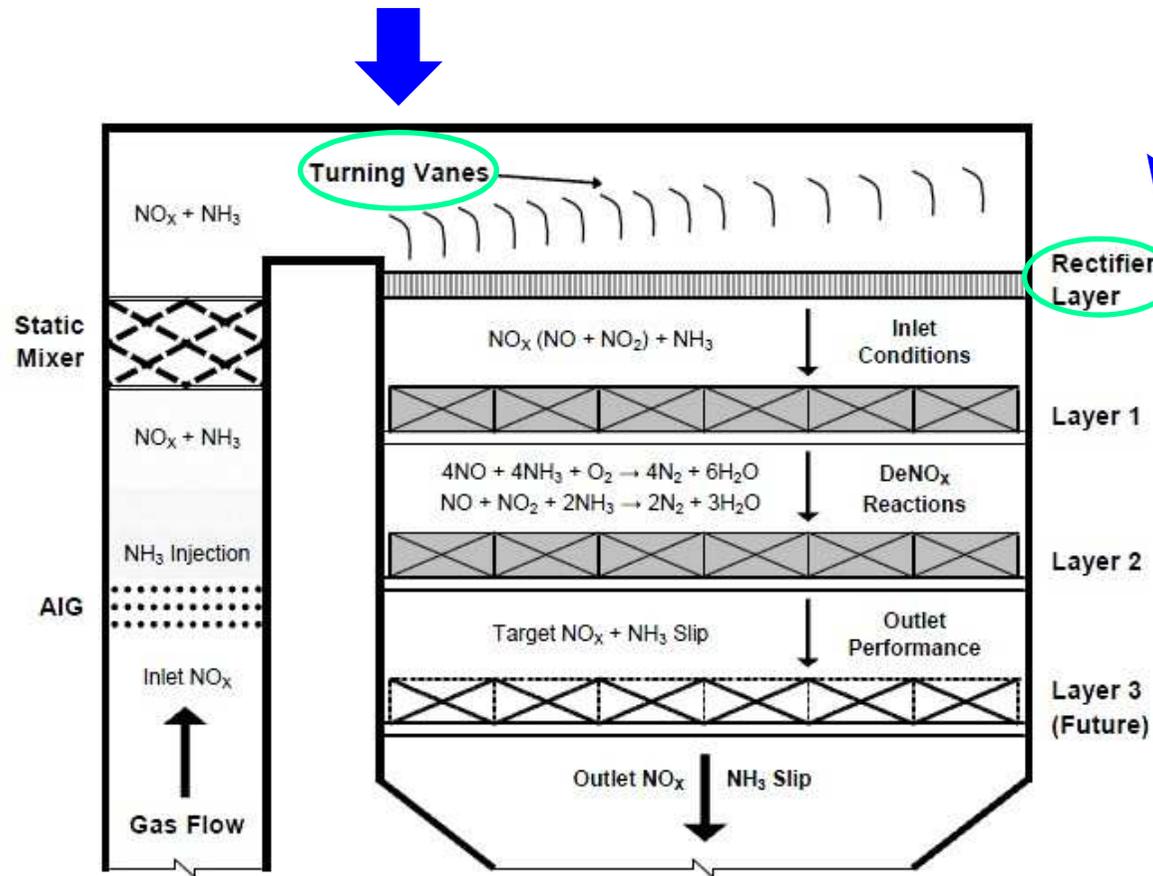
AIG: Ammonia Injection Grid

Sistema di iniezione della corrente riducente: layout

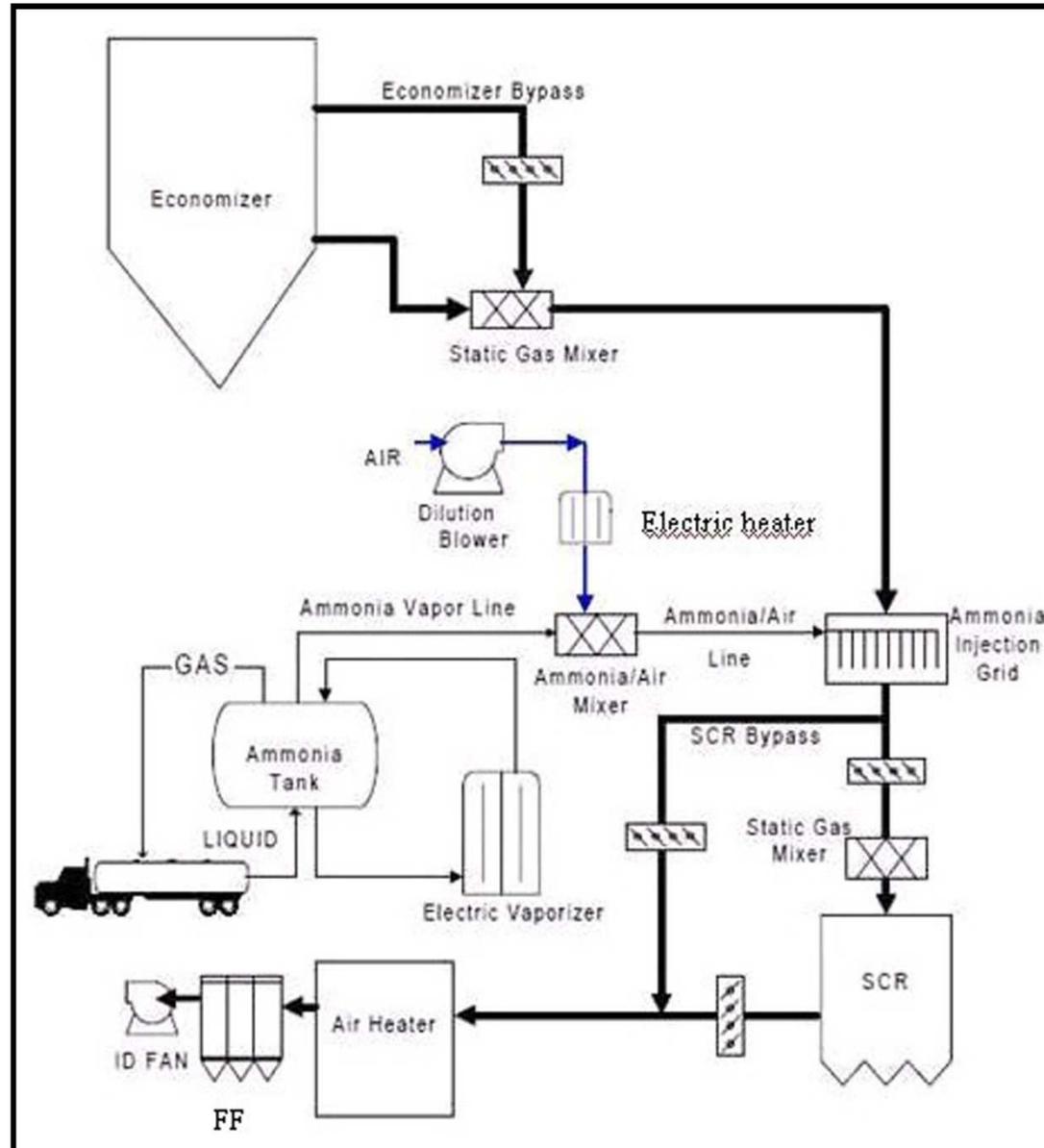


Palette deviatrici e distributore di flusso

- Le palette deviatrici (turning vanes) ed il distributore di flusso (rectifier layer) svolgono la funzione di ripartire nel modo più uniforme possibile la corrente gassosa NH_3 /fumi all'ingresso del reattore catalitico, in modo che ogni suo elemento sia investito dalla portata in transito.



Schema di un impianto DeNO_x “convenzionale” installato in una centrale termoelettrica a vapore



Reattore catalitico dell'impianto DeNO_x



Reattore DeNO_x

Reattore DeNO_x: collocazione nella linea di trattamento dei gas combusti

- Le possibili configurazioni impiantistiche dipendono dalla collocazione del catalizzatore nella linea di trattamento dei fumi (gas combusti):
 - 1) **Configurazione high-dust** (la più diffusa);
 - 2) **Configurazione low-dust**;
 - 3) **Configurazione tail-end**.

