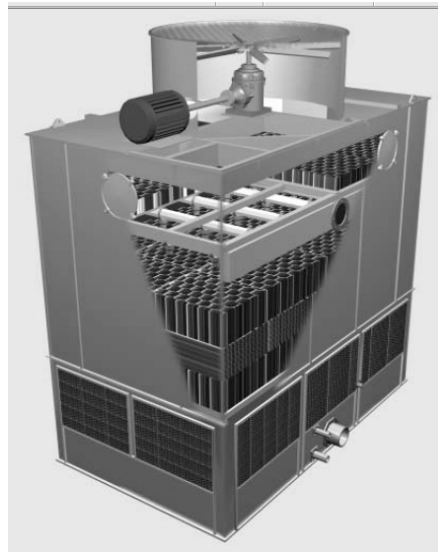
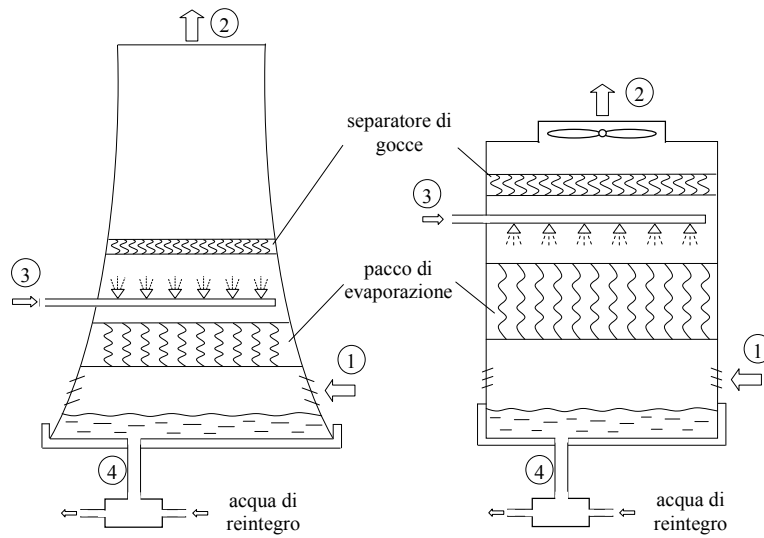


## TORRI DI RAFFREDDAMENTO



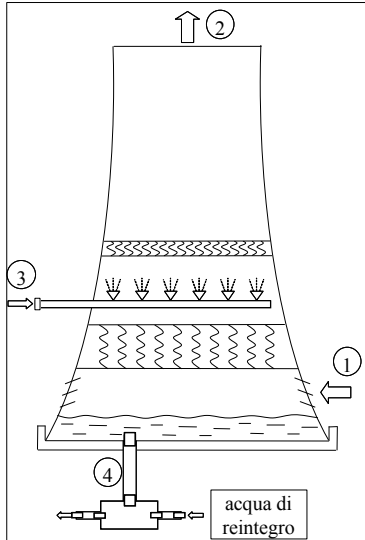
Torre di raffreddamento a circolazione naturale (a sinistra)  
ed a circolazione forzata (a destra)

## TORRI DI RAFFREDDAMENTO



Torre di raffreddamento a circolazione naturale (a sinistra)  
ed a circolazione forzata (a destra)

## TORRI DI RAFFREDDAMENTO



Bilancio di massa dell'aria secca

$$G_1 - G_2 = 0 \Rightarrow G_1 = G_2 = G$$

Bilancio di massa dell'acqua

$$G_1 \omega_1 - G_2 \omega_2 + G_3 - G_4 = 0 \Rightarrow G_4 = G_3 - G(\omega_2 - \omega_1)$$

