

## CALDAIA A CONDENSAZIONE

Il rendimento termico di una caldaia, con riferimento al potere calorifico inferiore LHV, può essere espresso come:

$$\eta_{LHV} = 1 - q_i - q_{fumi} - q_d$$

dove  $q_i$ ,  $q_{fumi}$  e  $q_d$  rappresentano le potenze perse per unità di potenza messa a disposizione dal combustibile, ovvero:

$$q_i = \frac{Q_i}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV}; \quad q_{fumi} = \frac{Q_{fumi}}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV}; \quad q_d = \frac{Q_d}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV}$$

dove:

- ✓  $Q_i$  è la potenza persa per incombusti;
- ✓  $Q_{fumi}$  è la potenza persa per calore sensibile nei fumi;
- ✓  $Q_d$  è la potenza persa per dispersioni di calore attraverso il mantello della caldaia.

La potenza persa per calore sensibile nei fumi tiene conto del fatto che i prodotti di combustione emessi dalla caldaia vengono rilasciati al camino ad una temperatura superiore a quella dell'aria comburente e può essere espressa, in prima approssimazione, come:

$$q_{fumi} = \frac{\dot{m}_A + \dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{fuel}} \cdot \frac{c_p}{LHV} \cdot (T_{fumi} - T_a) = \frac{c_p}{LHV} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{fuel}} \right)_{st} (1 + e) \right] \cdot (T_{fumi} - T_a)$$

dove:

- ✓  $\dot{m}_{fumi}$  è la portata di fumi al camino,
- ✓  $T_{fumi}$  è la temperatura dei fumi all'uscita della caldaia,
- ✓  $T_a$  la temperatura dell'aria all'ingresso della caldaia,
- ✓  $c_p$  è il calore specifico medio tra  $T_a$  e  $T_{fumi}$  (pari a circa 1,05 kJ/kg°C).

Facendo esplicito riferimento alla combustione di metano con aria secca e con un eccesso d'aria del 14,9 % (valore che corrisponde ad un contenuto di ossigeno nei fumi del 3%<sup>1</sup>, valore tipico per la combustione di un combustibile gassoso), si ottiene:

$$q_{fumi} = \frac{1,05}{50000} [1 + 17,2(1 + 0,149)] \cdot (T_{fumi} - T_a) = \frac{1,05}{50000} [20,8] \cdot (T_{fumi} - T_a) = 0,0044(T_{fumi} - T_a)$$

Assumendo una temperatura dell'aria pari a 15 °C e una temperatura dei fumi di 100 °C si ottiene:

$$q_{fumi} = 0,0044(85) = 0,037 = 3,7\%$$

Trascurando  $q_i$  e  $q_d$ , il rendimento termico della caldaia diventerebbe, in tal caso:

$$\eta_{LHV} = 1 - 0,037 = 0,963 = 96,3\%$$

A seguito della combustione nei fumi è presente un certo quantitativo di acqua sotto forma di vapore. Facendo ancora riferimento alla combustione del metano, la frazione in volume di acqua nei fumi (ovviamente umidi) è pari a:

$$[HO_2] = \frac{2}{1 + 2 + 7,52 \cdot (1 + e) + 2 \cdot e}$$

Assumendo ancora una volta  $e=0,149$ , si ottiene:

$$[HO_2] = 0,167$$

La frazione in massa di acqua  $x_{H_2O}$  la si può calcolare con la relazione:

$$x_{H_2O} = [H_2O] \frac{mm_{H_2O}}{mm_{fumi}}$$

dove la massa molecolare dei fumi  $mm_{fumi}$  risulta pari a:

$$mm_{fumi} = [H_2O]mm_{H_2O} + [N_2]mm_{N_2} + [O_2]mm_{O_2} + [CO_2]mm_{CO_2} = 27,8 \frac{kg}{kmole}$$

ottenendo quindi:  $x_{H_2O} = [0,167] \frac{18}{27,8} = 0,108$

---

<sup>1</sup> la frazione in volume di ossigeno è legata all'eccesso d'aria dalla relazione:

$$[O_2] = \frac{2e}{1 + 7,52 \cdot (1 + e) + 2 \cdot e}, \text{ ovvero } e = \frac{8,52[O_2]}{2 - 9,52 \cdot [O_2]}$$

Si noti come tale quantitativo di acqua è di un ordine di grandezza superiore rispetto all'eventuale acqua presente nell'aria umidità, basti pensare che un'umidità relativa del 60% a 15°C equivale ad una frazione in massa di acqua nell'aria inferiore all'1%.

Nella caldaia a condensazione si intende recuperare parte del calore latente di vaporizzazione dell'acqua presente nei fumi operando un raffreddamento dei fumi fino ad una temperatura tale da consentire la condensazione dell'acqua e poi riscaldarli nuovamente per poterli adeguatamente disperdere in atmosfera; in figura 1 è riportato lo schema della linea di condensazione dell'acqua dei fumi presenti nei prodotti di combustione.