Configurazione high-dust

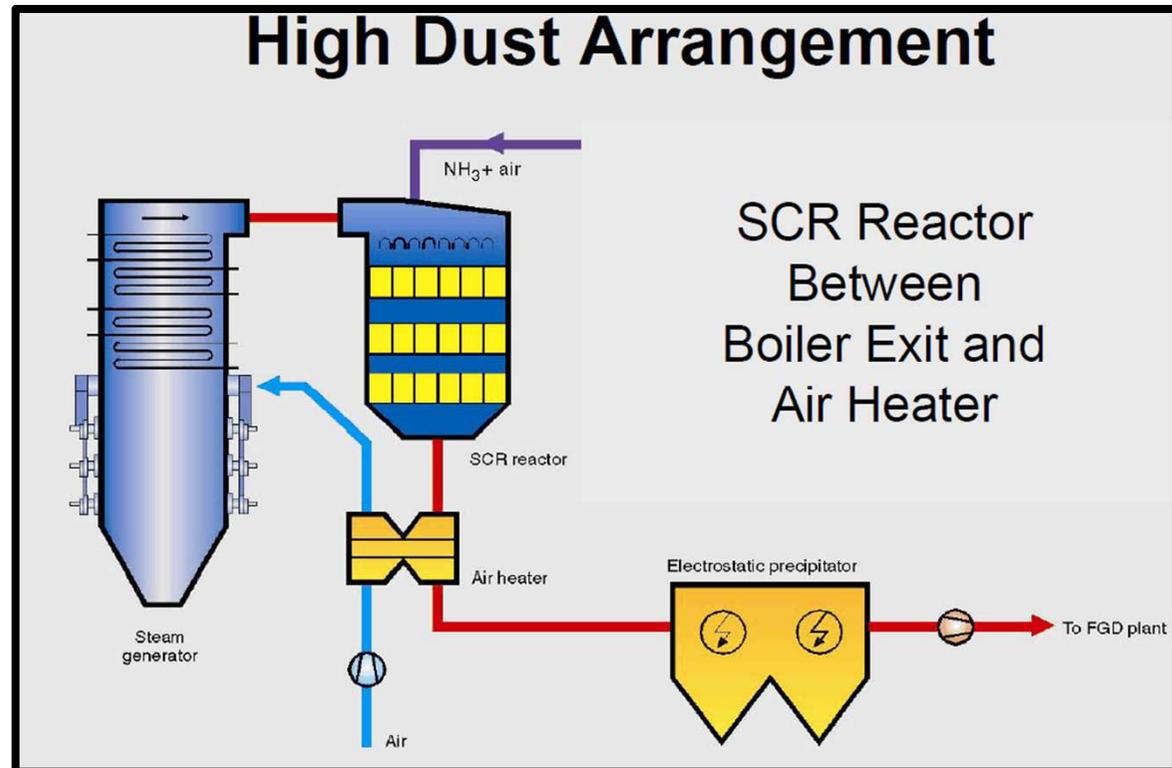
- Il catalizzatore è posizionato a monte del depolveratore e del desolforatore;

Vantaggi:

- il catalizzatore (a base di ossidi metallici) lavora in un ottimale campo di temperature ($T \approx 320-340^{\circ}\text{C}$);
- l'installazione del catalizzatore è semplice.

Svantaggi:

- Il catalizzatore è più facilmente soggetto ad erosione (passaggio di gas polverosi) e a depositi di solfati di ammonio (legati soprattutto alla combustione del carbone);
- La vita utile del catalizzatore è più breve (solitamente è pari a circa 16000 ore).



Configurazione low-dust

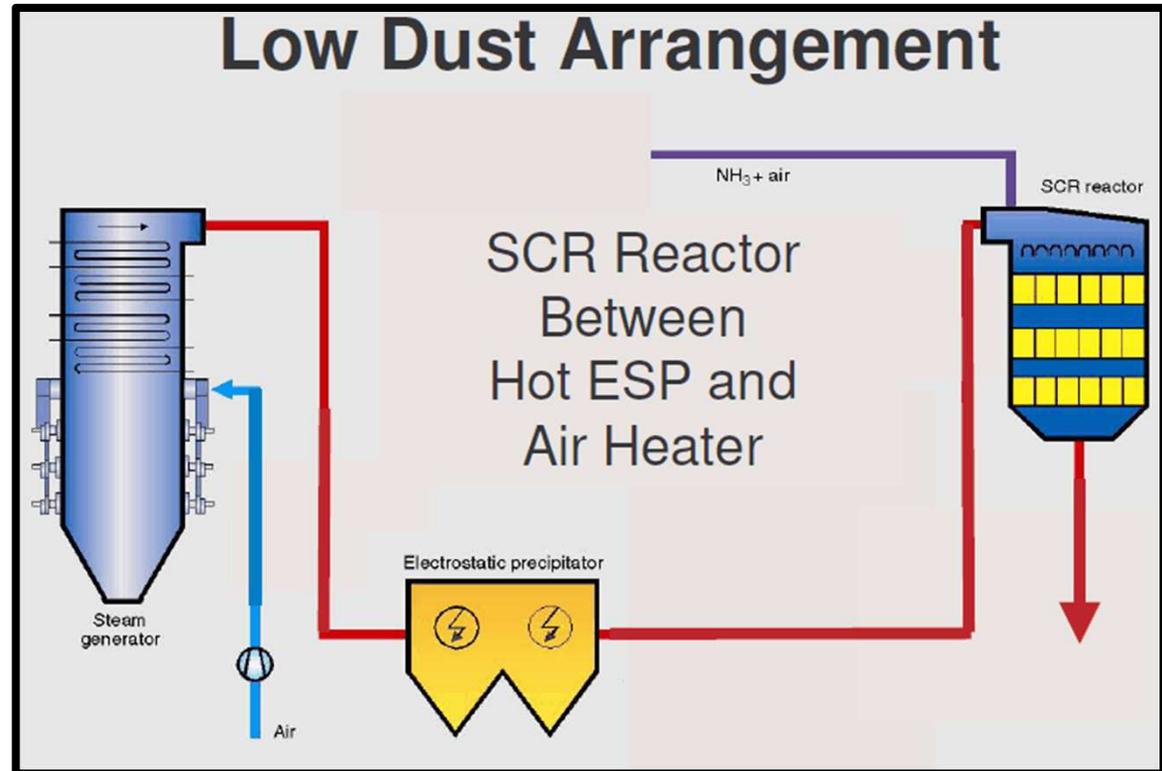
- Il catalizzatore viene posizionato a valle del depolveratore e a monte del desolfatore;

Vantaggi:

- Il catalizzatore lavora in condizioni migliori, poiché i fumi vi entrano depolverati (aumenta la sua vita utile).

Svantaggi:

- Rischio di formazione di depositi di solfati di ammonio (causano disattivazione del catalizzatore);
- Si deve ricorrere a precipitatori elettrostatici per l'abbattimento delle polveri a causa delle elevate temperature di esercizio, non idonee all'utilizzo di filtri a maniche (incremento dei costi del sistema di depolverazione).



Configurazione tail-end

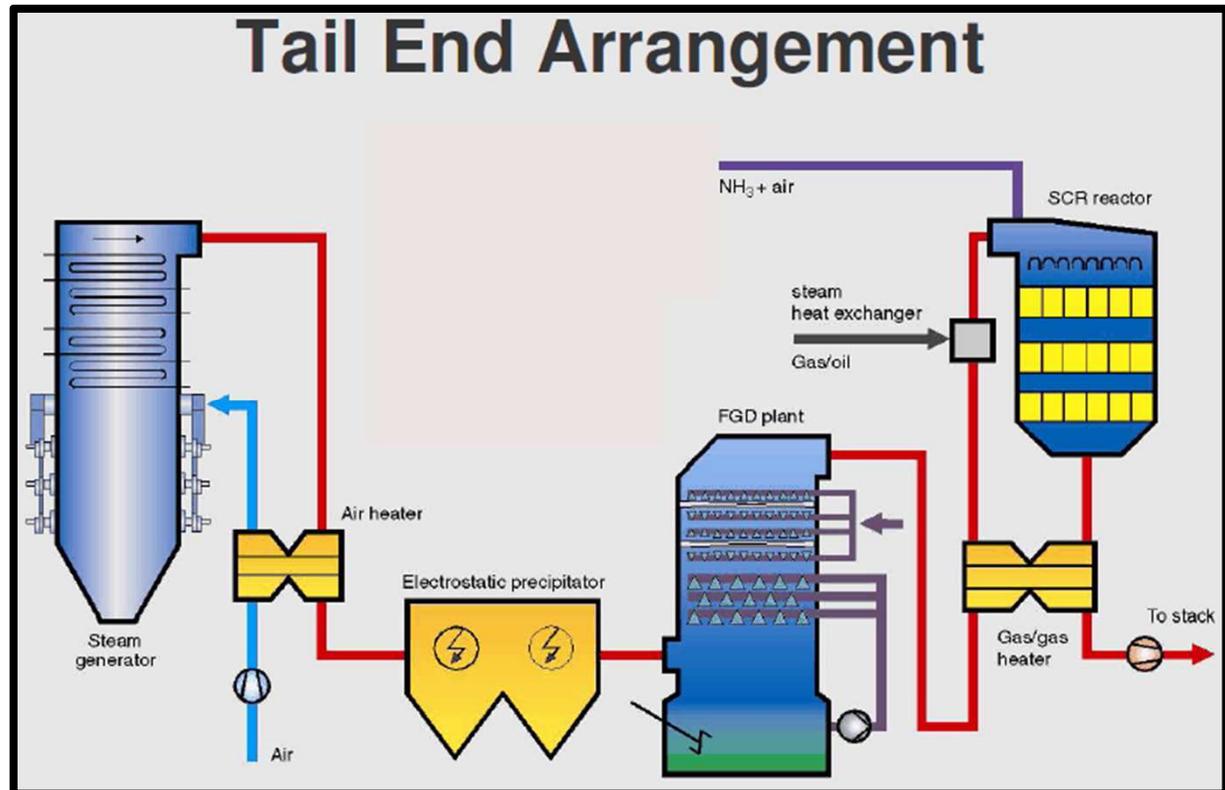
- Il catalizzatore è posizionato a valle del depolveratore e del desolfatore;