Bilancio di energia dell'aria umida + goccioline di liquido

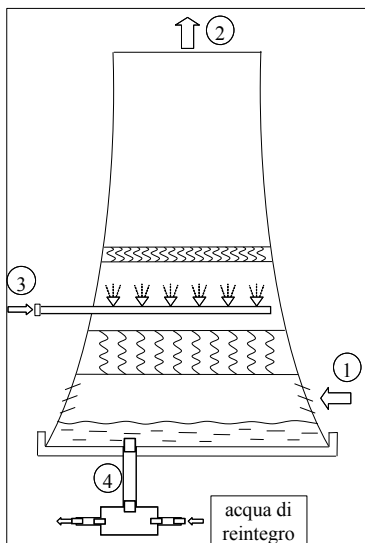
$$G_1 h_1 - G_2 h_2 + G_3 h_3 - G_4 h_4 = 0 \Rightarrow$$

$$G = \frac{G_3 (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2) + (\omega_2 - \omega_1) h_4}$$

Il consumo di acqua dovuto all'evaporazione in seno all'aria è dato da:

$$G_3 - G_4 = G(\omega_2 - \omega_1)$$

## TORRI DI RAFFREDDAMENTO



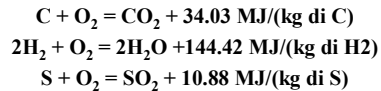
La temperatura minima alla quale si può avere l'acqua in uscita dalla torre evaporativa è la temperatura di bulbo umido dell'aria umida in ingresso (la torre in questo caso si comporterebbe come un saturatore adiabatico). In una torre a secco la temperatura minima di uscita dell'acqua è invece uguale a quella di bulbo asciutto dell'aria in ingresso e quindi (tranne nel caso d'aria satura) superiore alla precedente.

E' possibile definire l'efficienza ( $\epsilon$ ) di una torre di raffreddamento ad umido come il rapporto tra la potenza termica effettivamente sottratta all'acqua e quella massima sottraibile teoricamente:

$$\epsilon \equiv \frac{W_t}{W_{t,\max}} \equiv \frac{t_3 - t_4}{t_3 - t_{bu,1}}$$

## LA REAZIONE DI COMBUSTIONE

- La *combustione* è una reazione chimica di ossidazione, fra un combustibile ed un comburente (in genere ossigeno), con sviluppo di energia termica (reazione esotermica).
- Gli elementi chimici contenuti nei combustibili fossili che reagendo con l'ossigeno danno luogo a reazioni esotermiche sono, principalmente: il carbonio, l'idrogeno e lo zolfo:



- Durante il processo di combustione la massa di ciascun elemento rimane invariata per cui può essere eseguito un *bilancio di massa* che nel caso della reazione di ossidazione del carbonio fornisce:

<i>Reagenti</i>		=	<i>Prodotti</i>	
C	+	O <sub>2</sub>	=	CO <sub>2</sub>
1 kmole	+	1 kmole	=	1 kmole
12 kg	+	32 kg	=	44 kg

quindi 1 kg di combustibile (carbonio puro) richiede  $32/12=2.67$  kg di ossigeno e  $2.67/0.232=11.56$  kg di aria (nell'aria abbiamo il 23.2 % in massa di ossigeno).

## LA REAZIONE DI COMBUSTIONE

- L'*aria teorica*,  $a_t$ , è la massa di aria che da un punto di vista stechiometrico è sufficiente a far avvenire la reazione completa di combustione di 1 kg di combustibile; l'aria teorica dipende soltanto dalla composizione del combustibile e si può esprimere in funzione degli elementi che lo compongono, nel modo seguente:

$$a_t \equiv \frac{m_{air}}{m_c} = 11.56x_c + 34.48x_H + 4.31x_s - 4.31x_o$$

- A causa del non perfetto mescolamento dei reagenti, l'aria teorica non è sufficiente a portare a termine completamente la reazione di combustione: è pertanto necessario aggiungere un eccesso d'aria. Si ottiene così il valore della cosiddetta *aria pratica*:

