

Forni



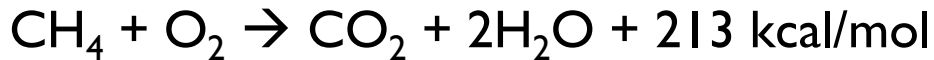
Vengono utilizzati nei casi sia necessario riscaldare il fluido ad una temperatura molto alta non raggiungibile con gli scambiatori di calore convenzionali.

Reazioni di combustione

La reazione di combustione consiste in un'ossidazione esotermica:



Considerando la combustione del metano:



Combustibile: solitamente vengono utilizzati idrocarburi (alto calore di combustione) sia in forma liquida che gassosa.

Comburente: ossigeno, aria

Caratteristiche dei combustibili

Densità

Peso Specifico: (rapporto densità gas/densità aria) per combustibili gassosi, viene determinato con l'effusimetro di Shilling per cui spesso questo dato viene indicato semplicemente come Shilling.

Potere Calorifico: Inferiore: esprime la quantità di calore sviluppata dalla combustione di un'unità di combustibile considerando l'acqua prodotta dalla reazione in fase vapore. Nelle operazioni industriali dove le temperature sono superiori ai 100° C l'acqua è sempre in fase vapore.

Viscosità

Contenuto di zolfo

Contenuto metalli

Rapporto C/H

Polveri



Caratteristiche dei combustibili

Gas Combustibile

E' una miscela di idrocarburi leggeri e idrogeno in fase gassosa.

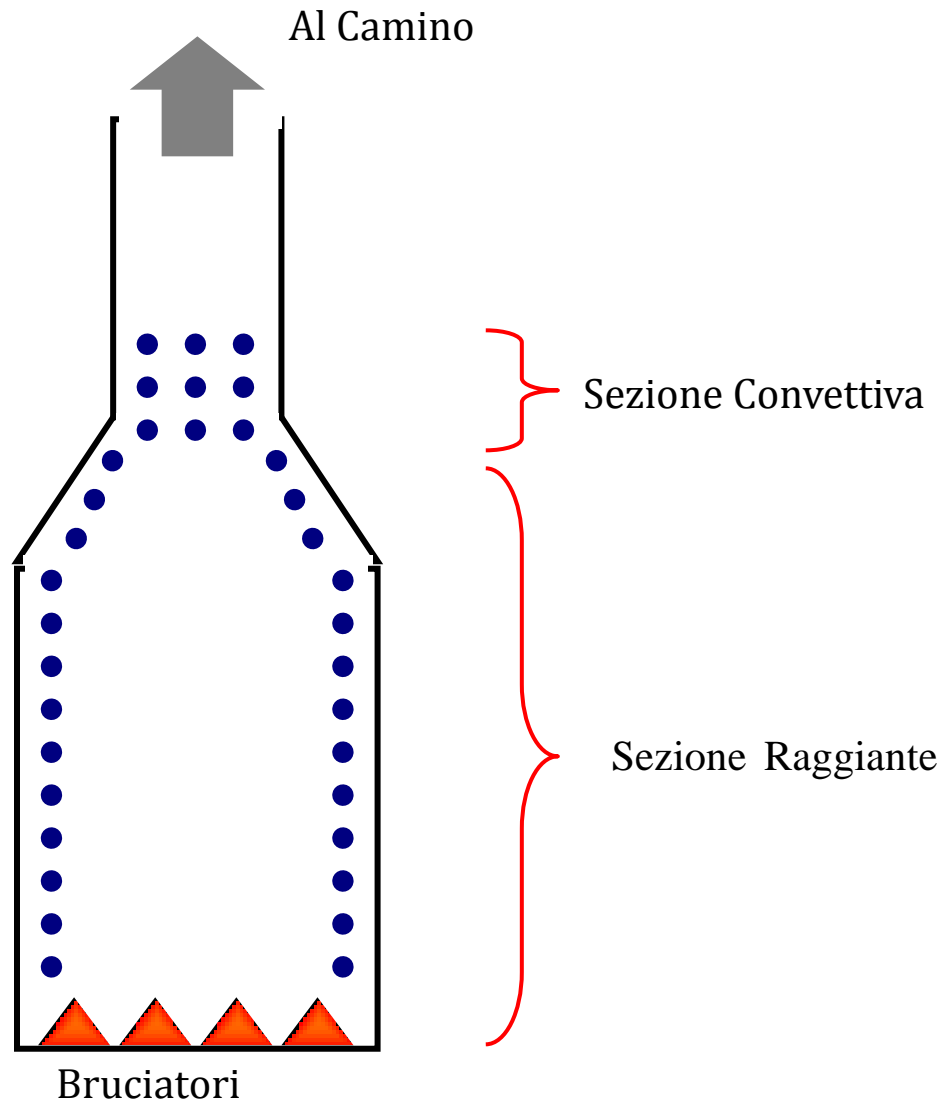
Shilling	0.6 – 0.8
PCI [kcal/kg]	10000 - 11000