Vantaggi:

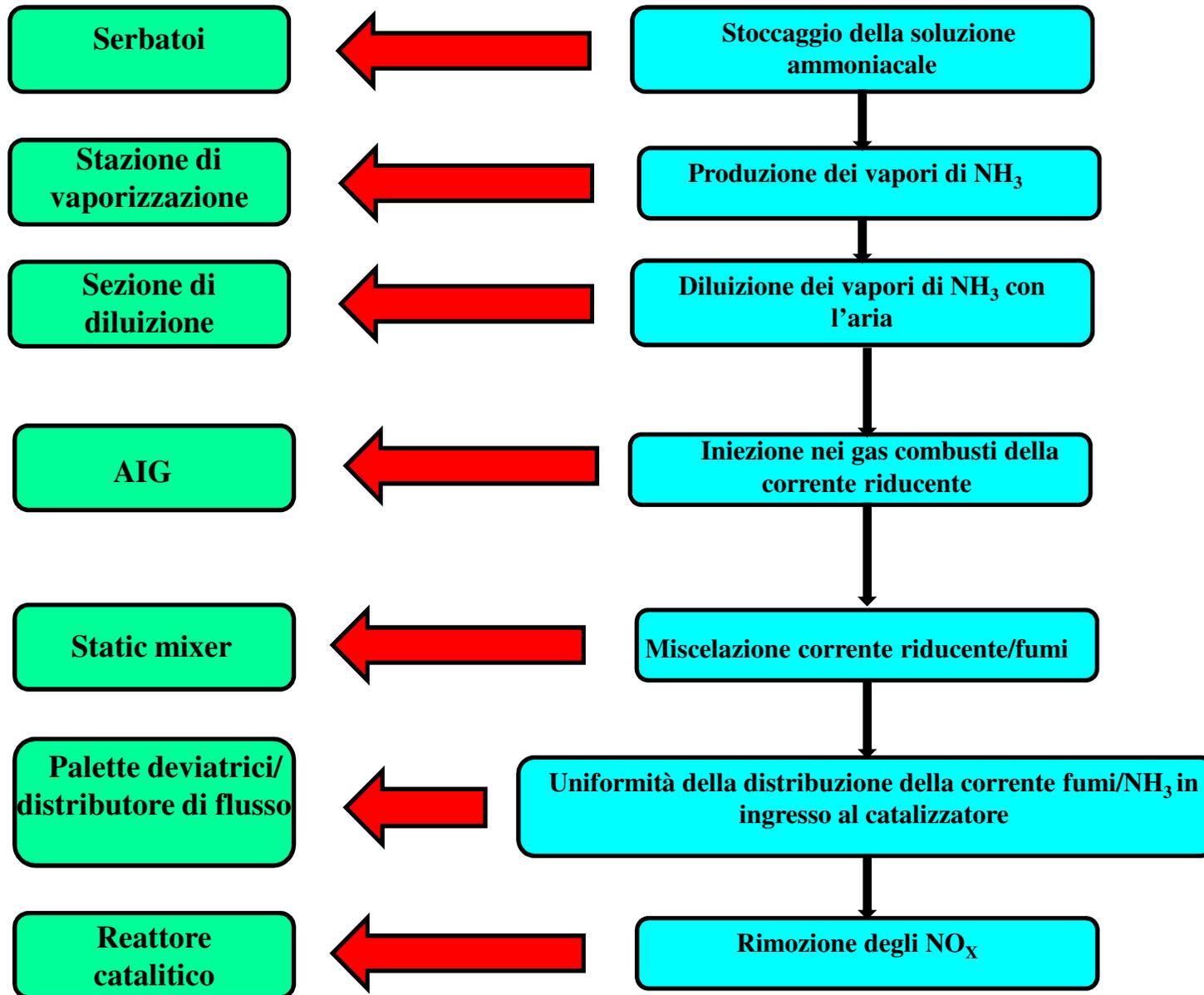
- Sono fortemente ridotti i rischi di depositi di solfati di ammonio e di erosione;
- Ho un incremento della vita utile del catalizzatore (è pari a circa 24000 ore).

Svantaggi:

- Per consentire al catalizzatore di lavorare in un campo di temperatura ottimale è necessario prevedere un sistema di riscaldamento dei fumi (la loro temperatura in ingresso al reattore catalitico è in questo caso compresa tra 140-160°), impiegando ulteriore combustibile (solitamente gas naturale) ed uno scambiatore di calore (aggravio dei costi di impianto).

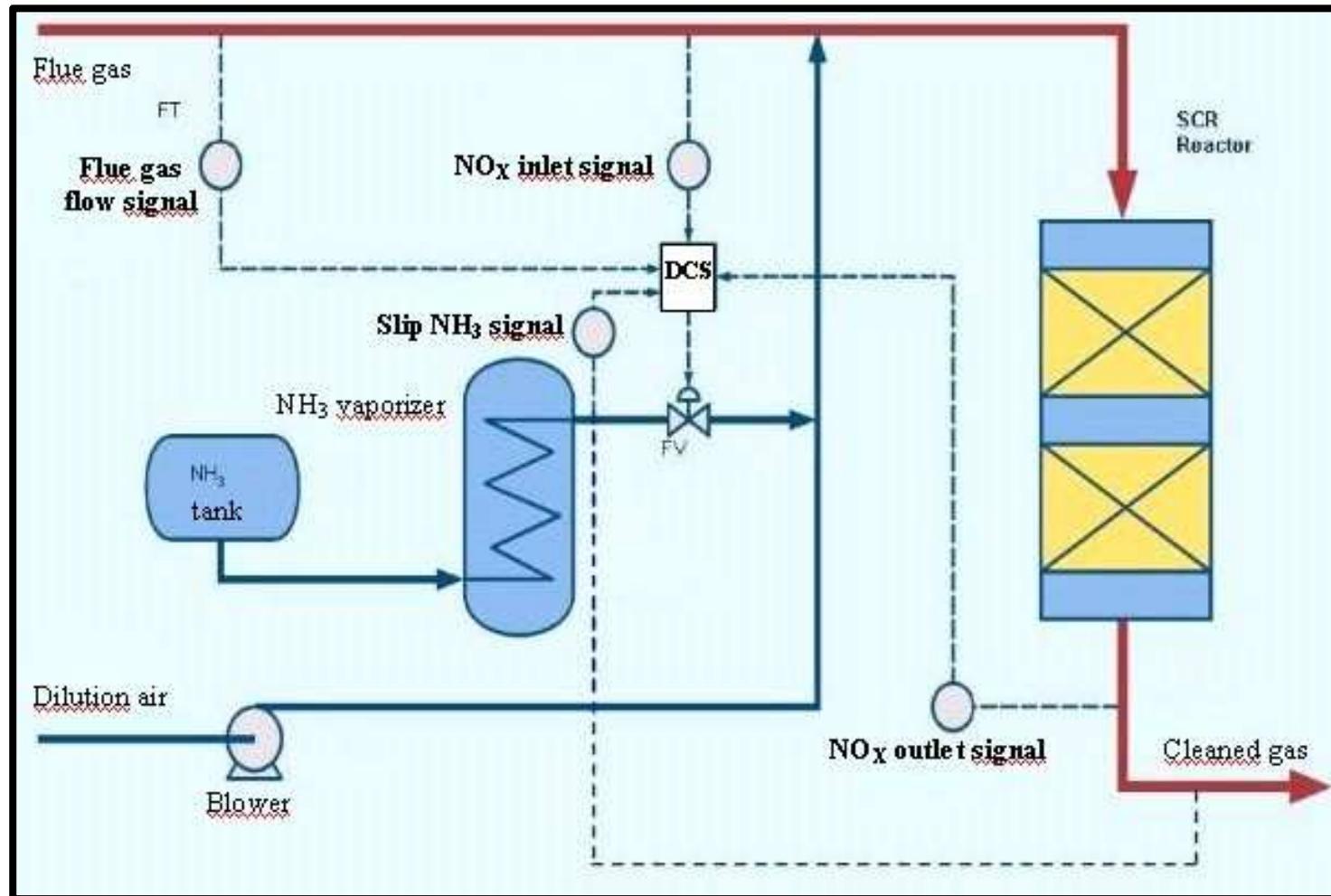


Impianti DeNO_x: le fasi del processo SCR



Impianti DeNO_x: la regolazione della portata di NH₃

- L'impianto DeNO_x è completamente automatizzato mediante DCS (Distributed Control System).