$$a_p \equiv \frac{m_{a,p}}{m_c} = n a_t$$

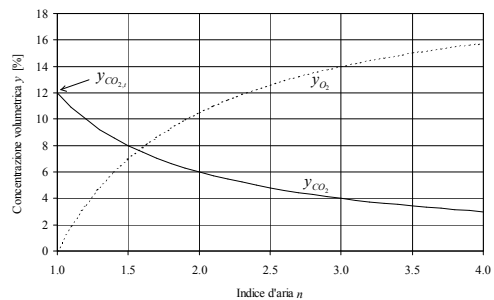
- In genere  $n$ , detto *indice d'aria*, varia tra 1 e 1.5 a seconda della conformazione del bruciatore (tanto più esso è sofisticato tanto più  $n$  è prossimo a 1), ma può arrivare fino a 3.5 qualora si voglia limitare la temperatura di combustione, ad es. per non danneggiare gli organi delle macchine o per ridurre la formazione di ossidi di azoto. Di solito il valore di  $n$  viene regolato dall'analisi (in continuo per i grandi impianti, o periodica) dei prodotti di combustione.

## LA REAZIONE DI COMBUSTIONE

- In figura viene riportato l'andamento qualitativo della frazione in volume di  $\text{CO}_2$  ( $y_{\text{CO}_2}$ ) e di  $\text{O}_2$  ( $y_{\text{O}_2}$ ) presenti nei fumi secchi in funzione dell'indice d'aria  $n$ . La misura di queste grandezze, effettuata dagli analizzatori dei prodotti di combustione, è importante perché correla l'eccesso d'aria ( $n-1$ ) al rendimento della combustione. E' evidente che all'aumentare dell'eccesso d'aria, restando costante il volume di  $\text{CO}_2$ , la percentuale di  $\text{CO}_2$  nei fumi diminuisce, mentre quella di ossigeno aumenta. Il valore dell'indice d'aria si può ottenere dalla misura della concentrazione residua di ossigeno nei fumi,  $y_{\text{O}_2}$ , tramite la formula seguente:

$$n \approx \frac{0.21}{0.21 - y_{\text{O}_2}}$$

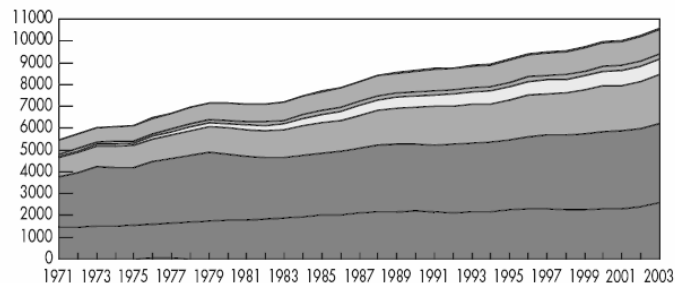
$$n \approx \frac{y_{\text{CO}_2,t}}{y_{\text{CO}_2}}$$



## COMBUSTIBILI

- I combustibili possono essere definiti come *sostanze capaci di produrre energia termica a seguito di una reazione chimica di combustione*. I combustibili attualmente più noti sono i *combustibili fossili* o naturali che vengono utilizzati dopo opportuni trattamenti.

Evolution from 1971 to 2003 of World Total Primary Energy Supply\*  
by Fuel (Mtoe)