Olio Combustibile

E' una miscela di idrocarburi pesanti in fase liquida.

Densità [kg/dm³]	0.8 – 0.9
PCI [kcal/kg]	8000 - 10000

Zone del forno



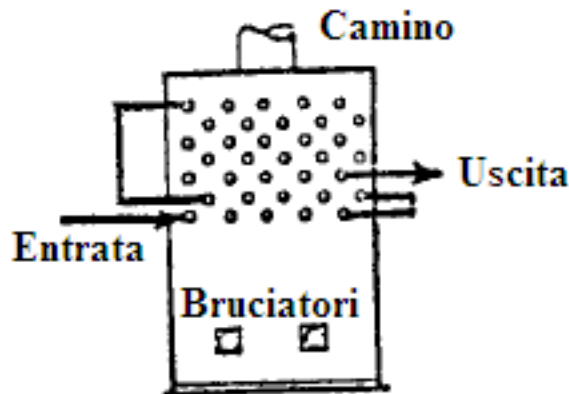
Si possono identificare differenti sezioni a seconda della modalità prevalente di scambio termico.

La sezione raggiante è quella in cui i tubi “vedono” la fiamma e il calore è trasferito per irraggiamento. Nella sezione convettiva invece, i fumi caldi di combustione scambiano calore con i tubi (spesso alettati o piolinati) posti in questa sezione aumentando il recupero termico dell'apparecchiatura.

Forni – disposizioni

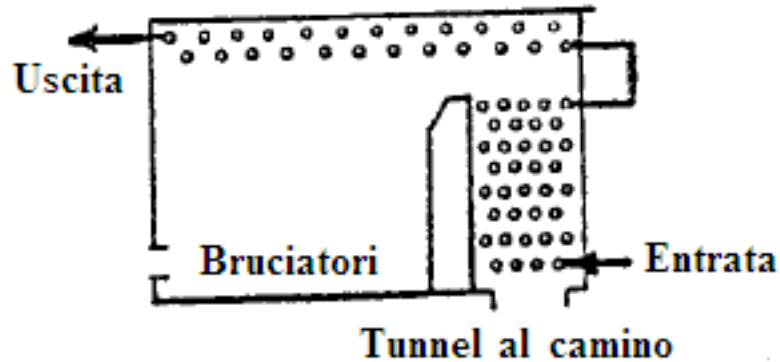
Il forno è costituito da una camera di combustione generalmente di forma parallelepipedica o cilindrica sulle cui pareti di refrattario vengono disposti i tubi (poggiati o immersi). In una o più pareti della stanza vengono disposti i bruciatori solitamente non molto grandi e numerosi in modo da avere una distribuzione uniforme del calore. I bruciatori vengono disposti in una o più delle parti basse delle pareti verticali.

Un problema molto importante è la temperatura superficiale dei tubi e la possibilità che il fluido al suo interno dia luogo a fenomeni di cracking che portano alla formazione di nero fumo o di catrame.

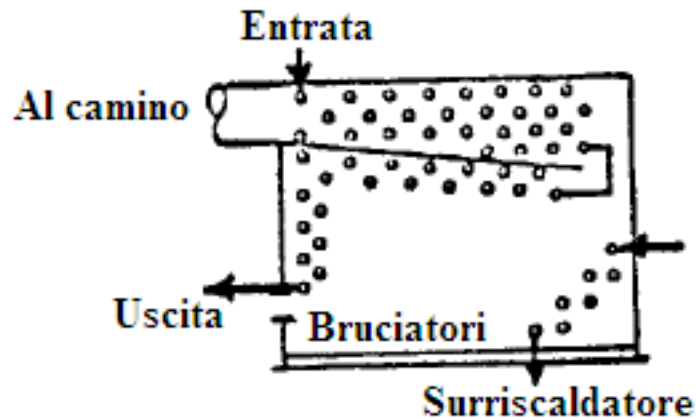


In questa disposizione la prima schiera di tubi “copre” tutte le altre per cui lo scambio termico avviene prevalentemente per convezione. E' utilizzato per basse potenzialità.