Regolazione della portata di ammoniaca

Impianti DeNO_x: produzione diretta di NH₃ gassosa mediante l'idrolisi dell'urea

- L'ammoniaca viene prodotta direttamente in forma gassosa, sfruttando la reazione di idrolisi dell'urea (NH₂CONH₂), sulla base della richiesta dell'unità DeNO_x;
- L'idrolisi dell'urea si attua attraverso due distinti step:
 - 1) NH₂CONH₂ + H₂O → NH₂CO₂NH₄ (formazione del carbammato di ammonio);
 - 2) NH₂CO₂NH₄ → 2NH₃ + CO₂ (decomposizione del carbammato di ammonio e produzione di NH₃ e CO₂)

• La reazione complessiva è endotermica:

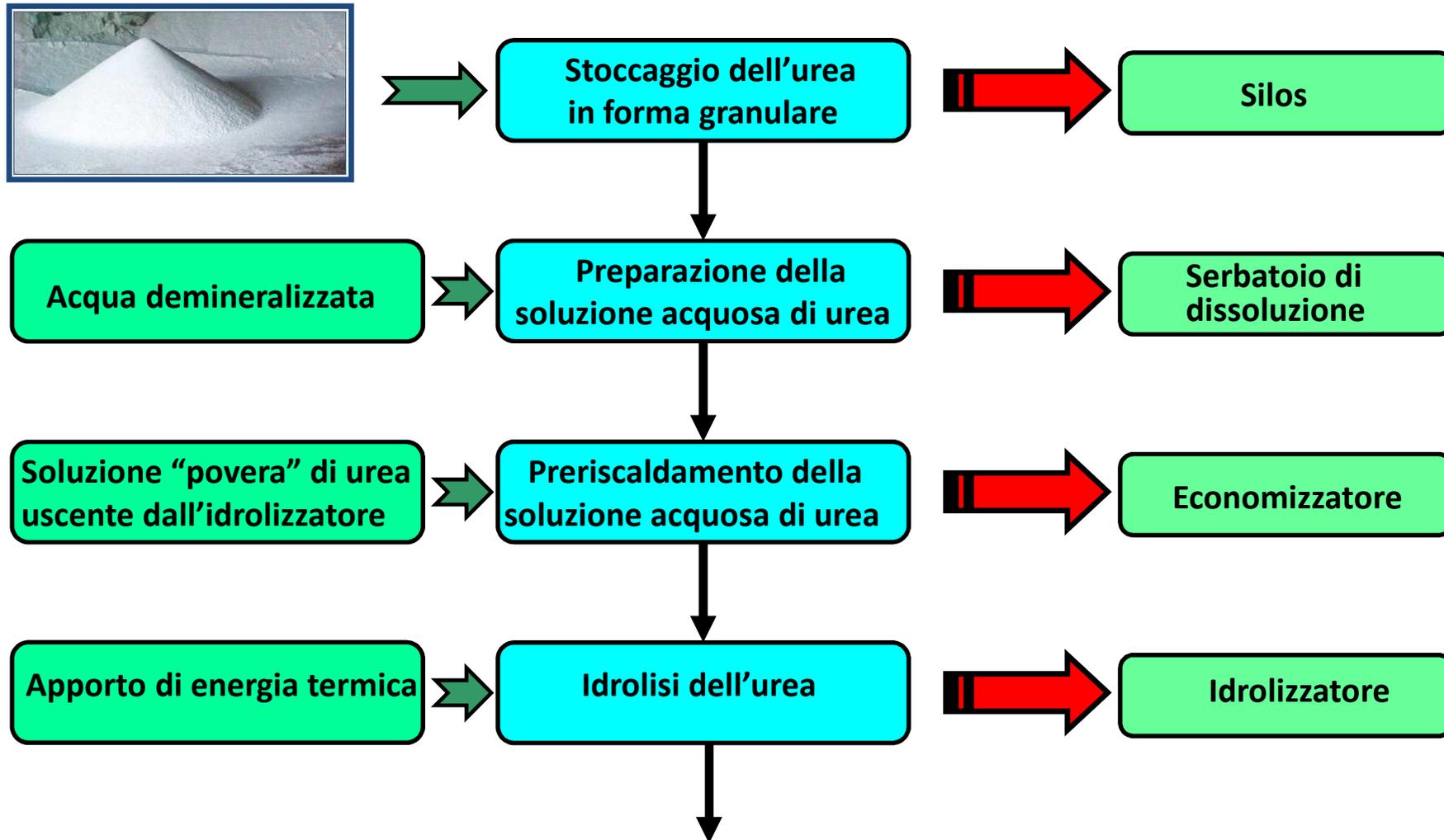


Calcolo dell'entalpia della reazione di idrolisi

- $\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4 - 27,63 \text{ kJ/mol}$
(formazione del carbammato di ammonio);
- $\text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4 \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 161,21 \text{ kJ/mol}$
(formazione di anidride carbonica e ammoniaca);
- $\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 133,58 \text{ kJ/mol}$
(Reazione complessiva di idrolisi dell'urea);

$$\Delta H_{\text{reaz}} = \frac{133580}{(2 \cdot 17)} = 3929 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{NH}_3}}$$

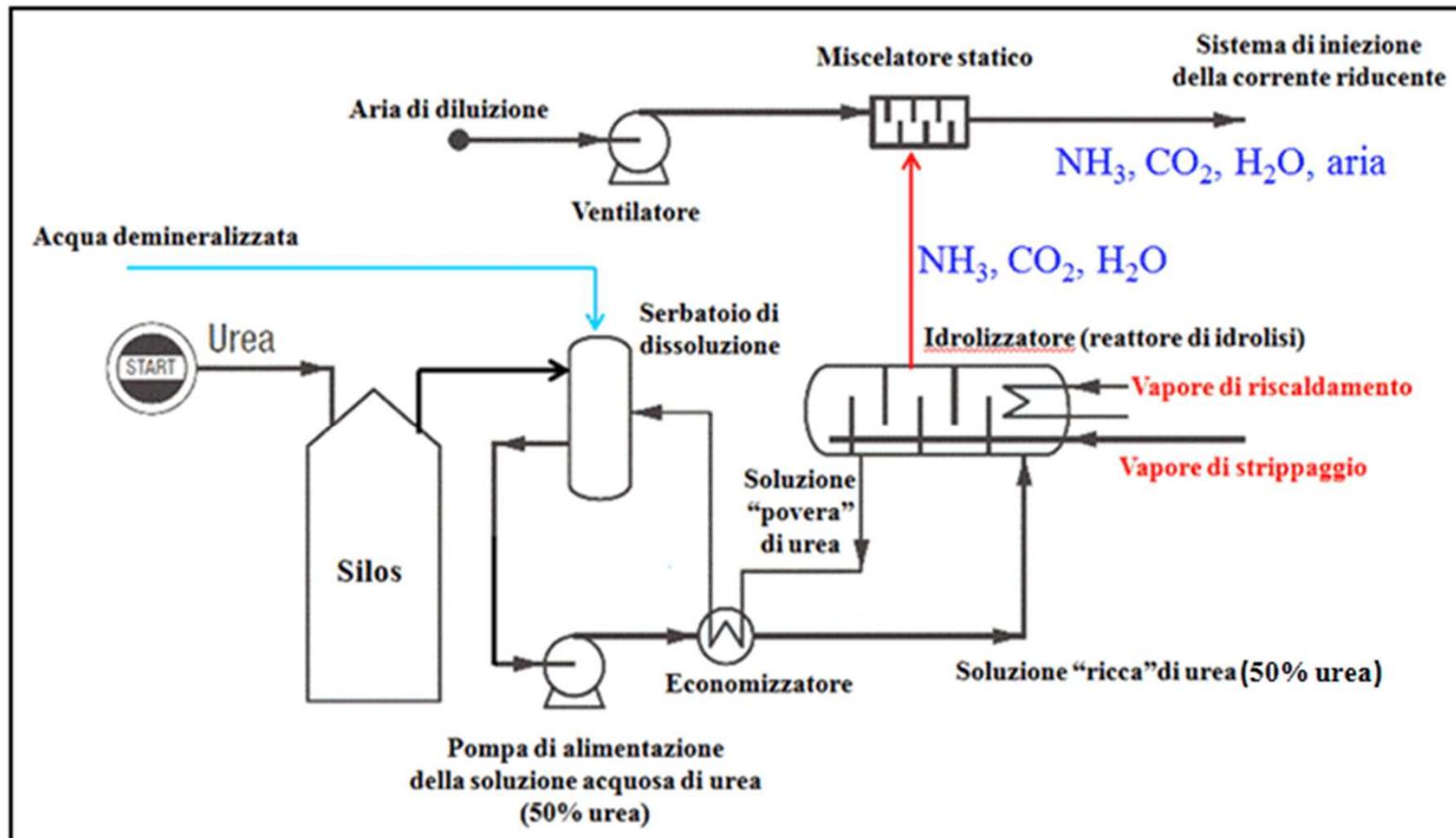
Le fasi del processo di produzione di NH_3 gassosa