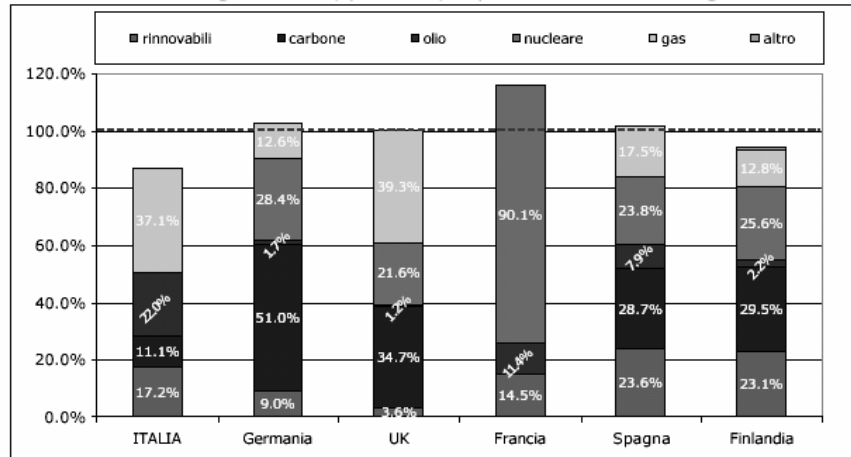
1 Mtoe = 1 Mtep =  $m_p H$   
 $= 10^9 \text{ kg} \cdot 10^4 \text{ kcal/kg} =$   
 $10^{13} \cdot 4.186 \text{ kJ} = 4.186 \cdot 10^{16} \text{ J}$

Coal	Oil	Gas	Nuclear
Hydro	Combustible Renewables & Waste	Other**	

**Consumo mondiale di energia primaria**  
(IAEA Energy Statistics).

## COMBUSTIBILI

Produzione di energia elettrica, per fonte, in percentuale sul fabbisogno nazionale



fonte: EURPROG 2005 (EURELECTRIC) - dati 2003

Produzione di energia elettrica in UE.

## COMBUSTIBILI

- L'entalpia standard di formazione (kJ/kmole) è pari al calore rilasciato dalla reazione di formazione di 1 kmole di quella sostanza, partendo dai suoi elementi fondamentali stabili, nelle condizioni standard ( $p_0=101325$  Pa,  $T_0=298.15$  K).
- Nell'ambito della combustione l'entalpia di una sostanza viene, generalmente, considerata come somma di due contributi: l'entalpia sensibile o di variazione (associata al cambiamento di stato della sostanza in cui la composizione rimane costante) e l'entalpia di formazione (associata con la formazione di quella sostanza):

$$h(T,p) = \Delta h + \bar{h}^\circ$$

Per come è stata definita (somma del contributo sensibile e di formazione), l'entalpia di una sostanza si conserva in una combustione adiabatica.

- L'entalpia di combustione è la differenza tra l'entalpia dei prodotti e quella dei reagenti quando avviene la combustione completa ed i prodotti sono alla stessa temperatura e pressione dei reagenti. Per i combustibili fossili l'entalpia di combustione è negativa perché nella reazione viene liberata energia.
- Potere calorifico (kJ/kg) di un combustibile rappresenta la differenza tra l'entalpia standard di formazione dei reagenti (combustibile e comburente) e quella dei prodotti (prodotti della combustione), riferita all'unità di massa del combustibile.

$$H = (\bar{h}^\circ)^R - (\bar{h}^\circ)^P$$

## COMBUSTIBILI

- Il *potere calorifico superiore*,  $H_s$ , è la quantità totale di calore sviluppata dalla reazione di combustione completa dell'unità di massa del combustibile:

$$H_s \cong 34.03x_C + 144.42x_H + 10.88x_S \quad [\text{MJ}/(\text{kg di combustibile})]$$

Nella combustione di combustibili contenenti idrogeno, nei fumi è presente acqua allo stato di vapore; il passaggio dell'acqua dallo stato liquido allo stato di vapore comporta la perdita del calore latente di vaporizzazione (circa 2500 kJ/kg) dal calore di combustione. Il calore effettivamente disponibile per lo scambio termico è quindi solo quello sensibile e viene chiamato *potere calorifico inferiore*,  $H_i$  (circa il 10 % minore di  $H_s$ ).

