

PROCESSO DI COMBUSTIONE

Il calore utilizzato come fonte energetica convertibile in lavoro nella maggior parte dei casi, è prodotto dalla combustione di sostanze (es. carbone, metano, gasolio) chiamate combustibili. All'interno del processo di combustione vi sono sostanze reagenti: combustibili e sostanze presenti nell'aria, ossigeno (O_2) e azoto (N_2), generalmente questo processo oltre al calore produce anche fumi.



Nell'esempio è stato preso come combustibile del metano (CH_4).

Si può vedere che l'azoto non reagisce e si trova invariato nei prodotti della combustione.

Per ogni molecola di combustibile che brucia si formano 2 molecole d'acqua (H_2O) e 1 di biossido di carbonio (CO_2).

Se la combustione avviene in un ambiente termicamente isolato raggiunge la massima temperatura possibile. Tale temperatura è detta adiabatica (cioè senza scambio di calore) non è generalizzabile in un unico valore perché varia secondo il materiale utilizzato.

Se alla combustione è data una quantità elevata d'aria si liberano delle molecole d'ossigeno (O) che con il carbonio (C) formano monossido di carbonio (CO) che è un gas nocivo perché deve ancora ultimare la combustione con aria per la mancanza di molecole di O .

La liberazione di questo gas può portare all'intossicazione perché reagisce con l' O_2 presente nell'aria e toglie ossigeno che serve per la respirazione. Per evitare questo è necessario dotare l'edificio di sistemi che permettono l'eliminazione del gas nocivo.

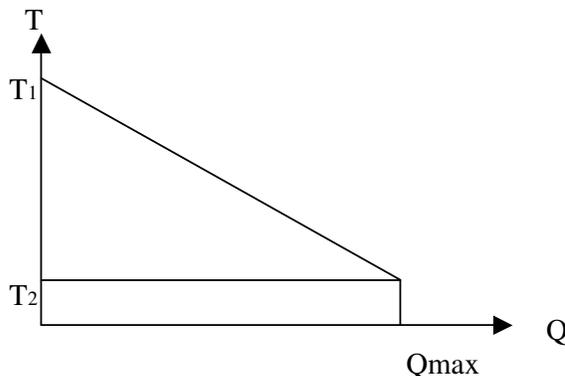
In caso di caldaie non sono necessarie condotte che portano aria all'esterno ma è regolata un'area minima di apertura verso l'esterno che varia secondo la caldaia ma che in ogni modo non dovrà essere inferiore a 100 cm^2 .

Nel caso di caminetti è obbligatoria una condotta forzata che porta i fumi prodotti dalla combustione all'esterno.

Per far avvenire la combustione in maniera adeguata è necessario fornire aria in eccesso.

Con aria in eccesso i fumi non arrivano alla temperatura di combustione adiabatica e quindi alla fine abbiamo una massa di fumi caldi che però non sono alla temperatura massima che possono raggiungere e di conseguenza sono meno nocivi.

Tracciamo ora il grafico che lega la temperatura e la quantità di calore contenuta nei fumi prodotti dalla combustione.



Il grafico mette la temperatura (T) in ascissa e il calore (Q) in ordinata.

Si può vedere che, man mano che diminuisce la temperatura e i fumi si raffreddano, la quantità di calore che possono scambiare con l'ambiente diminuisce.

$$Q = C_v * M_F * (T_1 - T_2)$$

Dove: C_v = calore specifico a volume costante

M_F = massa dei fumi

T_1 = temperatura iniziale

T_2 = temperatura finale

T_1 è temperatura di combustione adiabatica e T_2 è la temperatura di rugiada, temperatura in cui l'acqua normalmente presente sotto forma di vapore, attraverso il processo di condensazione, inizia a variare il suo stato, il Q che si trova è il potere calorifico del combustibile espresso in [J/Kg] ed esprime l'energia prodotta dal combustibile durante la combustione.

Nella tabella sono indicati i valori di potere calorifico d'alcuni combustibili.

SOSTANZA	Pc (Kcal/kg)
Antracite	8000
Benzina	7500
Carbone Coke	11200
Gasolio	10210
Idrogeno	34300
Metano	13271
Olio combustibile	9870
Proteine	4000
Solfo	2200

Alla temperatura di rugiada (T_2) il vapore acqueo contenuto nei fumi condensa e cede calore detto calore latente di vaporizzazione e la curva devia.

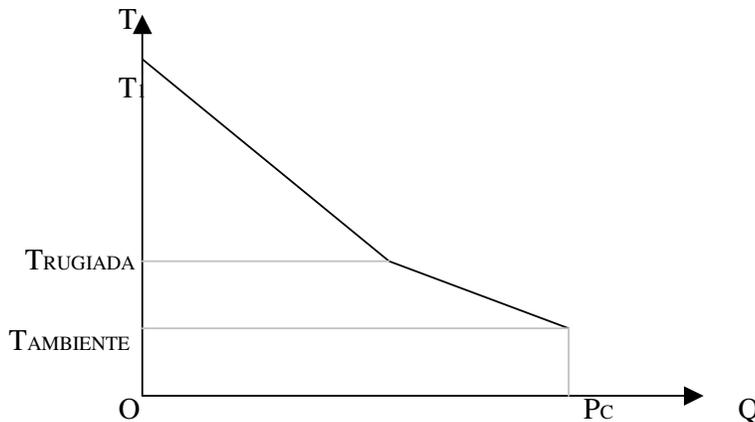


Figura Grafico della curva di raffreddamento dei fumi

Il tracciamento della curva di raffreddamento permette di calcolare il potere calorifico di un combustibile e quindi classificarlo dal punto di vista energetico.