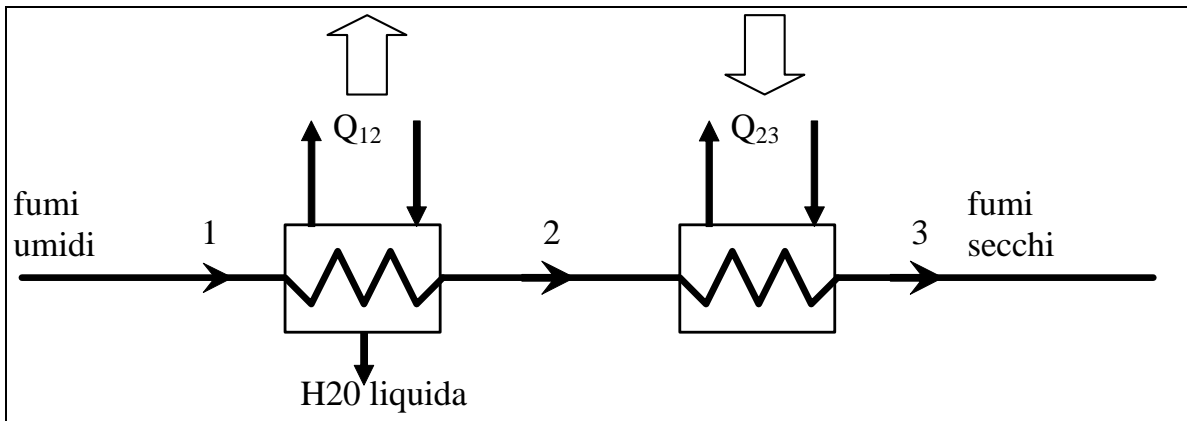


Figura 1

Con riferimento alla Figura 1, si può scrivere:

$$Q_{12} = m_{fumi} c_p (T_1 - T_2) + m_{H2O} \Delta h_{lat}$$

$$Q_{23} = (m_{fumi} - m_{H2O}) c_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_c = Q_{12} - Q_{23} = m_{fumi} c_p (T_1 - T_2) + m_{H2O} \Delta h_{lat} - (m_{fumi} - m_{H2O}) c_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_c = m_{fumi} c_p (T_1 - T_3) + m_{H2O} \Delta h_{lat} - m_{H2O} c_p (T_3 - T_2)$$

$$q_c = \frac{Q_c}{m_{fuel} LHV} = \frac{m_{fumi}}{m_{fuel}} \frac{c_p (T_1 - T_3) + x'_{H2O} \Delta h_{lat} - x'_{H2O} c_p (T_3 - T_2)}{LHV}$$

$$q_c = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{fuel}} \right)_{st} \right] (1 + e) \frac{c_p (T_1 - T_3) + x'_{H2O} [\Delta h_{lat} - c_p (T_3 - T_2)]}{LHV}$$

Il rendimento termico della caldaia a condensazione risulta quindi ora esprimibile come:

$$\eta_{LHV} = 1 - q_i - q_{fumi} - q_d + q_c$$

Supponendo  $T_3=T_1$  e trascurando  $c_p(T_3-T_2)$  rispetto a  $\Delta h_{lat}$ , si ottiene:

$$q_c = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{fuel}} \right)_{st} (1 + e) \right] \frac{x'_{H2O} \Delta h_{lat}}{LHV}$$

che numericamente, supponendo di condensare tutta la massa di acqua presente nei fumi, diventa:

$$q_{c,max} = [20,8] \frac{0,108 \cdot 2500}{50000} = 0.112$$

portando quindi ad un valore massimo del rendimento termico della caldaia pari a:

$$\eta_{LHV} = 1 - 0,033 + 0.112 = 1,079 \approx 108\%$$

In realtà il quantitativo di acqua che riesco a condensare dipende dalla temperatura del punto 2. Infatti la massima concentrazione in volume di acqua ancora presente nei fumi nel punto 2 è esprimibile come:

$$[H_2O]_2 = \frac{p_{sat}(T_2)}{p_{atm}}$$

ed è quindi funzione di  $T_2$  come mostra la figura 2.

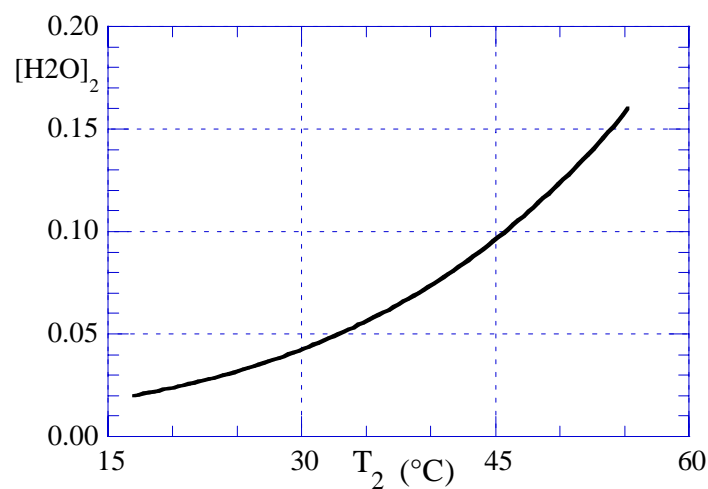


Figura 2

Conseguentemente:

$$x_{H_2O,2} = [H_2O]_2 \frac{mm_{H_2O}}{mm_{fumi}} = \frac{p_{sat}(T_2)}{P_{atm}} \frac{mm_{H_2O}}{mm_{fumi}}$$