Miscela gassosa (NH_3 , CO_2 , H_2O)

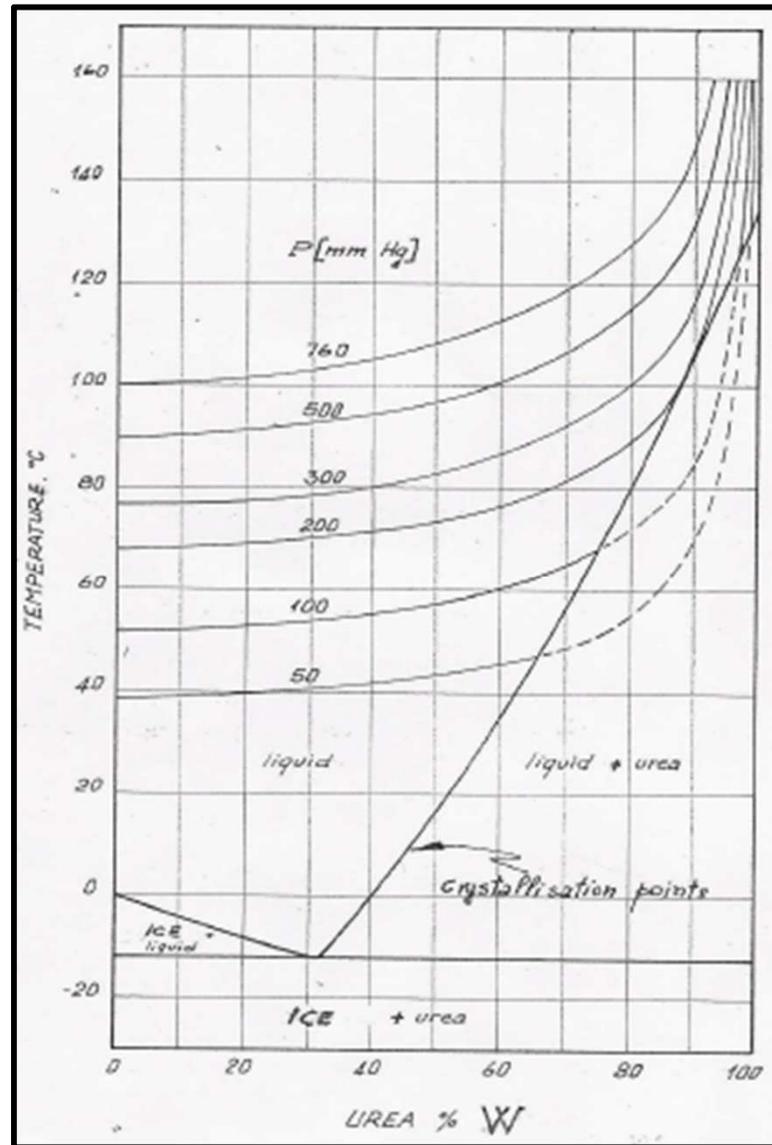
Impianto DeNO_x con produzione diretta di NH₃ gassosa: il processo AOD (Ammonia on demand)

- La continuità del processo di generazione di NH₃ è garantita dalla presenza di un sistema di pompe di alimentazione in parallelo, di 2 economizzatori e di 2 reattori di idrolisi.



Impianto DeNO_x con produzione diretta di ammoniaca gassosa

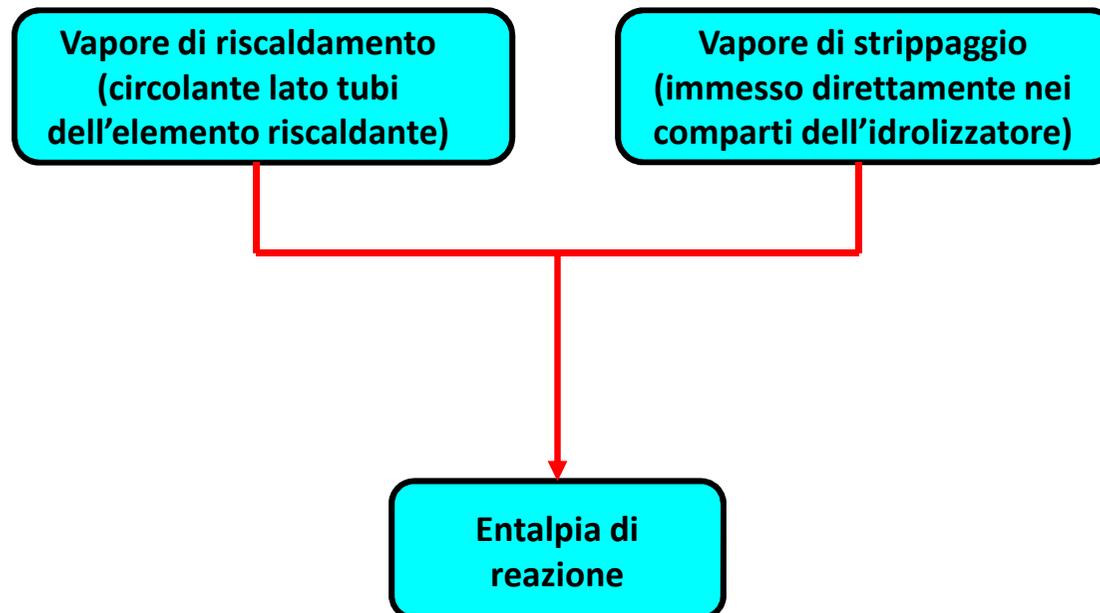
Alimentazione della soluzione acquosa di urea: equilibrio di fase della soluzione acqua/urea



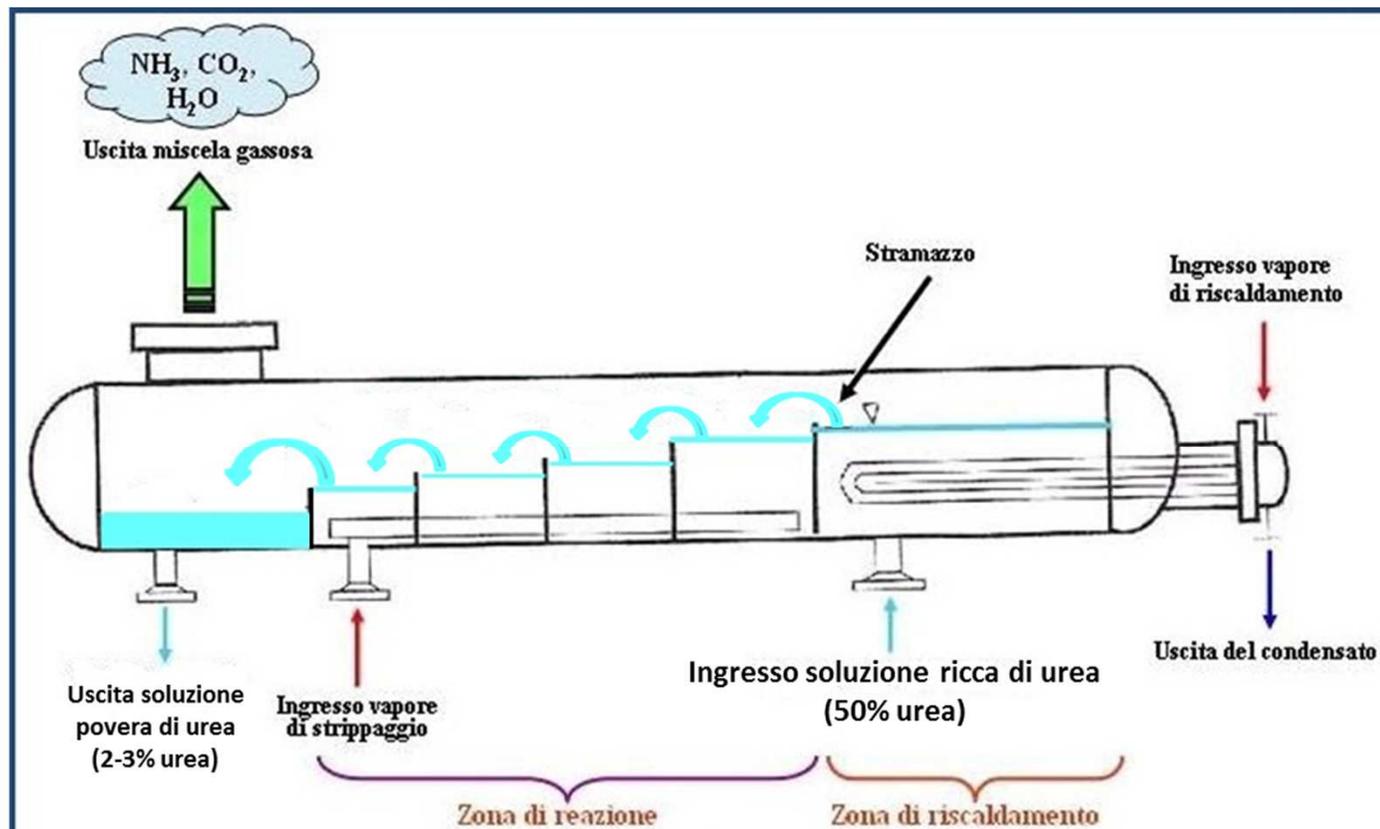
Punto di cristallizzazione della soluzione acquosa di urea

