



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "PARTHENOPE"
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

Emissioni inquinanti delle TG

(a.a. 2022/2023)

Prof. Ing. Elio Jannelli

Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'ambiente

Dipartimento di Ingegneria

elio.jannelli@uniparthenope.it



Principali inquinanti

Le sostanze inquinanti *primarie*, ossia direttamente prodotte nel processo di combustione degli idrocarburi impiegati per l'alimentazione degli IMT, sono:

- il **monossido di carbonio CO**;
- gli **idrocarburi incombusti** ed i prodotti di parziale ossidazione, indicati sinteticamente con **HC**;
- il **monossido d'azoto NO** ed il **biossido d'azoto NO₂**, indicati sinteticamente con **NO_x** ;
- il **biossido SO₂** e il **triossido di zolfo SO₃**, indicati sinteticamente con **SO_x**;
- il **particolato (PM)**, particelle solide di piccole dimensioni costituite da un nucleo carbonioso e da una frazione organica solubile, indicata spesso come **SOF** (Solubile Organic Fraction) o **VOF** (Volatile Organic Fraction)



Principali inquinanti

Alcuni inquinanti primari possono reagire nell'atmosfera dando luogo ad *inquinanti secondari*:

- **ossidi di azoto** ed **ossidi di zolfo** sono responsabili delle cosiddette **piogge acide**;
- **ossidi di azoto** ed **idrocarburi incombusti** danno luogo, sotto l'azione catalizzatrice della radiazione solare, al cosiddetto "**smog fotochimico**", miscela di composti fortemente irritanti come ozono (O_3) ed aldeidi.

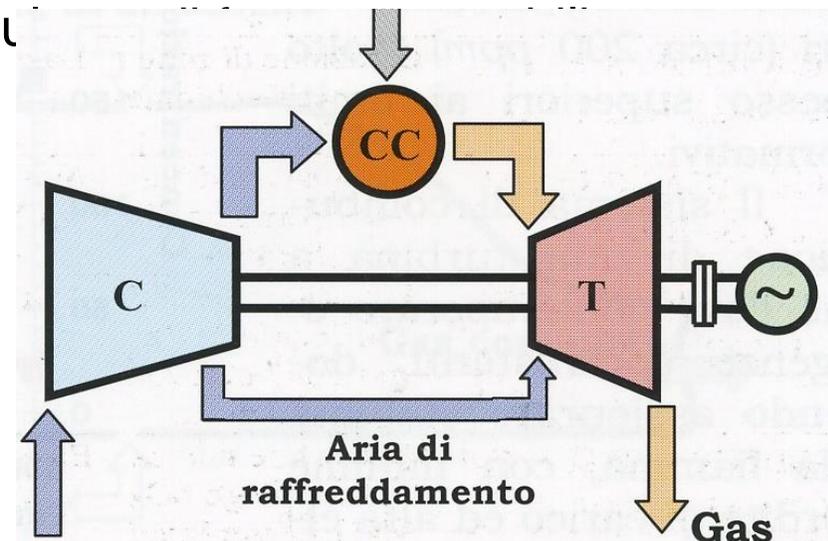


Emissioni delle Turbine a Gas

Le turbine a gas sono impianti a combustione interna alimentate solo con combustibili gassosi o con distillati leggeri pregiati, al fine di evitare il deterioramento dei componenti operanti a più elevata temperatura.

Nel caso di alimentazione con gas naturale, l'assenza di zolfo e di inerti nel combustibile comporta che le emissioni di ossidi di zolfo, di idrocarburi incombusti e di particolato risu-

Gli unici inquinanti di effettivo interesse sono gli ossidi azoto (NO_x) ed, in minore misura, il monossido di carbonio (CO).

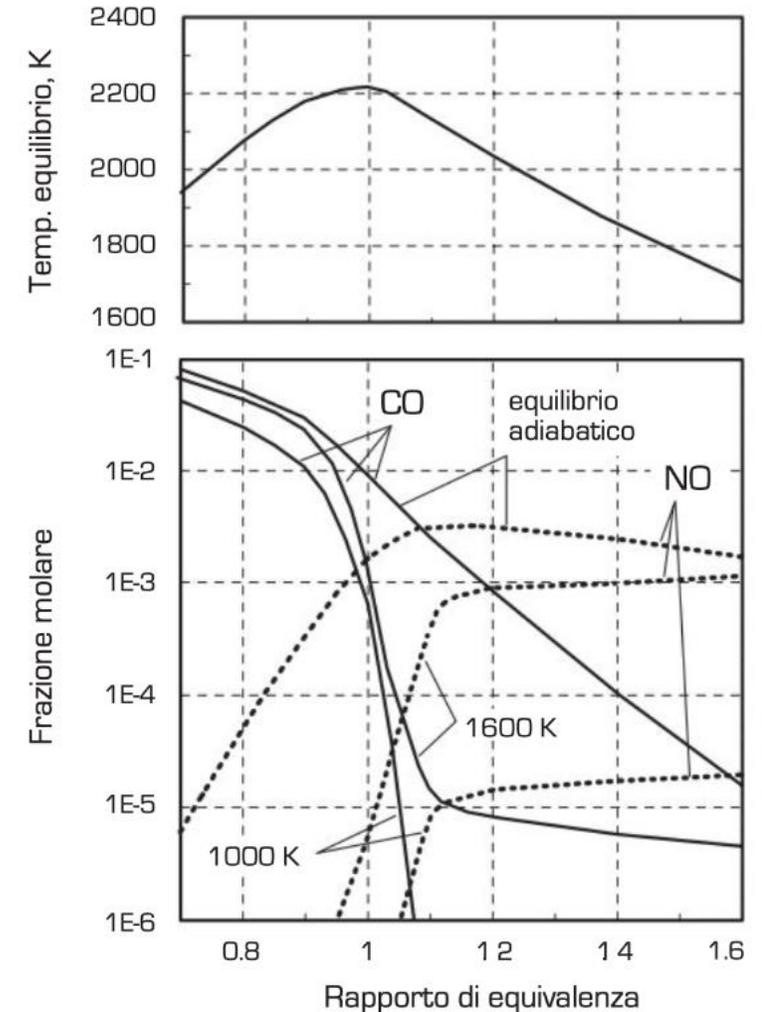




Emissioni delle Turbine a Gas

Temperatura e frazioni molari all'equilibrio di una fiamma premiscelata Metano-Aria

Le concentrazioni di CO ed NO rilevate nei gas di scarico di un IMT a c.i. sono molto superiori a quelle relative alle cond. di equilibrio chimico a dimostrazione del fatto che i meccanismi di formazione sono governati dalla cinetica chimica.





Monossido di Carbonio - CO

- Gas incolore, inodore, infiammabile, e molto tossico.
- Si forma durante le combustioni delle sostanze organiche, quando risultano incomplete per difetto di aria (cioè per mancanza di ossigeno).
- Rappresenta l'inquinante gassoso più abbondante in atmosfera.
- La principale sorgente di questa sostanza è rappresentata dal traffico veicolare (circa l'80% della produzione complessiva; in ambito urbano anche fino al 90-95%), in particolare dai gas di scarico dei motori ad a.c.
- La tossicità del monossido di carbonio è dovuta alla sua capacità di legarsi con l'emoglobina del sangue in concorrenza con l'ossigeno, formando carbossiemoglobina, interferendo così sul trasporto di ossigeno ai tessuti.