Forni – disposizioni

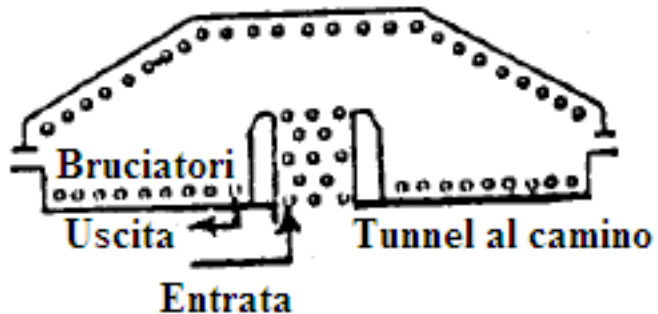


Questa è una tipologia molto comune anche se attualmente viene sostituita da disposizioni più efficienti.

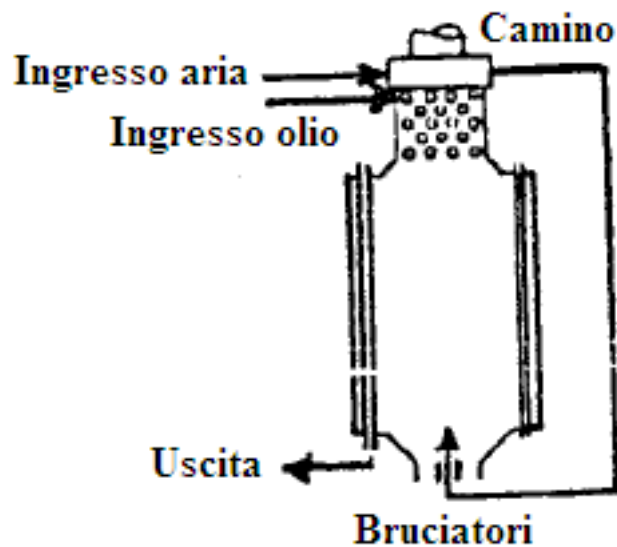


E' usata per piccole potenzialità e l'estensione presenta problemi costruttivi.

Forni – disposizioni

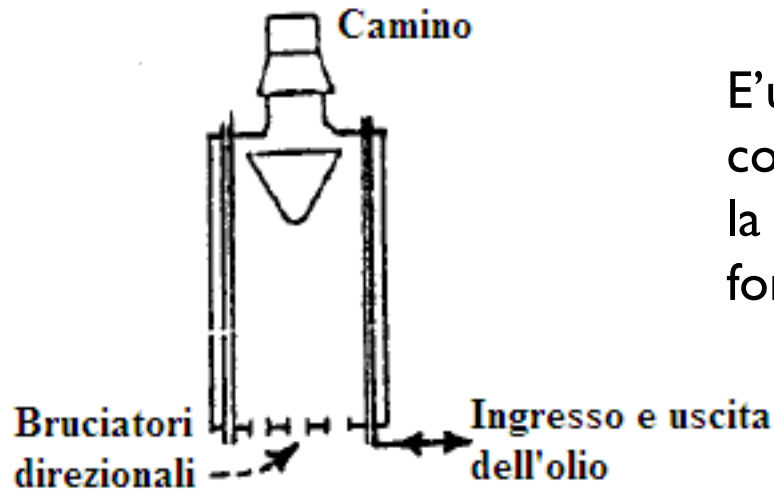


E' assai conveniente e permette di includere differenti circuiti.