Apporto di energia termica per attuare l'idrolisi dell'urea

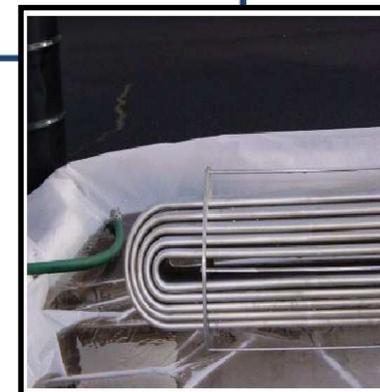
- La temperatura è il principale parametro, che influisce sulla cinetica di reazione;
- La temperatura di reazione dipende dalla richiesta di NH_3 dell'impianto DeNO_x ;
- Nei gruppi termoelettrici a vapore, intervalli di temperatura compresi tra 150-180°C consentono generalmente di raggiungere la produzione desiderata di NH_3 ;
- La reazione di idrolisi dell'urea è endotermica e necessita di apporto di calore dall'esterno (il prodotto finale della reazione di idrolisi è una miscela gassosa di NH_3 , CO_2 ed H_2O);
- L'energia termica viene fornita mediante l'immissione di vapore (vapore di riscaldamento e vapore di stripping) nel reattore di idrolisi (idrolizzatore).



Il reattore di idrolisi: funzionamento



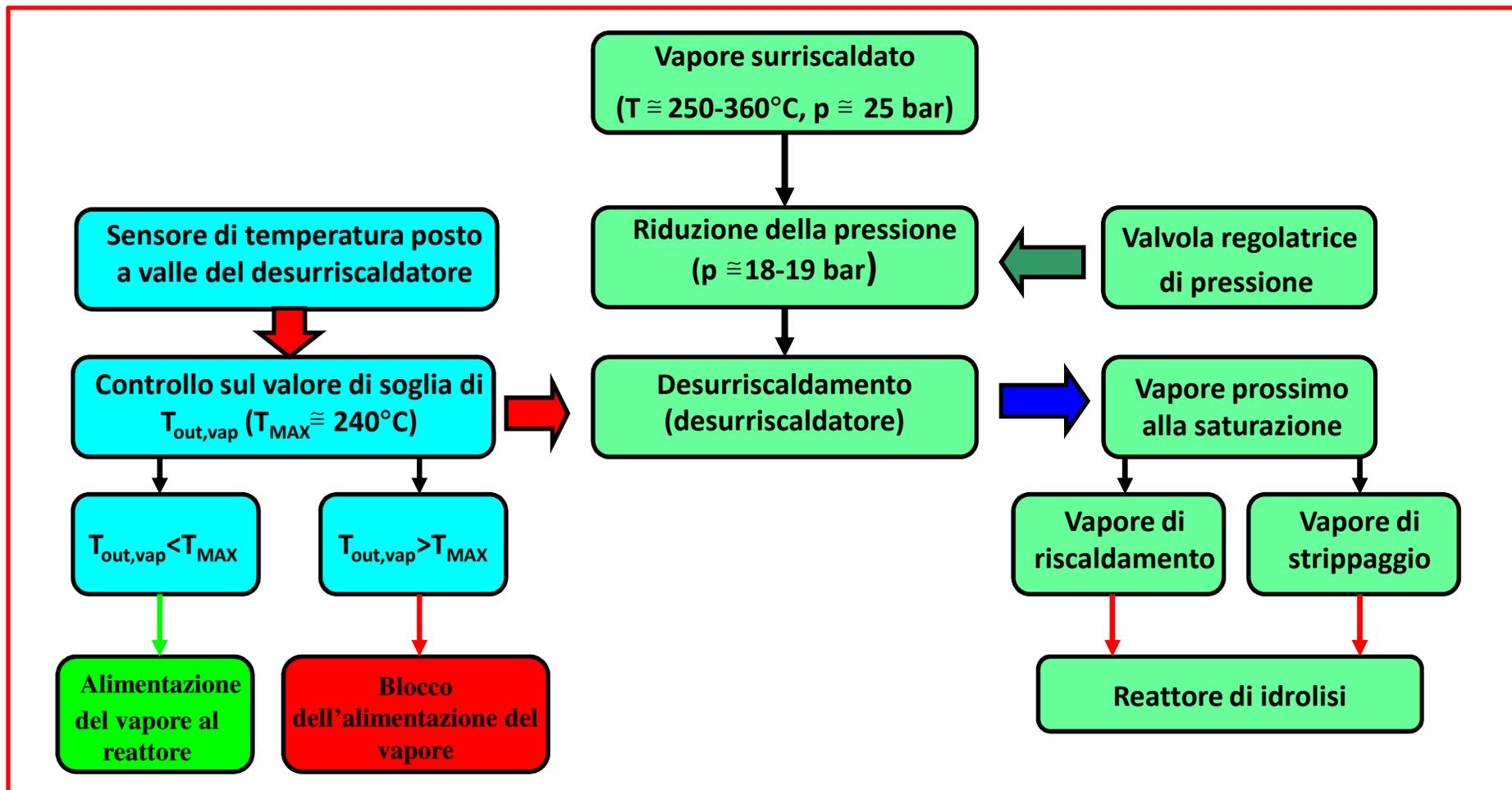
Idrolizzatore



Elemento riscaldante

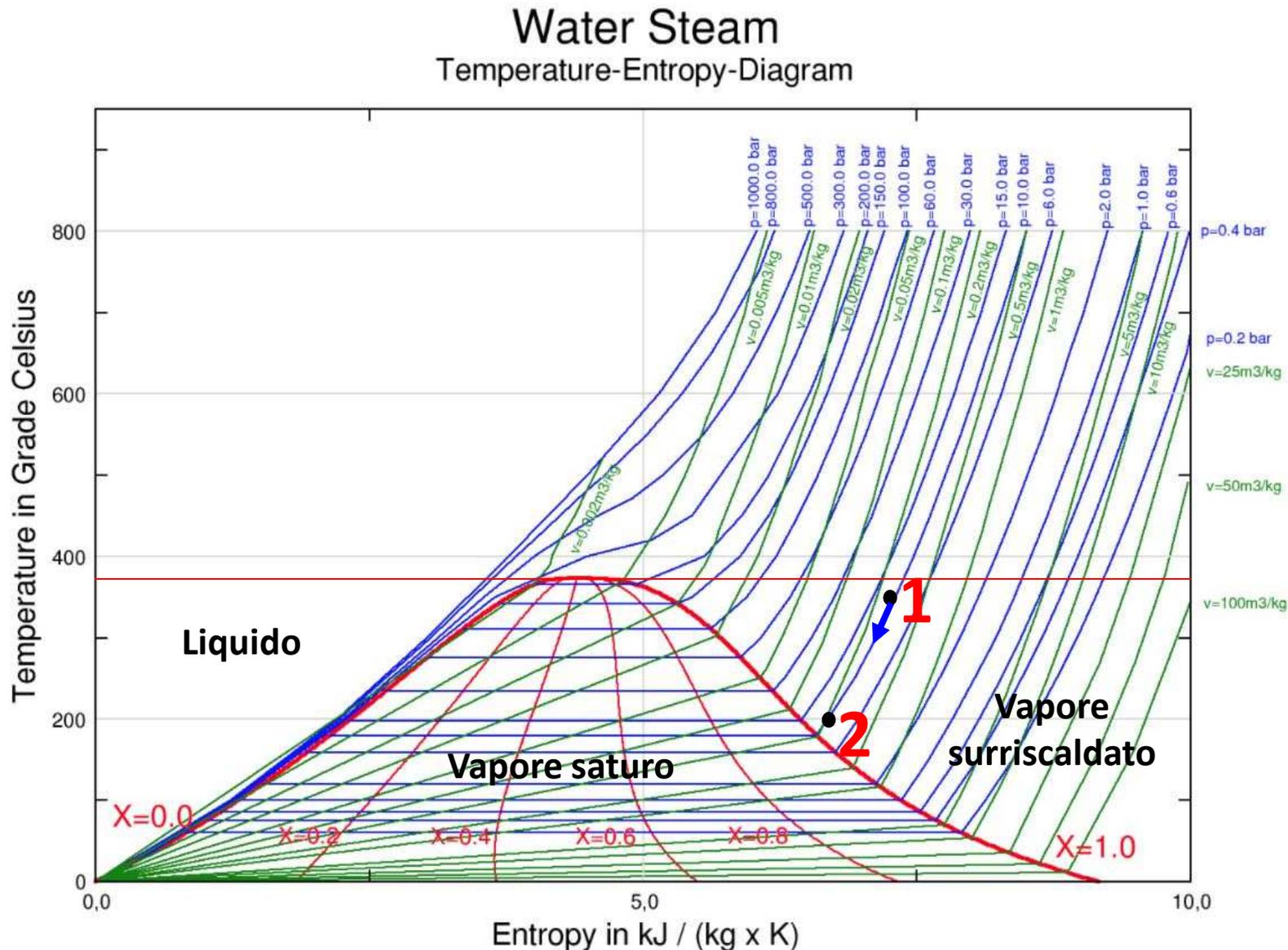
Il sistema di controllo della temperatura del vapore (fluido caldo)