Infatti, il potere calorifico è generalmente definito come la quantità di calore alla quale la curva di raffreddamento dei fumi interseca la temperatura di rugiada.

Poiché in ogni tipo di combustibile vi è una diversa quantità d'acqua, che condensando, può rilasciare in parte calore, sono state definite due ulteriori varianti del potere calorifico:

- **Potere calorifico inferiore:** si ottiene ipotizzando un raffreddamento di valori fino a temperatura ambiente senza che avvenga il processo di condensazione (vedi fig. 2)
- **Potere calorifico superiore:** viceversa, è definito come la quantità di calore che si potrebbe sottrarre ai fumi, raffreddandoli fino a temperatura ambiente e supponendo la completa condensazione del vapore acqueo in essi contenuto (vedi figura 3)

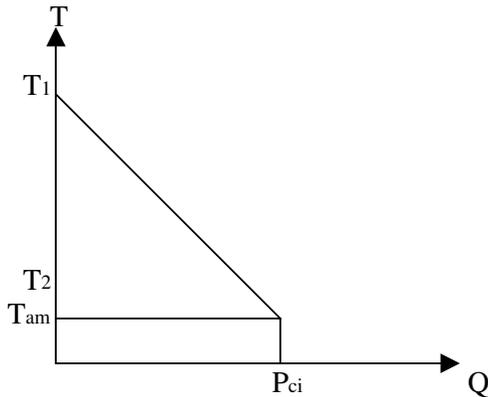


Figura 1 Grafico del potere calorifico inferiore

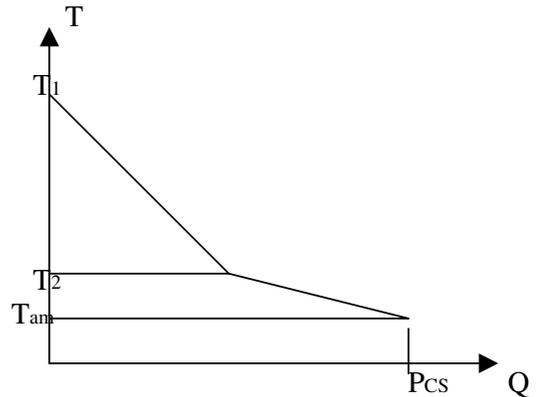


Figura 2 Grafico del potere calorifico superiore

Il reale potere calorifico sarà compreso tra questi due estremi.

Una volta il rendimento di una caldaia era espresso in $\eta = Q / P_{ci}$

Marescalchi inventò un particolare tipo di caldaia a condensazione in grado di produrre un calore medio di condensazione.

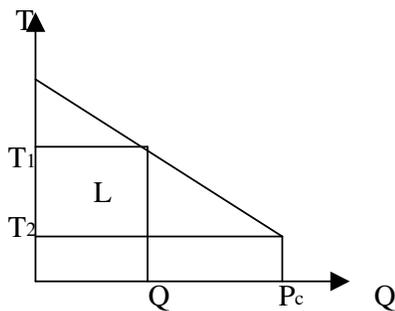
Il problema è che i fumi non circolano bene, quindi c'è la necessità di un tiraggio artificiale ad aria fredda che porta alla creazione d'acqua in stato liquido e di conseguenza servono recipienti per contenerla.

Oggi di queste caldaie sono dichiarati due rendimenti uno a potere calorifico superiore e uno a calore realmente prodotto.

Queste caldaie non mandano in condensazione i fumi, quindi la temperatura di scarico è a $T > 50^\circ\text{C}$, la legge prevedeva che la temperatura di scarico fosse a $T > 180^\circ\text{C}$, è stata successivamente riveduta perché i fumi che erano scaricati dalla caldaia marescalchi anche se a bassa temperatura sono meno nocivi.

Un'altra soluzione è l'utilizzo della macchina di Carnet.

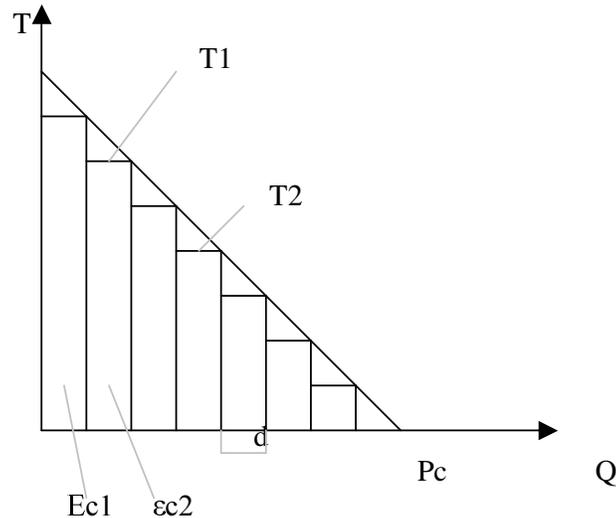
Questa macchina considera 2 temperature costanti in altre parole la temperatura iniziale e la temperatura ambiente.