- Pericolosità della condensa (per la presenza di acido solforico).
- Tra il potere calorifico superiore e quello inferiore vi è la relazione:

$$H_i \cong H_s - 2.5 x_{H_2O} \quad [\text{MJ}/(\text{kg di combustibile})]$$

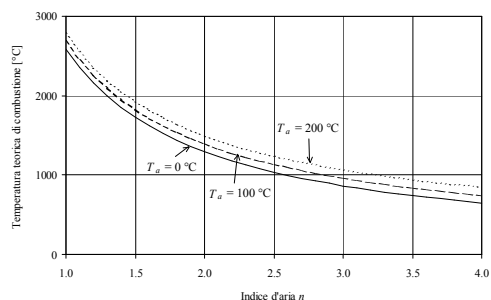
dove  $x_{H_2O}$  è la massa di acqua formatasi in seguito alla combustione di 1 kg di combustibile.

## COMBUSTIBILI

- La *temperatura di accensione* è la temperatura alla quale, alla pressione atmosferica, il processo di combustione nella miscela stechiometrica costituita da vapori del combustibile liquido (o dal gas) più l'aria avviene e perdura in modo stabile.
- La *temperatura teorica di combustione* è la temperatura raggiunta dai prodotti della combustione quando questa è completa ed avviene adiabaticamente. La temperatura di combustione dipende dal potere calorifico e dall'aria pratica e si determina con buona approssimazione come:

$$T_f \cong T_a + \frac{H_i}{c_{p,f} n a_i}$$

dove  $c_{p,f}$  è il calore specifico dei fumi (circa 1.1 kJ/(kgK)) e  $T_a$  la temperatura dell'aria in ingresso.  $T_f$  oscilla in pratica tra 1200 e 2000 °C, a seconda del combustibile e dell'indice d'aria. Localmente la temperatura di fiamma può anche eccedere il valore su indicato, favorendo così la produzione di ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ).



## COMBUSTIBILI

Combustibile	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	H <sub>i</sub> [MJ/kg]	a <sub>t</sub> [kg <sub>a</sub> /kg <sub>c</sub> ]	H/a <sub>t</sub> [MJ/kg]	Temp. di accensione [°C]	CO <sub>2</sub> gen. [kg/MJ]
solidi	Legna secca	500-800	18-20	5.8-6.7	3.1	0.096
	Lignite		20.5			
	Litantracce		26			
	Antracite		30.5			
	Coke	1000	30.2	10.1	2.99	0.103
RSU(*)	100	8	2.7	2.96		0.103
liquidi	Benzina	730-760	44	14.7	2.99	400
	Gasolio	815-855	43.3	14.7	2.95	250
	Olio denso	950	41.1	13.8	2.98	0.077
	GPL	2.25	46	15.5	2.97	400
gassosi	Gas di città	0.56÷0.61	30	10	3.00	
	Gas naturale	0.83	47.7	17.3	2.76	560
	Butano	2.7	45.7	15.4	2.97	365
	Acetilene	1.17	48.1	13.3	3.61	305

(\*) Rifiuti Solidi Urbani

### Principali caratteristiche dei combustibili commerciali

## COMBUSTIBILI

### ESEMPIO – Combustione dell'etano

In un impianto petrolchimico si ha a disposizione dell'etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) che viene utilizzato per alimentare un motore alternativo ad accensione comandata. Determinare:

- la percentuale di massa di carbonio (C) e di idrogeno (H) presenti nel combustibile;
- l'aria teorica necessaria;
- il valore approssimato del potere calorifico inferiore.

Sapendo che il motore funziona a regime con un rapporto aria/combustibile effettivo pari a 17.73 kga/kgc, calcolare l'indice d'aria n e la massa effettiva dei fumi.