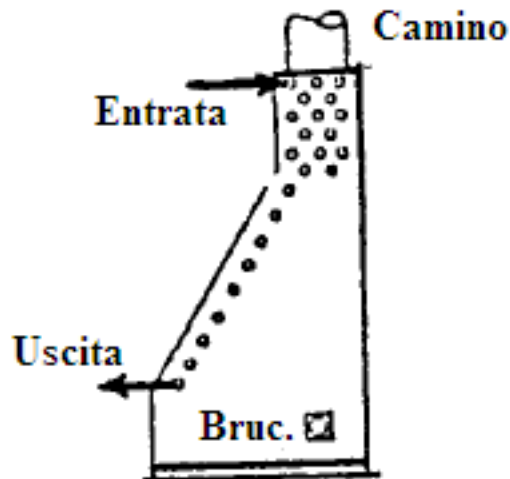


Ha una forte potenzialità, ma generalmente è molto costoso.

Forni – disposizioni

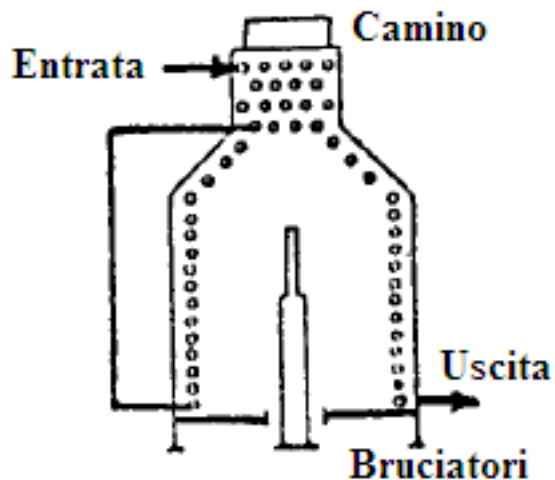


E' un caso simile al precedente, ma il cono interno ha lo scopo di aumentare la velocità del gas nella parte alta del forno.

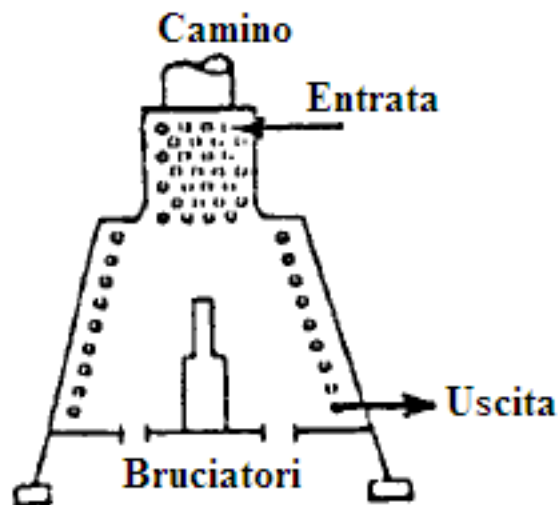


E' semplice ed efficiente, si presta ad essere affiancato ad apparecchi simili.

Forni – disposizioni

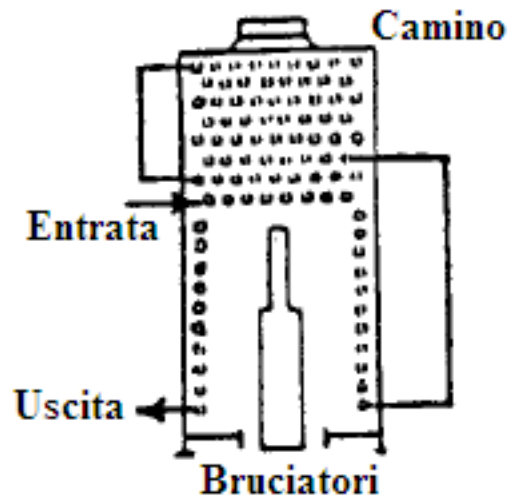


E' assai conveniente e permette di includere differenti circuiti.



E' chiamato anche ad A a causa della sua forma ed è molto efficiente.

Forni – disposizioni



I tubi impiegati hanno un diametro che va dai 75 mm fino a 100-125 mm.

La combustione industriale

Atomizzazione: si utilizza l'energia cinetica del vapore d'acqua o dell'aria per polverizzare il getto d'olio combustibile e per ottenere una perfetta combinazione con l'aria ottenendo così un elevato rendimento della combustione. Si può avere anche un'atomizzazione meccanica costringendo l'olio combustibile in un ugello polverizzante.