Formazione di CO

- Il CO si forma durante la combustione degli idrocarburi, che avviene attraverso una serie di reazioni intermedie
 $RH \rightarrow R \text{ (radicali)} \rightarrow RO_2 \text{ (perossidi)} \rightarrow RCHO \text{ (aldeidi)} \rightarrow RCO \text{ (chetoni)} \rightarrow CO$
e viene successivamente ossidato a CO_2 .
- La reazione di **ossidazione** del CO è **relativamente lenta** rispetto a quella di **formazione** del CO stesso: ad elevata temperatura i tempi a disposizione sono comunque sufficienti per raggiungere l'equilibrio chimico, mentre non lo sono a bassa temperatura.
- Inoltre, ad alta temperatura ($1800-2000^\circ C$), gli equilibri chimici prevedono che, anche in presenza di quantità adeguate di ossigeno, una parte della CO_2 che potrebbe teoricamente formarsi resti in forma **dissociata**, contribuendo ad elevare la concentrazione di CO.

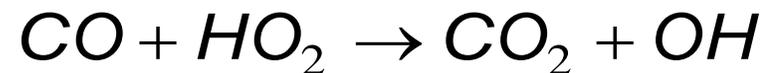
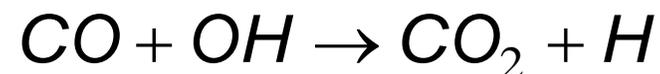
Formazione di CO



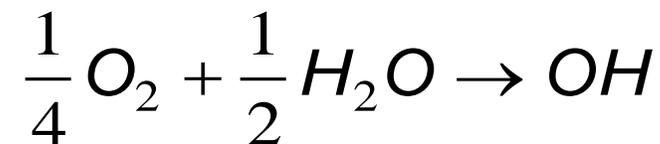
- Durante il rapido abbassamento della temperatura che si verifica nel corso dell'espansione, la velocità di ossidazione del CO a CO₂ rallenta, fino ad un vero e proprio “congelamento” delle concentrazioni di CO: nei gas di scarico la concentrazione di tale inquinante risulta pertanto maggiore di quella che si ricaverebbe dal rispetto degli equilibri chimici a bassa temperatura.

Formazione di CO

- Reazioni di ossidazione



- Equilibrio chimico per $[CO_2]$, $[H]$, $[OH]$



$$[OH]_e = k_1 [O_2]_e^{1/4} [H_2O]_e^{1/2}$$

- Velocità di formazione di CO

$$\frac{d[CO]}{dt} = k_2 [CO][OH]_e = k_3 [CO][O_2]_e^{1/4} [H_2O]_e^{1/2}$$

$$k_i = A \cdot \exp\left(\frac{-Ea}{T}\right)$$





Monossido di Azoto - NO

- Gas incolore, insapore ed inodore
- Prodotto soprattutto nel corso dei processi di combustione ad alta temperatura.
- Viene poi ossidato in atmosfera dall'ossigeno e più rapidamente dall'ozono producendo biossido di azoto (NO_2).
- La quantità prodotta è tanto più elevata quanto maggiore è la temperatura di combustione e quanto più veloce è il successivo raffreddamento dei gas prodotti, che impedisce la decomposizione in azoto ed ossigeno.
- Il monossido di azoto NO, analogamente al monossido di carbonio, agisce sull'emoglobina, fissandosi ad essa con formazione di metamoglobina e nitrosometamoglobina.



Biossido di Azoto - NO

- Il biossido di azoto presenta una tossicità fino a quattro volte maggiore di quella del monossido di azoto. Forte ossidante ed irritante, il biossido di azoto esercita il suo effetto tossico principalmente sugli occhi, sulle mucose e sui polmoni.
- Il biossido di azoto si può ritenere uno degli inquinanti atmosferici più pericolosi, non solo per la sua natura irritante sull'uomo, ma anche perché, in condizioni di forte irraggiamento solare, provoca delle reazioni fotochimiche secondarie che creano altre sostanze inquinanti "smog fotochimico".
- Inoltre, trasformandosi in presenza di umidità in acido nitrico, esso è una delle cause della formazione delle cosiddette "piogge acide", che provocano ingenti danni alle piante e più in generale alterazioni negli equilibri ecologici ambientali.



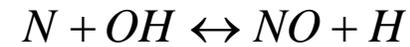
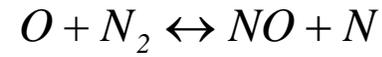
Formazione NO

Durante il processo di combustione, NO si forma secondo tre diversi meccanismi in relazione ai quali si parla solitamente di

- **thermal NO** deriva direttamente dall'ossidazione dell'azoto molecolare presente nell'aria comburente. Rappresenta la frazione preponderante nel caso di sistemi di combustione alimentati con combustibili liquidi e soprattutto gassosi.
- **prompt NO** è prodotto in maniera molto veloce a seguito di reazioni tra l'azoto dell'aria ed i radicali idrocarburici che si formano in corrispondenza della fiamma.
- **fuel NO** si forma per ossidazione dell'azoto originariamente presente nel combustibile. Assume grande rilevanza nel caso di impiego di combustibili liquidi caratterizzati da tenori di azoto superiori a circa 150-200 ppm.



La formazione di NO è governata dalla cinetica chimica ed è formulata attraverso il meccanismo di **Zel'dovich**



Formazione thermal NO

Approssimazione stazionarietà azoto atomico

$$\frac{d[N]}{dt} \approx 0$$

Equilibrio chimico per [O], [O₂], [OH], [H], [N₂]

Velocità di formazione

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R_1 \left\{ 1 - ([NO]/[NO]_e)^2 \right\}}{1 + ([NO]/[NO]_e) R_1 / (R_2 + R_3)}$$

Costanti cinetiche

$$R_1 = k_1^+ [O]_e [N_2]_e k_1^+ = 7.6 \cdot 10^{13} \cdot \exp\left(\frac{-38000}{T}\right)$$

$$R_2 = k_2^- [NO]_e [O]_e k_2^- = 1.5 \cdot 10^9 \cdot \exp\left(\frac{-19500}{T}\right)$$

$$R_3 = k_3^- [NO]_e [H]_e k_3^- = 2 \cdot 10^{14} \cdot \exp\left(\frac{-23650}{T}\right)$$



Prompt NOx

I prompt NOx si riferiscono alla quota di ossidi di azoto prodotti in maniera molto veloce a seguito di reazioni tra l'azoto dell'aria ed i radicali idrocarburici che si formano in corrispondenza del fronte di fiamma.

Durante la prima fase della combustione i radicali CH presenti nel combustibile reagiscono con l'azoto dell'aria formando gruppi HCN e azoto atomico, i quali a loro volta reagiscono con l'ossigeno formando NO.

Poiché la formazione di tali NOx richiede la presenza di carbonio, essi non sono prodotti dalla combustione di idrogeno puro.

I prompt NOx rivestono un ruolo significativo solo nel caso di combustioni ricche e rappresentano comunque una piccola frazione degli NOx totali. Infatti, la velocità delle reazioni di combustione è solitamente sufficientemente elevata da ridurre al minimo la quantità di radicali CH disponibili per reagire con l'azoto molecolare.

Fuel NOx

I fuel NOx si formano per ossidazione dell'azoto presente nel combustibile, cosicché sono presenti soprattutto nel caso di impiego di combustibili liquidi (che contengono fino allo 0,5% di azoto) e, soprattutto, solidi

Il meccanismo di formazione dei fuel NOx (originariamente studiato soprattutto da Pershing e Wendt alla fine degli anni '70) non è ancora completamente noto in tutti i suoi dettagli.

Secondo le interpretazioni più accreditate, la formazione dei fuel NOx ha origine dal processo di devolatilizzazione del combustibile, durante il quale l'azoto liberato conduce alla formazione in parte di HCN e in parte di NH₃. Queste due specie chimiche danno luogo, a loro volta, a reazioni che, portano alla formazione di NO oppure di N₂.

Complessivamente, la formazione dei fuel NOx è influenzata dal rapporto aria-combustibile e dalla temperatura, mentre dipende debolmente dal tipo di legame dell'azoto nel combustibile.