Ricaviamo la massa di 1 kmole di etano:

$$2 \text{ atomi di C} \cdot 12.011 \text{ kg/kmole} + 6 \text{ atomi di H} \cdot 1.008 \text{ kg/kmole} = 24.022 \text{ kg di C} + 6.048 \text{ kg di H} = 30.07 \text{ kg di C}_2\text{H}_6$$

Le proporzioni in massa degli elementi valgono quindi:

$$x_C = \frac{24.022 \text{ kg di C}}{30.07 \text{ kg di C}_2\text{H}_6} = 79.89 \% \text{ di C} \quad x_H = \frac{6.048 \text{ kg di H}}{30.07 \text{ kg di C}_2\text{H}_6} = 20.11 \% \text{ di H}$$

L'aria teorica può essere ricavata dalla formula vista precedentemente:

$$a_t = \frac{m_{ar}}{m_c} = 11.5 x_C + 34.5 x_H + 4.31 x_S - 4.31 x_O = 16.12 \text{ kg}_a/\text{kg}_c$$

Il potere calorifico inferiore può essere determinato in modo approssimato mediante la seguente formula:

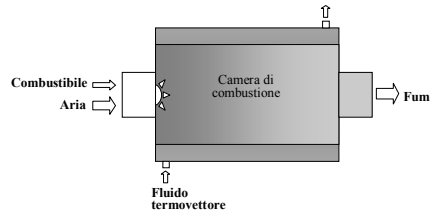
$$\frac{H}{a_t} \approx 3 \text{ MJ/kg} \Rightarrow H \approx 3 \cdot 16.12 = 48.36 \text{ MJ/kg}$$

L'indice d'aria n vale:  $n = \frac{m_{ar}}{m_{ar}} = \frac{17.73}{16.12} = 1.10$

La massa effettiva dei fumi è data da:  $\frac{m_f}{m_c} = 1 + n a_t = 18.73 \text{ kg}_f/\text{kg}_c$

## GENERATORE DI CALORE

- Si definisce *generatore di calore o caldaia* il dispositivo dove avviene il trasferimento di calore, sviluppato dal combustibile bruciato all'interno della camera di combustione, ad un fluido termovettore (di solito acqua allo stato liquido o in cambiamento di fase). Nel caso che la caldaia venga usata per la generazione di vapore saturo o surriscaldato si parla di *generatore di vapore*.

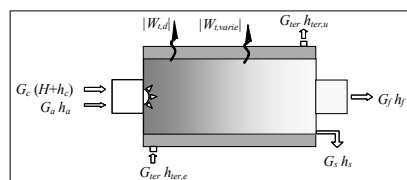


- Il generatore di calore è il componente principale di un impianto a combustione ed è scomponibile in due sottosistemi:
  1. il *bruciatore*, nel quale affluiscono combustibile e comburente e da cui emerge una fiamma stabile;
  2. lo *scambiatore di calore*, nel quale i prodotti della combustione cedono calore ad un fluido termovettore.
- Un secondo componente molto importante di un impianto a combustione è il *camino* che svolge le seguenti funzioni: far effluire i fumi ad un'altezza da cui possono diffondere nell'atmosfera ricadendo al suolo con concentrazioni di inquinanti accettabilmente basse; assicurare il tiraggio necessario allo scarico dei fumi (indispensabile solo nei camini a tiraggio naturale).

## GENERATORE DI CALORE

- Il calore di combustione potenzialmente disponibile per il fluido termovettore non viene utilizzato totalmente, ma una parte dell'energia generata dalla combustione viene persa in:

- perdite per calore sensibile nei fumi (la quota maggiore delle perdite);
- perdite per incombusti (combustione incompleta);
- perdite per scambio termico convettivo e per irraggiamento attraverso l'involucro esterno del generatore e l'ambiente;
- perdite dovute all'energia associata alle scorie (termine importante solo se il combustibile è costituito da rifiuti solidi urbani o legno).



- **Bilancio di massa:**

$$G_c + G_a = G_f + G_s \Rightarrow 1 + n_a = \frac{G_f}{G_c} + \frac{G_s}{G_c}$$

dove  $G_c$  è la portata di combustibile,  $G_a$  la portata di aria,  $G_f$  la portata dei fumi e  $G_s$  la portata delle scorie solide di combustione o ceneri.