Eccesso d'aria: la reazione di combustione non viene condotta in condizioni stechiometriche, ma si utilizza un eccesso d'aria di circa il 20%.

Prodotti secondari e inquinanti:

- Derivanti dalla combustibile: Polveri, ossidi di zolfo
- Derivanti dalla combustione: ossidi di azoto, monossido di carbonio, incombusti.

Metodi di riduzione degli agenti inquinanti:

- Tecniche pre-combustione: bruciatori a bassa emissione, combustione a stadi, emulsione acqua-olio, catalizzatori di combustione.
- Tecniche post-combustione: filtrazione, riduzione catalitica.

La combustione industriale

La combustione ideale è realizzata quando tutto il combustibile è bruciato usando soltanto la quantità teorica di aria; la combustione ideale non può però essere realizzata nella pratica dei processi di combustione. L'ossigeno per la combustione è ottenuto dall'aria atmosferica che contiene ossigeno per il 21% in volume e per il 23% in peso. Sono richiesti circa $5,66 \text{ m}^3$ di aria per bruciare $0,757 \text{ m}^3$ di fuel oil con un'efficienza dell'80%; mentre sono necessari circa $0,425 \text{ m}^3$ di aria per bruciare un $0,0283 \text{ m}^3$ di gas naturale con un'efficienza del 75% al livello del mare. L'aria è composta da azoto per il 79% circa con tracce di altri elementi; l'azoto è inerte alla temperatura ordinaria della fiamma, e come risultato della combustione produce pochi residui; l'azoto non contribuisce alla combustione, aumenta il volume dei prodotti di combustione, sottrae calore alla reazione, e genera un grosso problema quale la formazione di NO_x . I requisiti dell'aria di combustione sono basati sulla composizione del combustibile utilizzato e sul tipo di bruciatore.

La combustione industriale

I combustibili comunemente utilizzati contengono, azoto, ceneri, ossigeno, zolfo, carbonio e idrogeno. L'aria in eccesso ha un effetto di raffreddamento sulla fiamma; inoltre alcune particelle del combustibile non si combinano con l'ossigeno, e quindi lasciano il camino incombusti. Il vapore acqueo è un sottoprodotto della combustione dell'idrogeno, esso assorbe il calore dalla fiamma e ritrasforma in vapore alla temperatura del gas di combustione, passando per il camino come vapore mescolato con i prodotti della combustione. Il gas naturale contiene più idrogeno e meno carbonio per unità di contenuto termico rispetto al fuel oil e, conseguentemente, la relativa combustione produce molto più vapore acqueo, che sottrae una quantità maggiore di calore dalla fiamma; di conseguenza l'efficienza del gas è sempre inferiore a quella del fuel oil.

Rendimento e controllo della combustione

I processi di combustione sono influenzati da tre fattori:

- tempo
- temperatura
- miscelazione tra combustibile e comburente

Le soluzioni ottimali vengono raggiunte attraverso un adeguato progetto del bruciatore e della camera di combustione al fine di massimizzare il rendimento di combustione:

$$\eta = \frac{Q_{effettivo}}{Q_{disponibile}}$$

Il calore disponibile in genere non viene sfruttato integralmente a causa di una combustione incompleta causata da un insufficiente eccesso d'aria o da un insufficiente tempo o temperatura di combustione.

$$Q_{disponibile} = \dot{m}_c \cdot PCI$$

Rendimento e controllo della combustione

Il calore perso per combustione incompleta può essere espresso come una frazione del calore disponibile:

$$Q_{ci} = \dot{m}_c \cdot PCI \cdot \alpha$$

Allo stesso modo del caso precedente, il calore perso attraverso le pareti del sistema di combustione dovuto alla differenza di temperatura fra parete e ambiente può essere espresso come una frazione del calore disponibile:

$$Q_p = \dot{m}_c \cdot PCI \cdot \beta$$

Infine il calore disperso con i fumi può essere espresso come:

$$Q_f = \dot{m}_c \cdot PCI \cdot \gamma$$

Rendimento e controllo della combustione

Il calore effettivo può essere considerato come la differenza fra il calore disponibile e le diverse fonti di inefficienza:

$$Q_{\text{effettivo}} = \dot{m}_c \cdot PCI \cdot (1 - \alpha - \beta - \gamma)$$

Quindi il rendimento sarà pari a:

$$\eta = \frac{\dot{m}_c \cdot PCI \cdot (1 - \alpha - \beta - \gamma)}{\dot{m}_c \cdot PCI} = (1 - \alpha - \beta - \gamma)$$

Considerando l'espressione trovata si possono fare differenti considerazioni per massimizzare il rendimento di combustione.