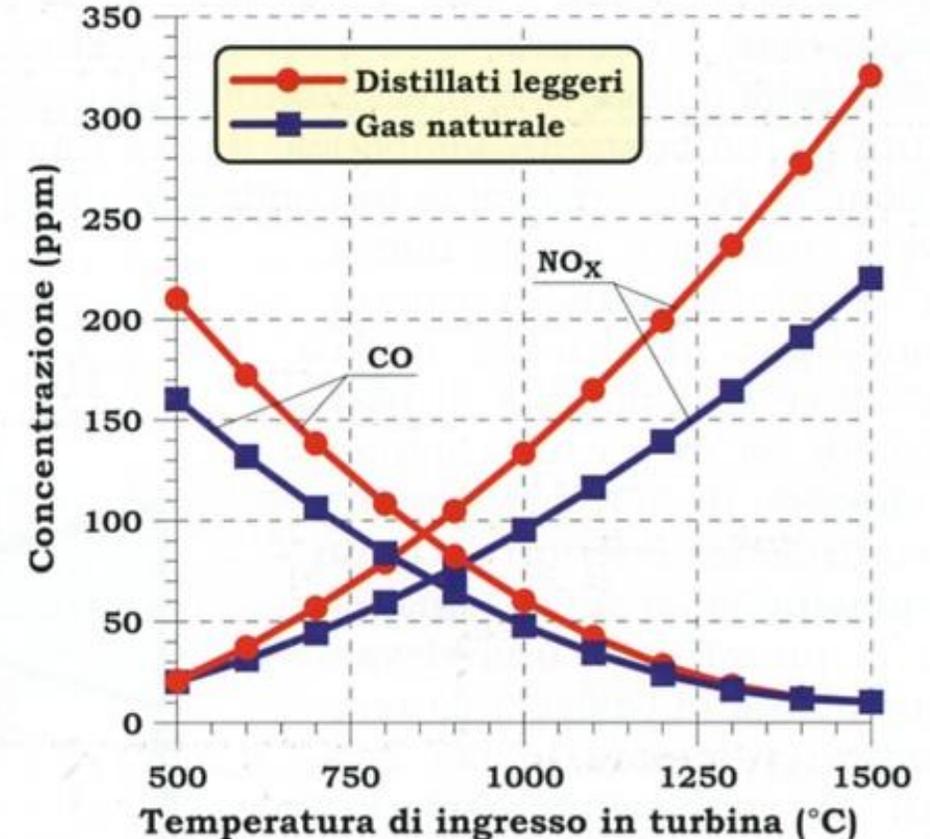


Riduzione dei NOx nelle TG

Il miglioramento delle prestazioni delle turbine a gas è come noto fortemente legato all'aumento della temperatura dei gas all'ingresso della turbina, peraltro accompagnato da un corrispondente aumento del rapporto di compressione.

Le emissioni di NOx aumentano anch'esse – esponenzialmente - con la temperatura e con la pressione di combustione.

Le emissioni di CO e di idrocarburi incombusti diminuiscono all'aumentare della temperatura di combustione.



Riduzione dei NOx nelle TG

Il sistema di combustione deve contemperare esigenze contrastanti:

- stabilità della fiamma
- minime perdite di carico
- alta efficienza di combustione
- uniformità del profilo di temperatura
- evitare danneggiamenti all'involucro del combustore ed alle pale della turbina.

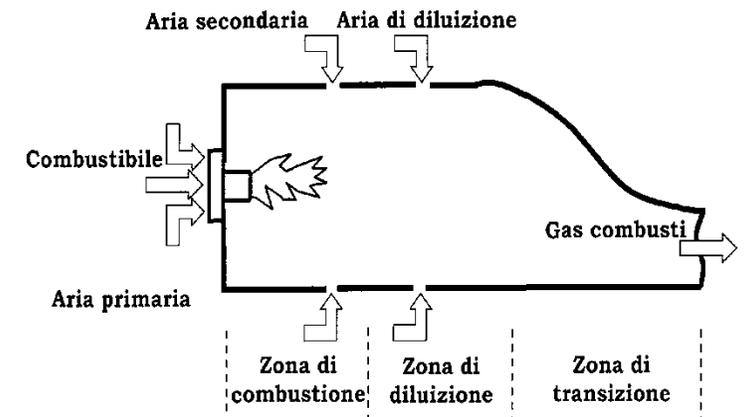
Idealmente, il processo di combustione dovrebbe avvenire in presenza di condizioni stechiometriche.

In una TG la camera di combustione è sostanzialmente adiabatica; le condizioni stechiometriche darebbero luogo ad una temperatura di fine combustione troppo elevata (2000-2100°C), cosicché **è necessario operare con forti diluizioni.**

Nei combustori "convenzionali", si distinguono

fondamentalmente tre zone principali:

- zona di combustione con l'aria primaria,
- zona di diluizione con l'aria secondaria
- zona di raffreddamento finale dei gas combusti con l'aria di diluizione.



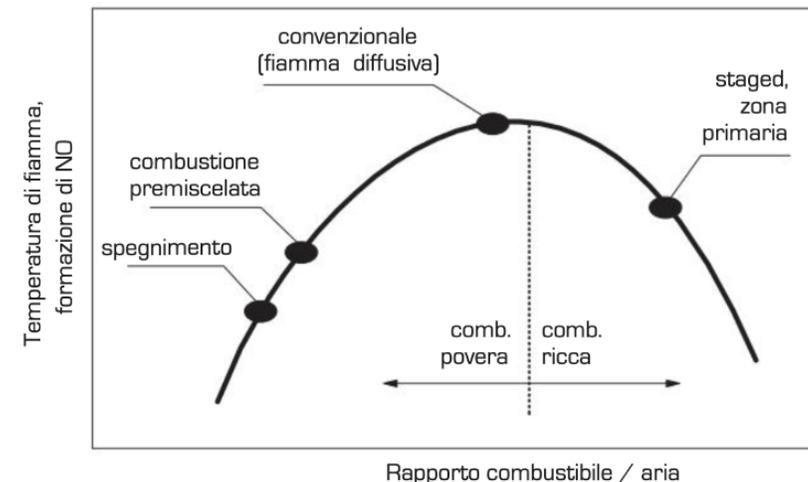


Riduzione dei NOx nelle TG

Un combustore convenzionale (sprovvisto accorgimenti per limitare gli NOx) evidenzia temperature massime di fiamma molto elevate (oltre 2000 °C), anche se la temperatura di uscita dal combustore è molto inferiore (circa 1200-1400°C).

Ciò è imputabile al fatto che la combustione si realizza con una **fiamma diffusiva**, in **condizioni stechiometriche**.

Se il tempo di permanenza a temperature superiori a quella “critica” è sufficientemente lungo un combustore convenzionale produce elevate concentrazioni di NOx allo scarico (200-400 ppm).