## GENERATORE DI CALORE

- **Bilancio di energia:**

$$G_c (H + h_c) + G_a h_a = G_f h_f + G_s h_s + |W_{t,ter}| + |W_{t,d}| + |W_{t,varie}|$$

$$\Rightarrow |W_{t,ter}| = G_c H - |W_{t,c}| - |W_{t,d}| - |W_{t,varie}| - G_s h_s$$

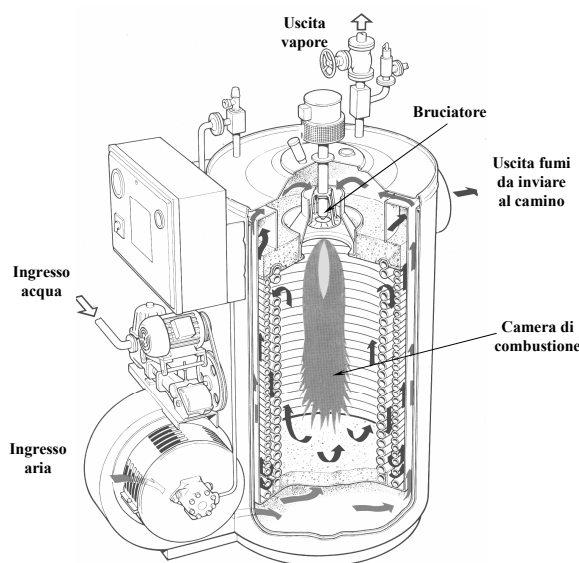
dove  $H$  è il potere calorifico del combustibile (che per chiarezza indichiamo separatamente dalla cosiddetta entalpia sensibile  $h_c$  legata invece alla pressione ed alla temperatura) e:

- $|W_{t,ter}| = G_{ter} (h_{ter,a} - h_{ter,e})$  = potenza del generatore, potenza termica ricevuta dal fluido termovettore (potenza termica utile);
- $G_c H$  = potenza al focolaio;
- $|W_{t,c}| = G_f h_f - G_c h_c - G_a h_a \approx G_f c_{p,f} (t_f - t_c)$  = potenza persa al camino in quanto nel generatore entrano aria e combustibile a temperatura ambiente ed escono fumi caldi (è il termine più importante);
- $|W_{t,d}| = \alpha A (t_f - t_c)$  = potenza persa per dispersione termica dalle pareti del generatore;
- $|W_{t,varie}|$  = termine che tiene conto delle perdite per combustione incompleta, dell'energia necessaria per alimentare gli ausiliari, energia persa per spurghi, ecc. (è normalmente trascurabile rispetto agli altri termini);
- $G_s h_s$  = energia associata alle scorie.

- Si definisce **rendimento** di un generatore di calore il rapporto tra la potenza termica effettivamente ricevuta dal fluido termovettore e la potenza al focolaio:

$$\eta = \frac{|W_{t,ter}|}{G_c H} = \frac{G_{ter} (h_{ter,a} - h_{ter,e})}{G_c H}$$

## GENERATORE DI CALORE



Si tratta di una caldaia monotubolare a circolazione forzata per produzione istantanea di vapore.

**Preriscaldatore d'aria:** l'aria prima di entrare in camera di combustione attraversa l'involucro esterno che racchiude i fasci di tubi.

**Bruciatore:** ad aria soffiata: provvede a miscelare e a dirigere il flusso di combustibile ed aria in modo da consentire la combustione e da mantenere una fiamma stabile.

**Camera di combustione (o focolare):** lo spazio messo a disposizione per la combustione del combustibile.

**Economizzatore:** l'acqua di alimentazione attraversando la schiera di tubi più esterna viene preriscaldata prima di passare attraverso i tubi a diretto contatto con la fiamma dove subisce cambiamento di fase.

**Evaporatore:** schiera di tubi più interna dove viene generato il vapore.