Analisi dei coefficienti

Il coefficiente α è relativo alla perdita di calore per incombusti solidi e/o gassosi ed è legato al raggiungimento della combustione completa. Dipende quindi dall'eccesso d'aria, dalla geometria del bruciatore e dal tipo di combustibile utilizzato. Sicuramente l'eccesso d'aria è il parametro che più di ogni altro influisce sulla combustione. In ogni caso un forte eccesso d'aria è da evitare.

Il coefficiente β dipende dalla perdita di calore per convezione e per irraggiamento all'esterno. Questo fenomeno può essere limitato utilizzando particolari isolanti o materiali a bassa emissività.

Il coefficiente γ è legato al contenuto termico dei fumi, la quantità di calore persa con i fumi è legata alla loro portata e alla differenza fra la temperatura dei fumi e quella ambiente, in questo caso un eccesso d'aria troppo alto provoca una perdita di calore maggiore attraverso i fumi:

$$Q_f = F \cdot C_p \cdot (T_u - T_a)$$

Forni parti costitutive - Bruciatori

Sono gli apparati che realizzano la combustione in cui avviene la miscelazione fra combustibile, aria e fluido atomizzante.

Vengono caratterizzati per:

potenzialità massima

caduta di pressione dei vari flussi

curve caratteristiche

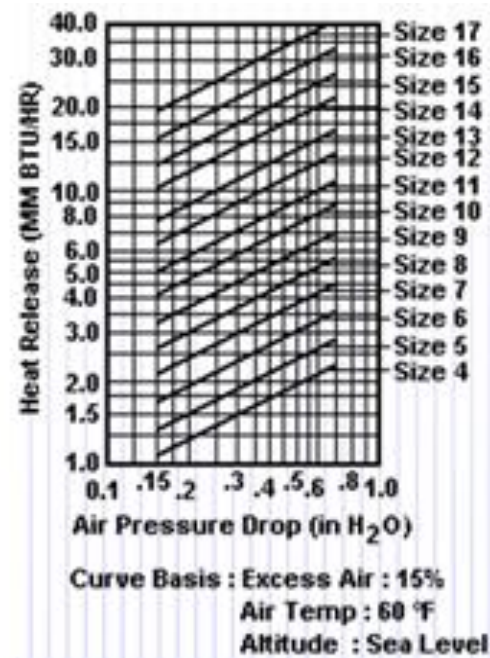


Potenzialità

E' la quantità di calore che il bruciatore è in grado di rilasciare e viene definita in funzione del tipo di combustibile utilizzato e della caduta di pressione.

Perdita di carico

La quantità di aria necessaria varia in funzione del calore fornito, con la quantità d'aria varia la caduta di pressione



Bruciatori – rumorosità

Un problema strettamente connesso con i bruciatori è quello del livello di rumorosità; infatti i bruciatori di un forno possono essere numerosi e funzionanti contemporaneamente costituendo una delle principali sorgenti di rumore nell'impianto. Si impongono allora determinati limiti da non superare, con regole abbastanza precise sulla composizione degli effetti sonori delle varie sorgenti contemporanee.

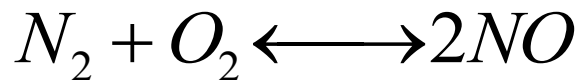
Qualora con particolari accorgimenti sul corpo del bruciatore non si raggiungano gli effetti prescritti, è necessario prevedere un apposito sistema di inscatolamento insonorizzante di ciascun bruciatore (plenum chamber). Livelli normali di rumorosità sono quelli relativi alle curve ISO 90 (95 dbA, ad un metro dalla sorgente); nella pratica le specifiche sono più restrittive (80-85 dbA, ad un metro di distanza dalla sorgente).