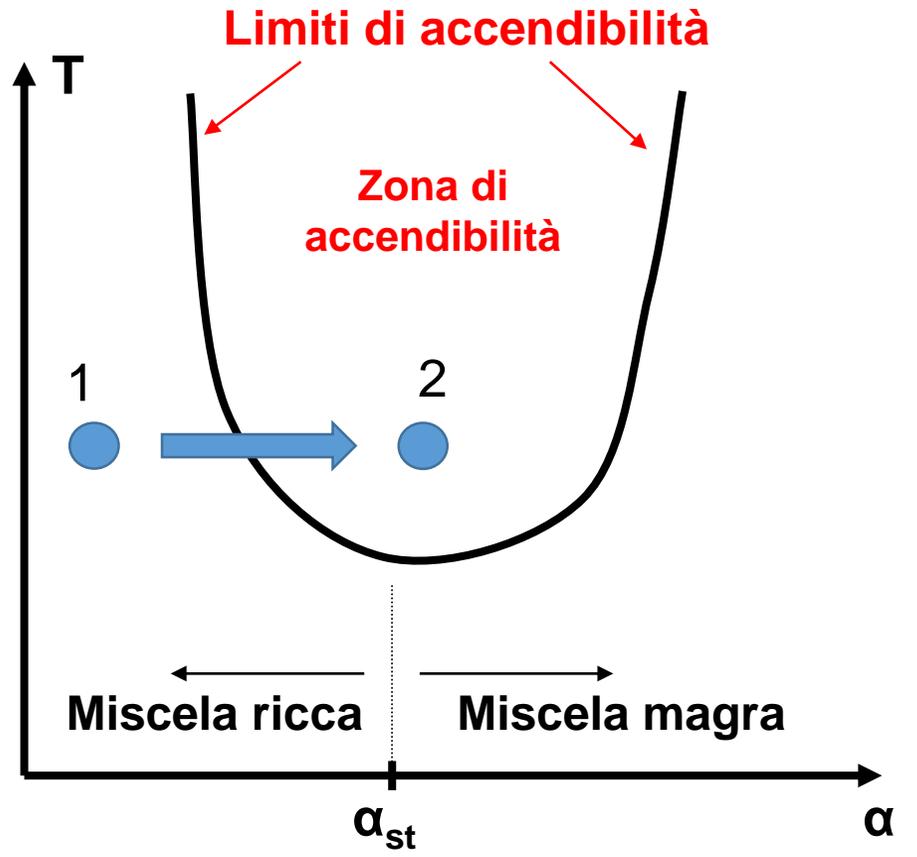
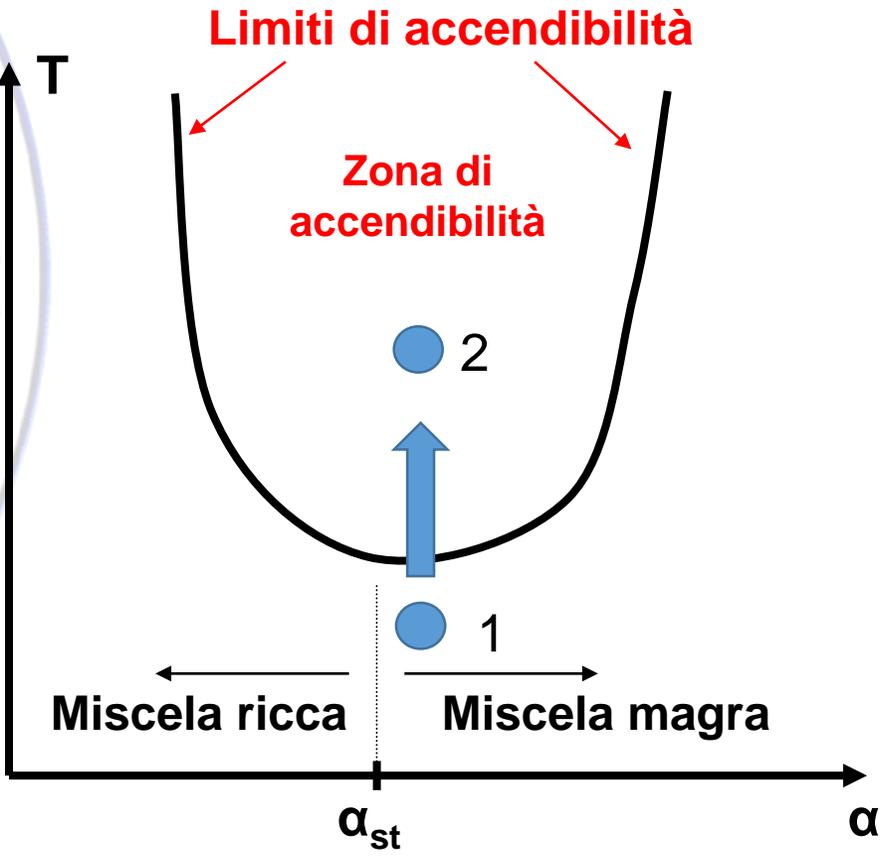




Combustione

Premiscelata

Diffusiva

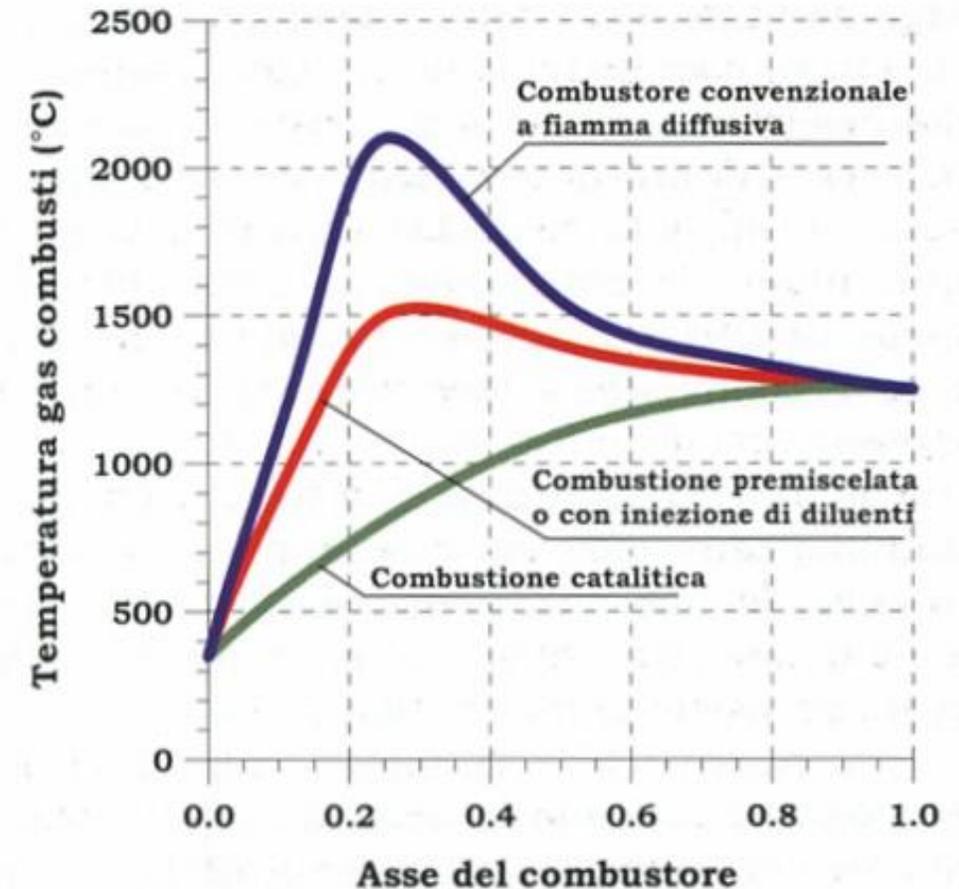




Riduzione dei NOx nelle TG

Le metodologie impiegate per ridurre l'emissione di NOx sono:

- **iniezione di diluenti inerti** (acqua o vapore);
- impiego di combustori a fiamma **premiscelata**
- **combustione catalitica.**
- **processi di rimozione** selettiva catalitica (SCR) degli NOx allo scarico.



Controllo dei NOx mediante iniezione di diluenti

L'effetto del diluente, che deve essere inerte, è essenzialmente quello di assorbire una parte dell'energia termica liberata dalle reazioni di combustione, riducendo così la temperatura di fiamma.