- **Esercizio in sicurezza di attrezzature a pressione (idrolizzatore)** → Per preservare l'integrità strutturale dell'idrolizzatore e dell'elemento riscaldante devo garantire che la $T_{out,vap}$ (temperatura di uscita del vapore dal desurriscaldatore) sia inferiore alla temperatura massima di progetto degli elementi ($T_{project} \approx 250-260^{\circ}C$).



Il diagramma T-S dell'acqua

- Il desurriscaldamento del vapore surriscaldato (tratto da 1 a 2) avviene a pressione costante (le isobare sono di colore blu nel diagramma di stato).



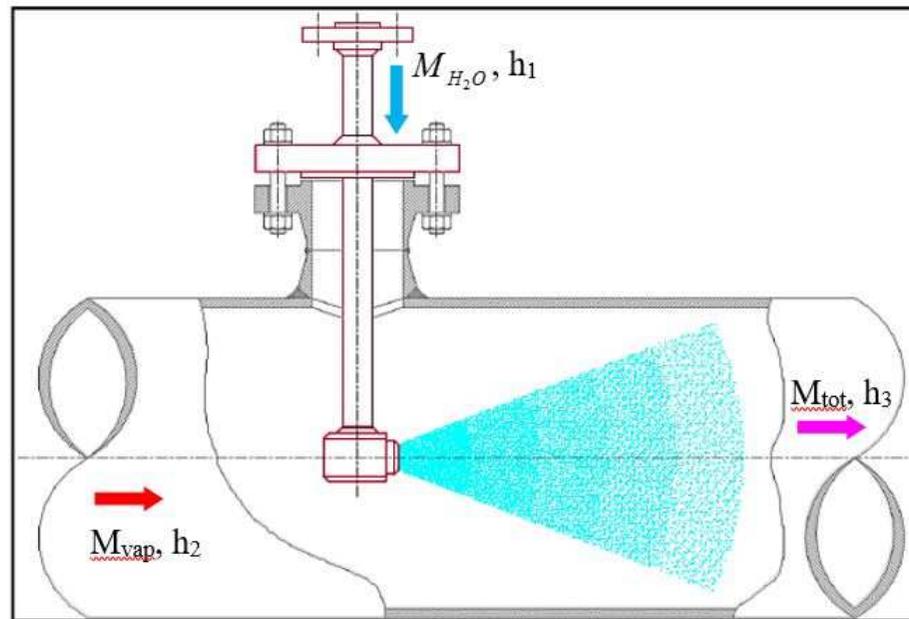
Desurriscaldatore: il calcolo della portata di raffreddamento

➤ Utilizzando l'equazione di conservazione dell'energia e di conservazione della massa, è possibile determinare la portata richiesta di acqua di raffreddamento (le incognite sono M_{H_2O} e M_{vap}):

$$\left. \begin{array}{l} 1) (M_{H_2O} \cdot h_1) + (M_{vap} \cdot h_2) = M_{tot} \cdot h_3 \rightarrow \text{equazione di conservazione dell'energia} \\ 2) M_{H_2O} + M_{vap} = M_{tot} \rightarrow \text{equazione di conservazione della massa} \end{array} \right\} \rightarrow M_{H_2O} = \frac{M_{tot} \cdot (h_2 - h_3)}{h_2 - h_1}$$

In cui:

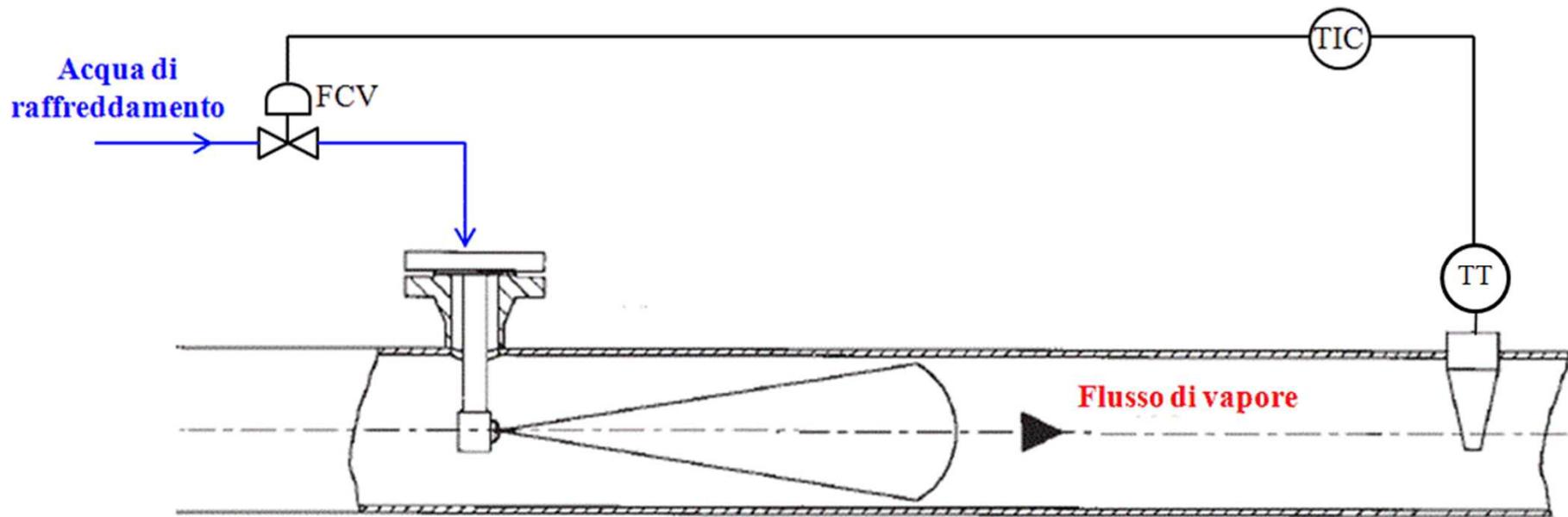
- M_{H_2O} rappresenta la portata massica di acqua di raffreddamento (kg/s);
- h_1 indica l'entalpia dell'acqua in ingresso al desurriscaldatore (J/kg);
- M_{vap} rappresenta la portata massica di vapore surriscaldato in ingresso al desurriscaldatore (kg/s);
- h_2 indica l'entalpia del vapore surriscaldato (J/kg);
- M_{tot} rappresenta la portata massica del vapore desurriscaldato (kg/s);
- h_3 indica l'entalpia del vapore desurriscaldato (J/kg).



Desurriscaldatore a contatto diretto ad iniezione di acqua

Anello di controllo della temperatura del vapore in uscita dal desurriscaldatore

- un sensore di temperatura (TT) misura le variazioni di temperatura del vapore ed invia un segnale ad un regolatore con indicatore di temperatura (TIC), il quale trasmette un segnale alla valvola di controllo (FCV: flow control valve) della portata di acqua in modo da regolare il suo flusso.