Il problema è che bisogna portare $T_1 = T_2$, perché la quantità di calore sia soddisfatta ma, in questo caso, è nullo il coefficiente economico ($\epsilon_c = 1 - T_1 / T_2$).

Un'altra soluzione sarebbe di utilizzare $T_1 \text{ MAX}$, in questo caso è un massimo il coefficiente economico ma la quantità di calore non è soddisfatta.

La macchina di Carnot non è molto adatta alla combustione perché, per produrre la quantità di calore necessario, il coefficiente economico risulta basso. La soluzione è utilizzare tante macchine di Carnot in modo da spezzettare le quantità di calore e la temperatura.



$$L = \sum \epsilon_c dQ$$

$$L = \sum (1 - T_2/T_1) dQ \quad dQ = -M c_p dT$$

$$L = - \sum (1 - T_2/T_1) M c_p dT = - \int (1 - T_2/T_1) M c_p dT$$

$$L = M c_p [T_c - T_2] + T_2 \ln (T_2/T_c)$$

Se il combustibile è pessimo l'energia convertibile in lavoro è più bassa perché la temperatura da essi prodotta è più bassa.

ESERCIZIO

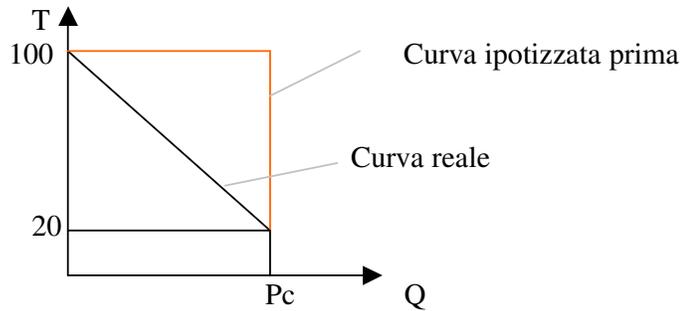
Supponendo di voler scaldare dell'acqua in un recipiente con un volume di 1000l ad una $T = 100^\circ\text{C}$ quanto lavoro impiego.

$$Q = M c_p (T_1 - T_2) = 1000 \text{ Kg} \cdot 4187 \text{ J / Kg } ^\circ\text{C} \cdot (100 - 20) = 334.960.000 \text{ J}$$

$$\epsilon_c = 1 - T_2/T_1 = 1 - 293/373 = 0,215$$

$$L = 0,215 \cdot 334.960.000 = 71.841.286 \text{ J}$$

Il calore calcolato è giusto ma il coefficiente economico e di conseguenza anche il lavoro sono sbagliati, perché non ho considerato che la temperatura si abbassi poco per volta, per l'esatto valore devo fare il calcolo in infinitesimi.



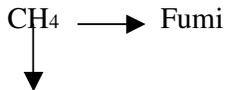
$$L = M c_p [(T_1 - T_2) - T_2 \ln (T_2 / T_1)] = 1000 \cdot 4187 [(100 - 20) - 293 \ln (373 / 293)]$$

$$L = 38.805.524 \text{ J}$$

$E_c = 0,116$ rendimento di Carnot medio

Acqua valore exergetico pessimo.

Utilizzo metano per scaldare l'acqua



En chimica $\eta_{en} = 30\%$
 $T_c = 1600^\circ\text{C}$ per ottenere H_2O calda a 80°C

Lavoro totale prodotto dalla combustione

$$L = 1000 [(1600 - 20) - 293 \ln (1873 / 293)] = 1.036.446 \text{ J}$$

Lavoro a T costante = 1.580.000 J $\eta_{ex} = 0,656$ rendimento del 66%

Lavoro ceduto all'ambiente

$$L = [(80 - 20) - 293 \ln (353 / 293)] = 5415 \text{ J}$$

Lavoro a T costante = 60000 J $\eta_{ex} = 0,090$

Lavoro per produrre acqua a $T = 80^\circ\text{C}$

$$L = 1000 [(1600 - 80) - 353 \ln (1873 / 353)] = 930.903 \text{ J}$$

Lavoro a T costante = 1.526.000 J $\eta_{ex} = 61,2 \%$

Ho prodotto acqua calda a 80°C e ho avuto una lieve perdita energetica con un buon rendimento. Conviene un utilizzo della macchina di Carnot per la produzione d'acqua piuttosto che una caldaia normale perché, a parità di prodotto (acqua calda), con la macchina di Carnot, avremo anche un beneficio economico e uno ambientale in altre parole meno gas prodotti e più energia creata.