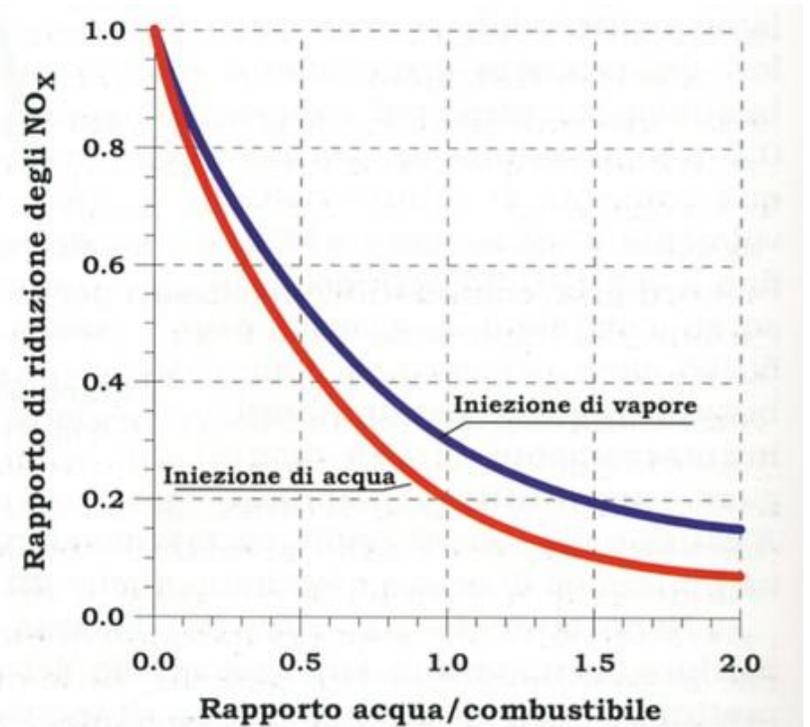
Il fluido più utilizzato è l'acqua, allo stato liquido o di vapore. L'acqua, oltre ad essere facilmente disponibile, è il diluente più efficace in relazione al suo elevato calore specifico soprattutto durante l'eventuale vaporizzazione.

Le quantità solitamente iniettate sono relativamente modeste, con valori del rapporto acqua/combustibile compresi nel campo 0,5-1,5.

La diluizione con acqua consente di ridurre notevolmente le emissioni di NOx, fino a

- circa 40-45 ppm nel caso di combustibili gassosi
- Circa 60-65 ppm nel caso di combustibili liquidi, caratterizzati intrinsecamente da una maggiore temperatura di fiamma.

L'aumento della portata massica che espande attraverso la turbina determina anche un aumento della potenza prodotta.



Controllo dei NOx mediante iniezione di diluenti

TG con iniezione di acqua

Nonostante la sua efficacia, l'acqua deve comunque essere trattata, produce incrostazioni sulla superficie del combustore e della turbina e soprattutto, a parità di temperatura di ingresso in turbina, determina un sensibile peggioramento del rendimento dell'impianto.

Per esempio, nel caso di una turbina a gas alimentata con gas naturale, l'iniezione di acqua con rapporto acqua/combustibile pari ad 1, causa una diminuzione di rendimento di circa 2 punti percentuali operando in ciclo semplice, ed un aumento della potenza prodotta del 10%.

TG con iniezione vapore

Diversamente dall'acqua, il vapore deve essere prodotto, cosicché il suo impiego avviene in pratica solo nel caso di impianti di turbina a gas integrati con generatori di vapore a recupero

Rispetto all'iniezione d'acqua, il vapore assorbe minori quantità di calore per unità di massa (dovendosi solo surriscaldare)

L'iniezione di vapore, prodotto a spese dell'energia termica allo scarico, determina un aumento del rendimento e della potenza dell'impianto, operando in ciclo semplice.



Controllo dei NOx mediante combustione premiscelata

In alternativa all'iniezione di acqua o di vapore, è possibile utilizzare quale diluente una parte della stessa aria comburente, attraverso una opportuna redistribuzione dei flussi di aria all'interno del combustore, operando pertanto con **miscele magre e combustione premiscelata**.

Poiché non utilizzano acqua, tali combustori sono indicati come combustori a "secco" a basse emissioni di NOx (**dry-low NOx, DLN**) oppure sistemi a combustione magra premiscelata (**lean-premix, LPM**).

La diluizione con aria è in grado di ridurre efficacemente la temperatura di fiamma, e quindi la produzione di NOx, e presenta il non trascurabile vantaggio di non causare alcuna penalizzazione sul rendimento.



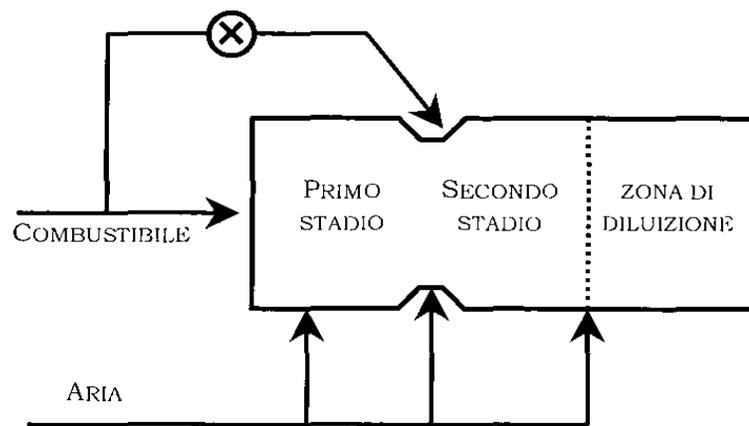
Controllo dei NOx mediante combustione premiscelata

Requisiti

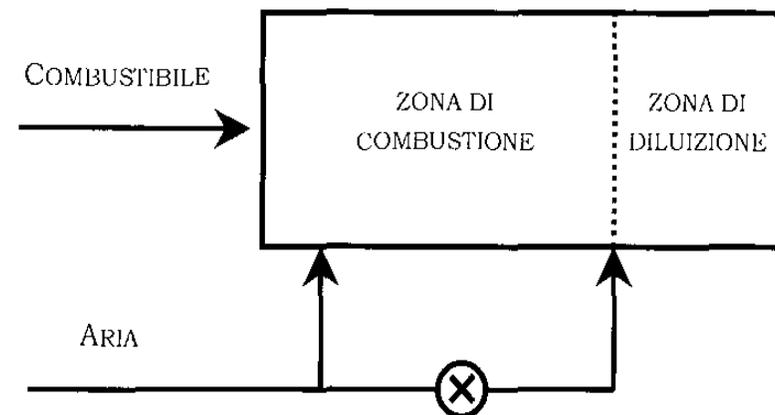
- Assicurare ossidazione del combustibile
- Mantenere stabilità fiamma
- Garantire COT target
- Realizzare buon miscelamento
- Evitare flash-back e blow-off

Controllo dei NOx mediante combustione premiscelata

Uno dei maggiori problemi di sviluppo dei combustori DLN è rappresentato dalla necessità di garantire condizioni di stabilità alla fiamma anche in condizioni di carico parziale, nelle quali la turbina a gas deve operare con portate di aria e combustibile e temperatura dell'aria in ingresso inferiori a quelle nominali. La soluzione è la combustione a stadi



FUEL STAGED



AIR STAGED



Controllo dei NOx mediante combustione premiscelata

Tali combustori prevedono la ripartizione della zona di combustione in due stadi,

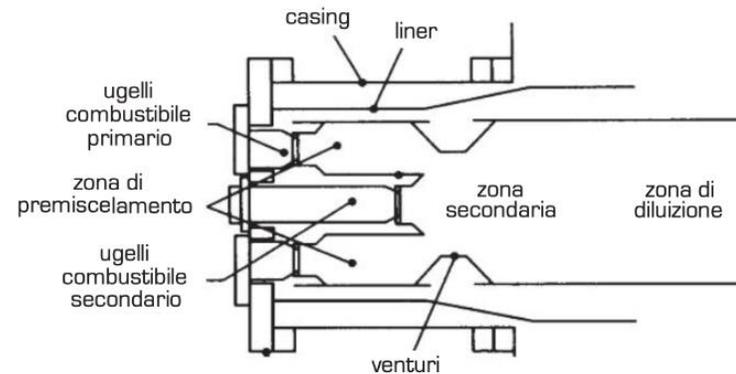
1. nel primo stadio sono presenti più bruciatori (solitamente 6-8, ma in alcune realizzazioni fino anche a 30-40) che realizzano il premiscelamento di gran parte del combustibile con l'aria;
2. nel secondo stadio la restante parte di combustibile alimenta un bruciatore a fiamma diffusa in maniera tale da stabilizzare la combustione.