Trattamento dei fumi di combustione

Alla combustione di notevoli quantità di combustibile è accompagnata la generazione di un grande volume di fumi, quindi l'emissione in atmosfera di agenti inquinanti come:

- particelle sospese o particolato: sono particelle solide o liquide in sospensione di grandezza compresa tra a $0.001\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$. Il particolato è in forma di ceneri nel caso di combustione di solidi o in goccioline nel caso di combustione incompleta di liquidi o solidi,
- anidride solforosa: la quantità generata dipende dalla quantità di zolfo contenuta nel combustibile,
- idrocarburi incombusti e ossido di carbonio: dovuti a basse efficienze di combustione,
- ossidi di azoto: sono originati dalla reazione fra l'azoto e l'ossigeno presenti nell'aria che, portati ad alta temperatura nelle zone adiacenti la fiamma danno luogo alla reazione:



Gli ossidi di azoto insieme a quelli di zolfo sono responsabili delle piogge acide.

Trattamento dei fumi di combustione

Il **ciclone** è un sistema di abbattimento di forma vagamente cilindrica che permette di raccogliere le particelle aerodisperse sfruttando la loro forza di inerzia. In questo dispositivo il flusso contaminato viene fatto entrare dall'alto e tangenzialmente in modo da assumere un moto a spirale direzionato verso il basso. Per effetto della forza centrifuga, il particolato di dimensioni maggiori fuoriesce dal flusso e, per inerzia, va a contatto con le pareti interne del ciclone; per la gravità scivola poi sul fondo del dispositivo dove viene raccolto in un'apposita tramoggia che viene periodicamente svuotata.



La parte inferiore del ciclone è di forma conica ed in questa zona il flusso d'aria inverte il senso del suo moto a causa della differenza di pressione esistente fra l'apertura di entrata e quella di uscita, posta sulla sommità. Così il flusso d'aria risale in una stretta spirale verso l'alto e fuoriesce dal tubo di scarico che ha l'asse coincidente con quello del ciclone.

Trattamento dei fumi di combustione

La precipitazione elettrostatica viene sfruttata principalmente per abbattere le emissioni degli inquinanti sotto forma di particolato; in condizioni ottimali è in grado di abbattere il particolato in sospensione con un'efficienza superiore al 99%.

Il processo prevede l'utilizzo di un campo elettrico ad alta tensione che provvede a caricare positivamente o negativamente le particelle solide o liquide presenti nelle emissioni gassose. Il particolato carico elettricamente va quindi a depositarsi per attrazione elettrostatica sull'elettrodo di raccolta da dove può essere rimosso come materiale secco oppure dilavato con acqua. Qualche volta il particolato liquido viene rimosso semplicemente facendolo scolare. Questa rimozione si rende sempre indispensabile dato che lo strato di materiale che si deposita diminuisce l'intensità di campo elettrico e quindi l'efficacia di abbattimento.

Convenzionalmente i precipitatori elettrostatici si distinguono in elettrofiltri a secco se non prevedono l'utilizzo di acqua ed elettrofiltri a umido in caso contrario.

Trattamento dei fumi di combustione

La filtrazione tessile è un processo di abbattimento del particolato solido che si realizza facendo passare il flusso d'aria contaminato attraverso dei filtri costituiti da fibre tessili di varia natura. Una volta venivano utilizzati solo prodotti naturali, come la lana o il cotone, caratterizzati da un'efficacia ed una resistenza relativamente basse; in seguito, però, l'avvento di fibre sintetiche come il nylon ed il polipropilene ha permesso di ottenere dei nuovi materiali più resistenti al logoramento, al calore, all'erosione ed all'attacco delle sostanze corrosive. In alcuni casi vengono anche utilizzate le fibre di vetro.

La filtrazione tessile è anche denominata “filtrazione a tessuto”, questo termine non è comunque molto corretto in quanto nelle varie applicazioni industriali non ci si limita all'utilizzo dei tessuti ma si impiegano anche feltri o addirittura agglomerati di fibre. Di solito i feltri garantiscono una migliore filtrazione ma necessitano di sistemi di pulizia più complessi, mentre i tessuti vengono utilizzati con flussi d'aria a bassa velocità e necessitano di una pulizia più occasionale.

Gli elementi filtranti possono essere strutturati a pannello, a cartuccia o a tasca, ma molto più frequentemente presentano una forma cilindrica, per cui si parla spesso di sacche o di maniche.