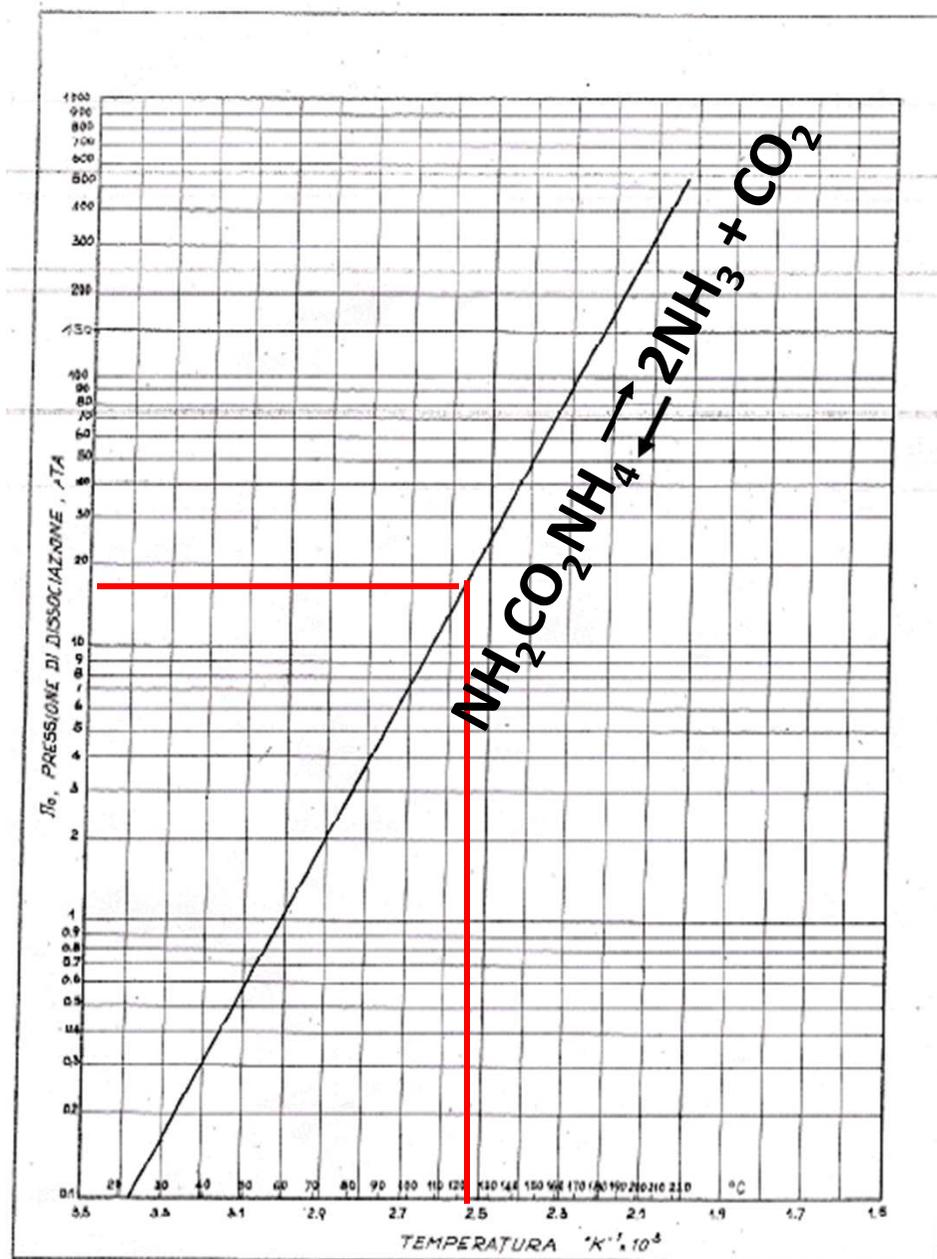
Controllo della temperatura del vapore in uscita dal desurriscaldatore

Vapore di strippaggio: funzioni

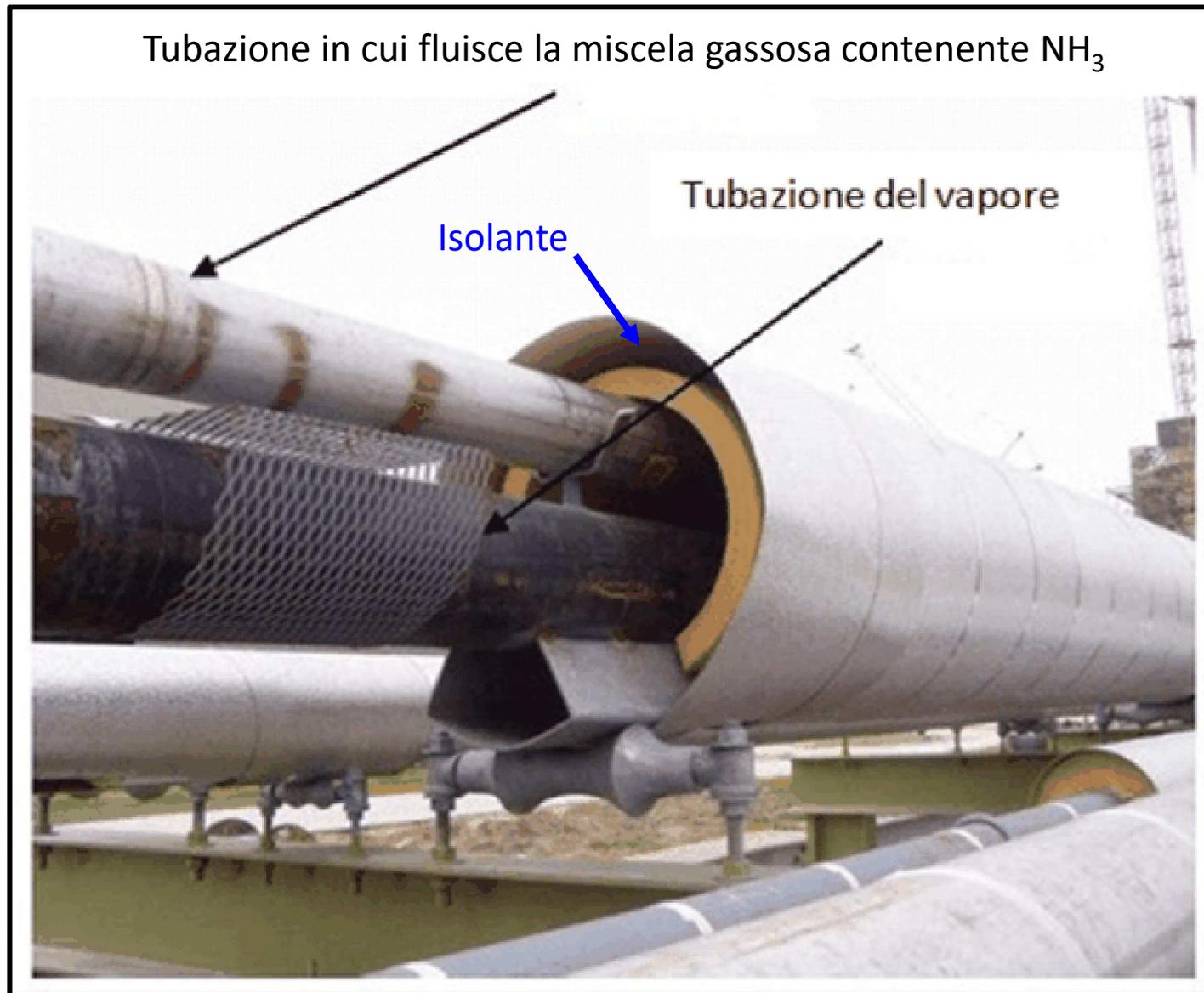
- 1) Apporta ulteriore energia termica per equilibrare l'entalpia di reazione (viene immesso direttamente nella soluzione acquosa di urea);**
- 2) Facilita il passaggio in fase gassosa dei prodotti dell'idrolisi (NH_3 e CO_2);**
- 3) Bilancia il consumo di acqua della reazione di idrolisi;**
- 4) Garantisce il richiesto tenore di vapor acqueo nella miscela gassosa.**

Diagramma di dissociazione del carbammato di ammonio

- Nelle linee di distribuzione della miscela gassosa, contenente NH_3 , alla sezione di iniezione devo evitare la precipitazione di carbammato di ammonio, poiché provocherebbe uno scadimento delle performance di abbattimento degli NO_x . Infatti, la precipitazione comporta una sottrazione dell' NH_3 richiesta dall'unità DeNO_x ed un lento afflusso all'AIG della miscela gassosa (dovuto alle incrostazioni formatesi nelle tubazioni);
- La temperatura (T) della miscela gassosa viene desunta dal diagramma di dissociazione del $\text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4$ sulla base della pressione (p), alla quale viene prodotta la miscela gassosa;
- Con p pari a 16-17 bar (condizioni frequenti di esercizio) la T della miscela gassosa deve essere superiore a circa 124°C per evitare la formazione di $\text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4$;
- Si ricorre a dei sistemi di riscaldamento della miscela gassosa per evitare la formazione di $\text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4$ (tracciatura elettrica delle tubazioni e impiego di vapore di processo).



Riscaldamento della miscela gassosa contenente NH_3 lungo il tragitto verso la sezione di iniezione dell'impianto De NO_x



Vantaggi dell'impianto DeNO_x con produzione diretta di NH₃ (processo AOD: Ammonia on demand)

Vantaggi in termini di sicurezza:

- **Eliminazione dei rischi dovuti al trasporto della soluzione acquosa di NH₃;**
- **Eliminazione dei rischi dovuti alle operazioni di carico della soluzione acquosa di NH₃ nei serbatoi;**
- **Gestione semplice del processo (l'idrolisi dell'urea avviene in un range di temperature comprese tra 130-170°C ed è una reazione endotermica).**