La stabilità di funzionamento del combustore ai carichi parziali viene assicurata mediante la ripartizione del combustibile fra i due stadi (fuel staging).

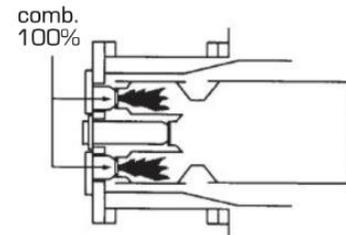
I combustori di seconda generazione (sviluppati tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90) presentano emissioni di NOx dell'ordine di 25 ppm, mentre le realizzazioni più recenti sono caratterizzate da emissioni di NOx inferiori a 10 ppm. I combustori a secco operano in condizioni di fiamma pienamente premiscelata solo in prossimità del carico nominale, mentre ai bassi carichi è necessario adottare specifiche strategie di ripartizione del combustibile e/o dell'aria, con conseguenti maggiori emissioni di inquinanti.



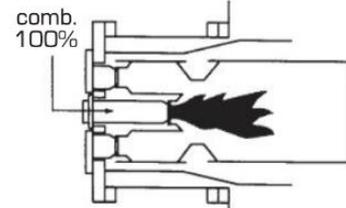
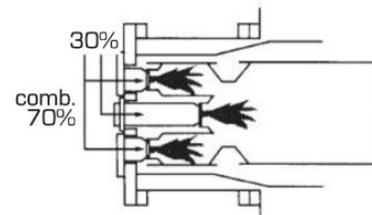
Controllo dei NOx mediante combustione premiscelata



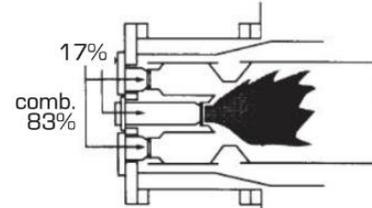
da accensione a carico 20%



da 20% a 50% di carico



transizione a combustione premiscelata



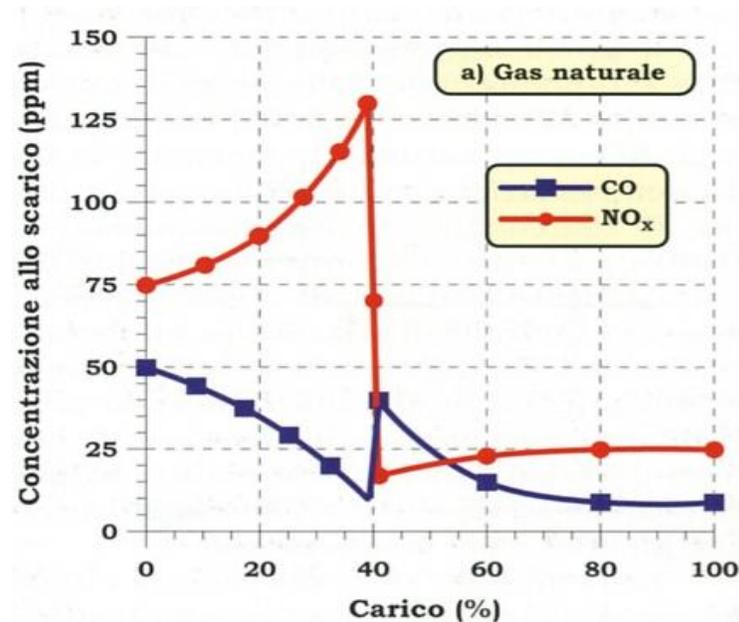
combustione premiscelata da 50% a 100% di carico

Strategia di funzionamento di un combustore Dry Low NOx della General Electric

Controllo dei NOx mediante combustione premiscelata

A basso carico le emissioni di CO e di NOx sono praticamente simili a quelle dei combustori convenzionali a fiamma diffusa perché non sono possibili condizioni di combustione premiscelata,

Al crescere del carico, in relazione alla diminuzione del rapporto aria-combustibile, si ha un aumento delle emissioni di NOx ed una diminuzione delle emissioni di CO.



La discontinuità delle curve in prossimità di un carico pari al 40-50% di quello nominale evidenzia il passaggio alle condizioni di combustione premiscelata.

In corrispondenza di condizioni di funzionamento nominali, le emissioni di CO e di NOx si attestano su valori molto inferiori rispetto a quelli dei combustori convenzionali.



Controllo dei NOx mediante combustione catalitica

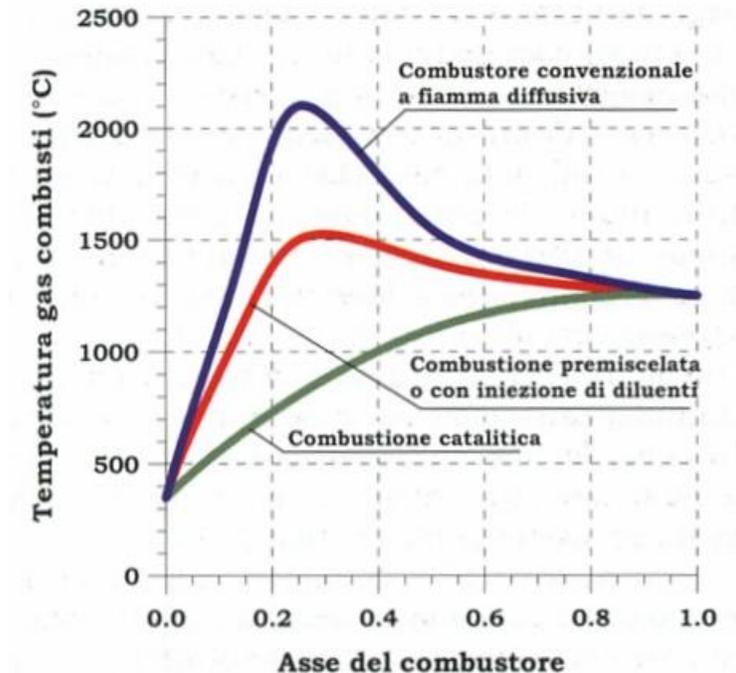
La necessità di ridurre ulteriormente le emissioni di NOx (al di sotto dei 3-5 ppm), ha spinto numerosi costruttori ad investire ingenti risorse nello sviluppo della combustione catalitica.

Nei sistemi catalitici, il combustibile e l'aria di combustione vengono premiscelati a monte del combustore, all'interno del quale le reazioni vengono attivate da un catalizzatore.

Il vantaggio della combustione catalitica è di assicurare un aumento progressivo della temperatura di combustione.

La massima temperatura viene raggiunta in prossimità dell'uscita del combustore.

Il profilo di temperatura non presenta picchi, caratterizzati da forti velocità di formazione degli NOx.



Controllo dei NOx mediante combustione catalitica

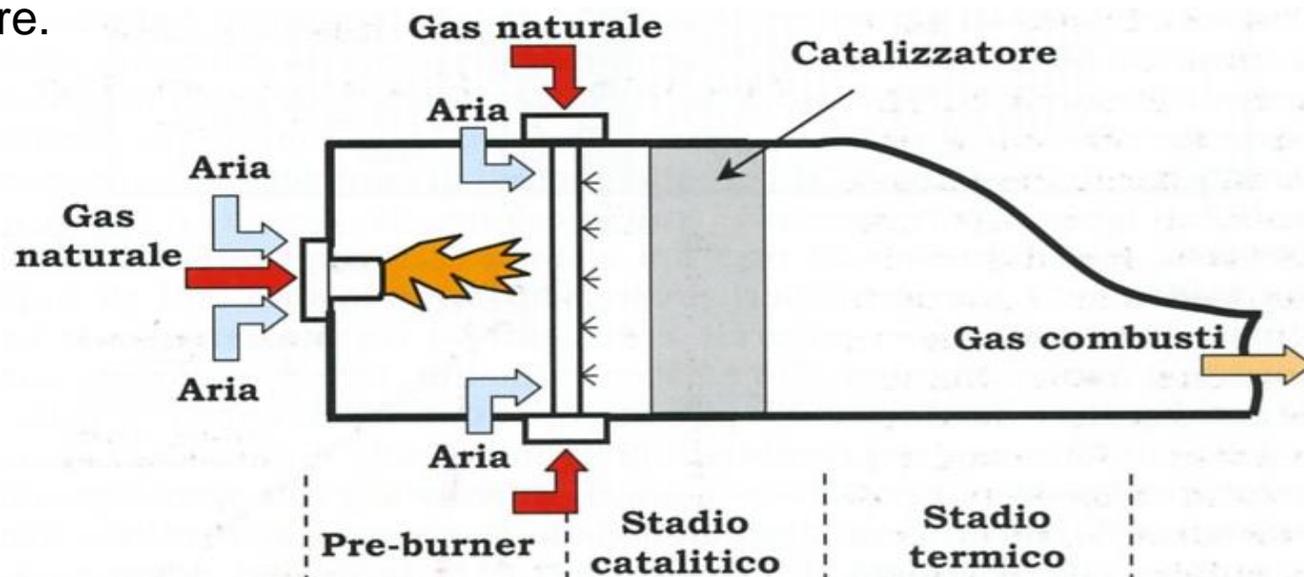
Un combustore catalitico comprende essenzialmente un prebruciatore, l'iniettore principale, il reattore catalitico e il condotto di alimentazione alla turbina (liner).

Il prebruciatore viene utilizzato ai bassi carichi per incrementare la temperatura all'ingresso del reattore catalitico.

In un sistema catalitico la combustione avviene inizialmente per diffusione in corrispondenza della superficie del catalizzatore.

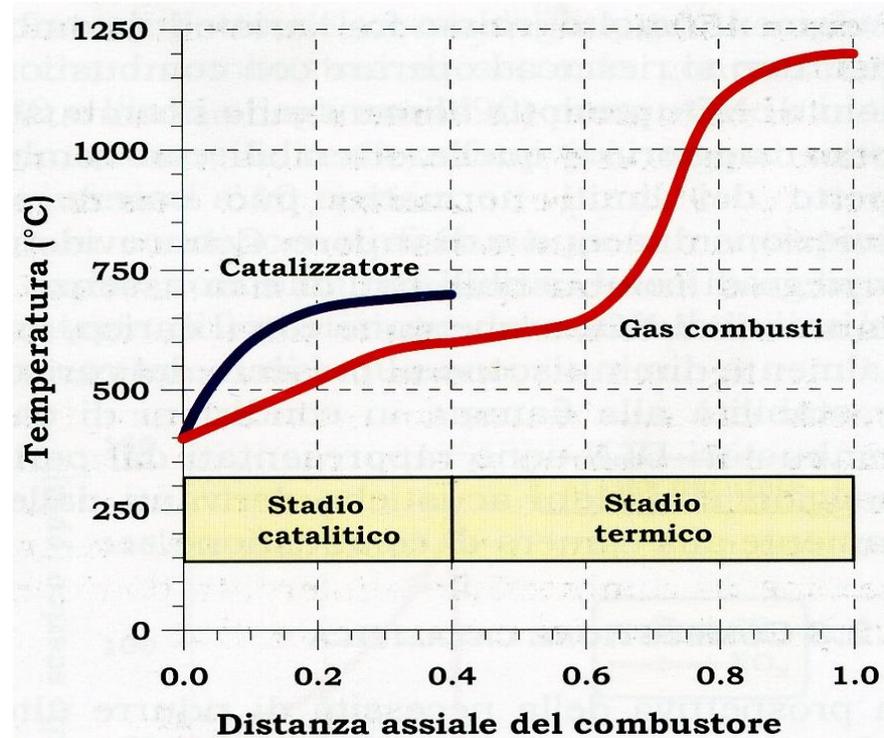
A tali reazioni di combustione corrisponde un aumento della temperatura della miscela gassosa, cosicché una volta raggiunta una temperatura sufficientemente elevata, le reazioni di combustione possono avvenire anche in fase omogenea gassosa senza l'intervento del catalizzatore.

Nella sua globalità, il processo di combustione consta pertanto di uno stadio catalitico seguito da uno stadio termico



Controllo dei NOx mediante combustione catalitica

- Il profilo di temperatura dei gas risulta privo di picchi
- I massimi valori di temperatura vengono raggiunti solo in prossimità della sezione d'uscita dello stadio termico,
- Nello stadio termico viene garantito un tempo di permanenza sufficiente a garantire la completa combustione del CO e degli HC.





Controllo dei NOx mediante combustione catalitica

Problematiche di esercizio dei combustori catalitici

Durata del reattore catalitico,

Deterioramento progressivo durante il funzionamento prolungato ad elevata temperatura.

Sono allo studio nuovi catalizzatori depositati su supporti ceramici.

Necessità di un combustore ausiliario

Per incrementare la temperatura dell'aria uscente dal compressore fino al citato valore di circa 450 °C.

Superato nelle turbine a gas di nuova generazione, caratterizzate da maggiori rapporti di compressione o nelle microturbine con l'impiego della rigenerazione termica.



Rimozione dei NOx con sistemi SCR

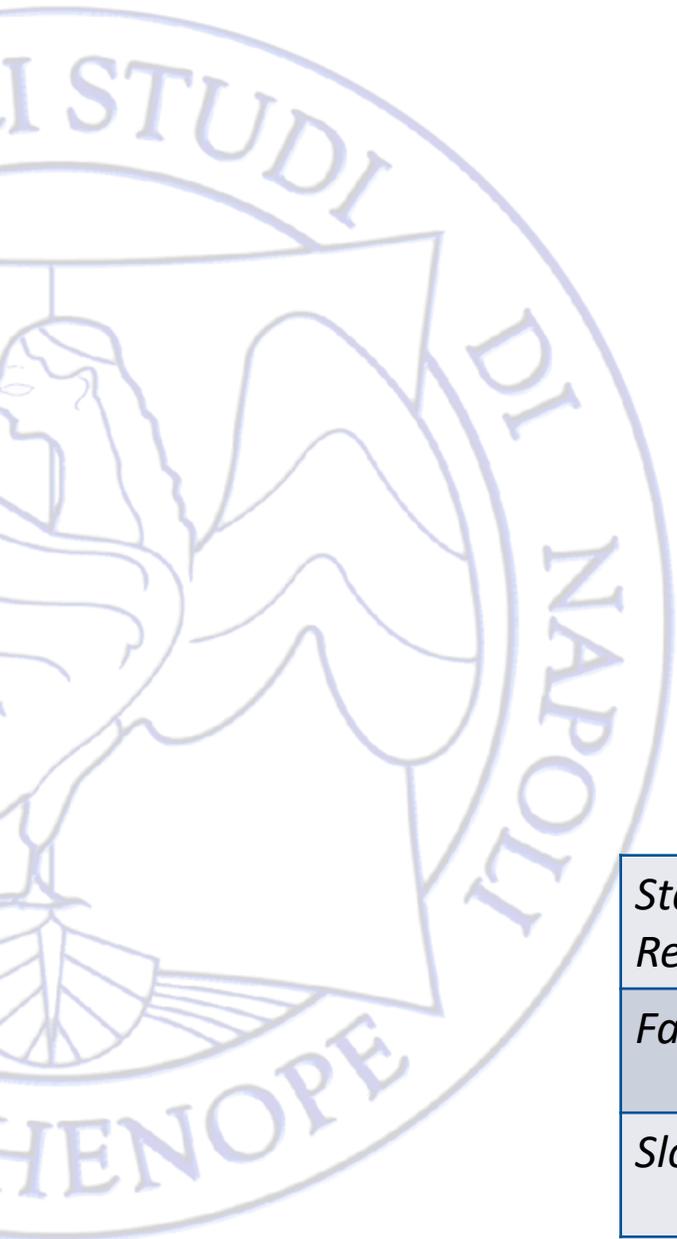
Anche nelle TG (come per gli IMTV), il rispetto dei limiti di emissione per gli NOx può richiedere l'impiego di sistemi di rimozione dei NOx dai gas combusti basati su processi catalitici selettivi (SCR - Selective Catalytic Reduction).

Tali sistemi sono caratterizzati da efficienze di rimozione dei NOx dell'85-90%

Livelli di emissioni inferiori ai 10 ppm richiedono l'abbinamento con altri metodi (per esempio iniezione di vapore o combustori DLN).

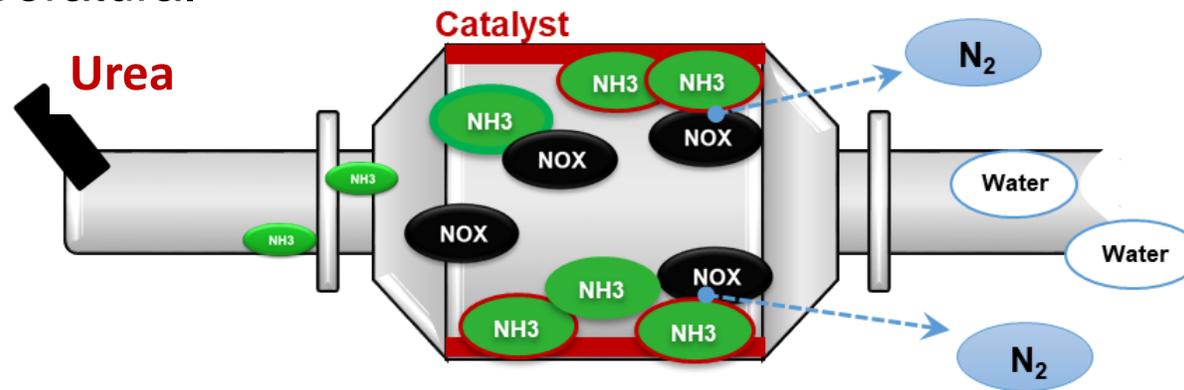
Il reagente (riducente) che determina le reazioni SCR è l'ammoniaca (NH_3), prodotto in seguito all'iniezione di una soluzione a base di urea nei gas combusti.

In presenza di ossigeno e di un opportuno catalizzatore, l'ammoniaca reagisce con i NOx producendo azoto molecolare e acqua secondo diverse reazioni chimiche e complessi meccanismi di adsorbimento e desorbimento dei reagenti sulla matrice del catalizzatore.



Rimozione dei NOx con sistemi SCR

Il sistema SCR è costituito da una matrice a nido d'ape, rivestita di materiale catalitico a base di Vanadio o Tungsteno. Le reazioni hanno luogo sul substrato catalitico che adsorbe il reagente (NH₃) con una capacità legata alla temperatura.



<i>Standard Reaction</i>	$4NH_3^* + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$
<i>Fast Reaction</i>	$2NH_3^* + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$
<i>Slow Reaction</i>	$4NH_3^* + 3NO_2 \rightarrow 3.5N_2 + 6H_2O$

Il processo di riduzione può essere descritto attraverso tre reazioni di riduzione principali.

Rimozione dei NOx con sistemi SCR

Problematiche di esercizio

- Efficienza di conversione dipendente da: geometria e composizione del catalizzatore, alimentazione corretta ed uniforme di ammoniacca.
- Necessità di operare a temperature quanto più possibile costanti, nel range 300-400 °C, in relazione alla forte dipendenza dell'efficienza di conversione dei NOx dalla temperatura.
- L'intervallo di temperatura operativo rende impossibile l'installazione di tali sistemi allo scarico di turbine a gas operanti in ciclo semplice, a causa della temperatura di scarico troppo elevata (450-600 °C).
- E' necessario porre molta attenzione al rilascio di ammoniacca a valle del sistema (ammonia slip). Per tale ragione si opera con miscele sub-stechiometriche che impediscono di raggiungere efficienze di conversione prossime al 100%.
- La presenza del sistema introduce una perdita di carico allo scarico.
- Danneggiamento del catalizzatore causato dalle pur piccole quantità di ossidi di zolfo prodotte dalla combustione dei combustibili liquidi



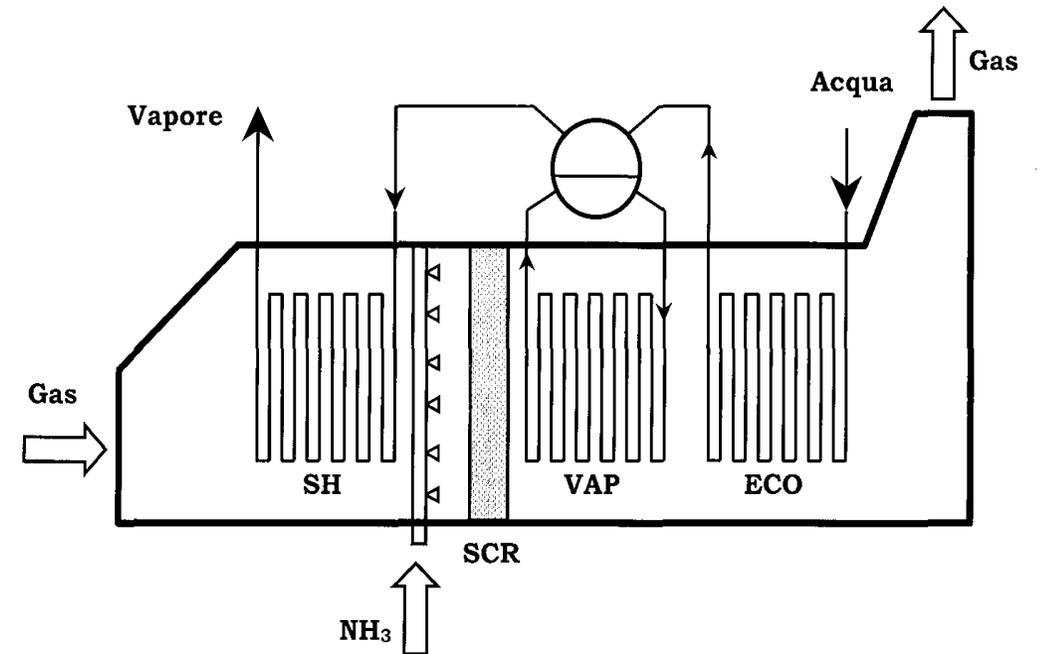
Rimozione dei NOx con sistemi SCR

Applicazione a cicli combinati e TG in cogenerazione

La temperatura operativa richiesta dal catalizzatore impone

- la localizzazione del sistema SCR all'interno del generatore di vapore a recupero (GVR), tipicamente in corrispondenza del vaporizzatore.
- la necessità di una efficace regolazione della temperatura, non sempre agevole, specie in condizioni di carico parziale.

Ulteriori problemi possono derivare dalla eventuale presenza di ossidi di zolfo nei gas combusti, che possono dar luogo alla formazione di solfato e di bisolfato di ammonio che causano sporcamento e incrostazioni delle superfici di scambio termico e del reattore SCR e sono fonte di particolato allo scarico.





Bibliografia

Giovanni Lozza, “Turbine a gas e cicli combinati”,
Società Editrice Esculapio, ISBN 978-88-7488-934-1.