La frazione in massa di acqua che riesco a condensare portandomi fino a  $T_2$  vale quindi:

$$x'_{H_2O} = x_{H_2O} - x_{H_2O,2}$$

Supponendo di poter raggiungere una temperatura  $T_2=30^\circ\text{C}$  ( $p_{sat}=0,04$  bar) si ottiene:

$$[H_2O]_2 = 0,04 \quad (\text{da figura 2})$$

$$x_{H_2O,2} = 0,04 \frac{18}{27,8} = 0,026$$

$$x'_{H_2O} = 0,108 - 0,026 = 0,082$$

e quindi  $q_c$  diventa:

$$q_c = [20,8] \frac{0,082 \cdot 2500}{50000} = 0,085$$

e il rendimento termico della caldaia pari a:

$$\eta_{LHV} = 1 - 0,033 + 0,085 = 1,052 \approx 105\%$$

Occorre ricordare che il valore di  $q_c$  può risultare maggiore di quello stimato se si opera la caldaia in maniera tale che  $T_3 < T_1$ , ed inoltre occorre, per una stima corretta, tenere in considerazione il contributo del termine  $c_p(T_3 - T_2)$  che nei calcoli presentati è stato trascurato rispetto a  $\Delta h_{lat}$  (in realtà considerando un salto di temperatura tra 2 e 3 di  $70^\circ\text{C}$ , il termine  $c_p(T_3 - T_2)$  vale circa il 5 % del calore latente di vaporizzazione).

E' inoltre corretto osservare che, parlando di caldaie a condensazione occorrerebbe esprimere il rendimento riferito al potere calorifico superiore. In tal caso, ricordando che il metano ha un HHV=55600 kJ/kg, si ottiene:

$$\eta_{HHV} = \eta_{LHV} \frac{LHV}{HHV} = 1,052 \cdot 0,9 = 0,95$$

Infine, nelle figure 3 e 4 viene presentata la linea di condensazione dei fumi con la presenza di un rigeneratore alimentato dai fumi stessi per il riscaldamento finale prima dell'emissione in atmosfera.

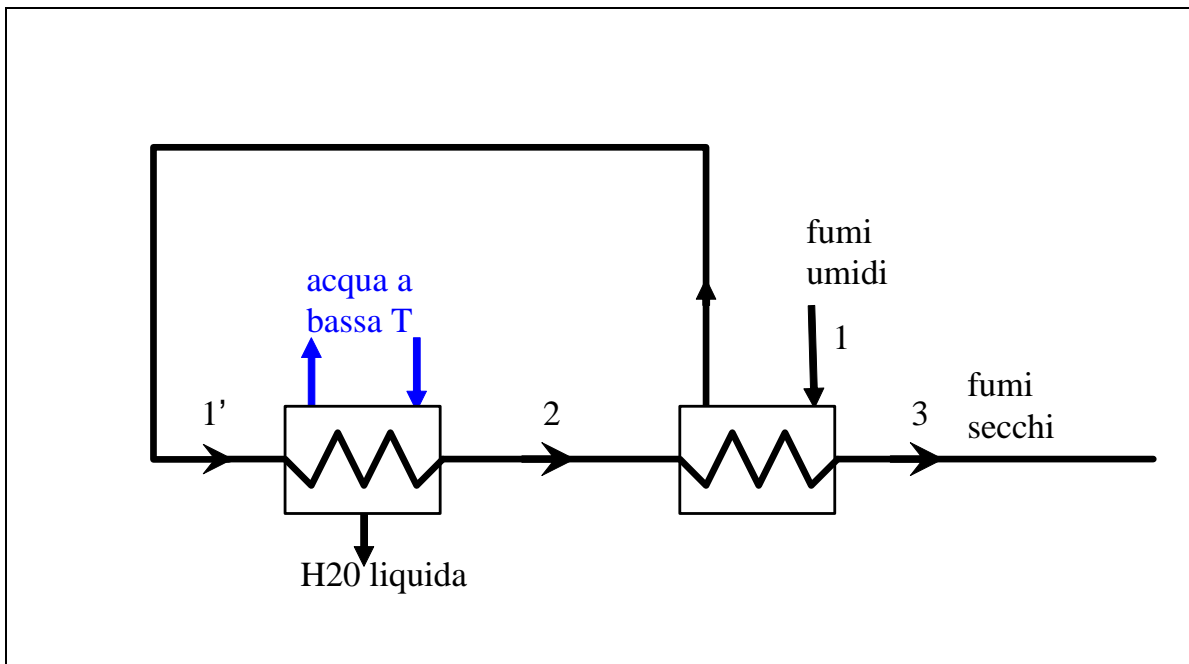


Figura 3

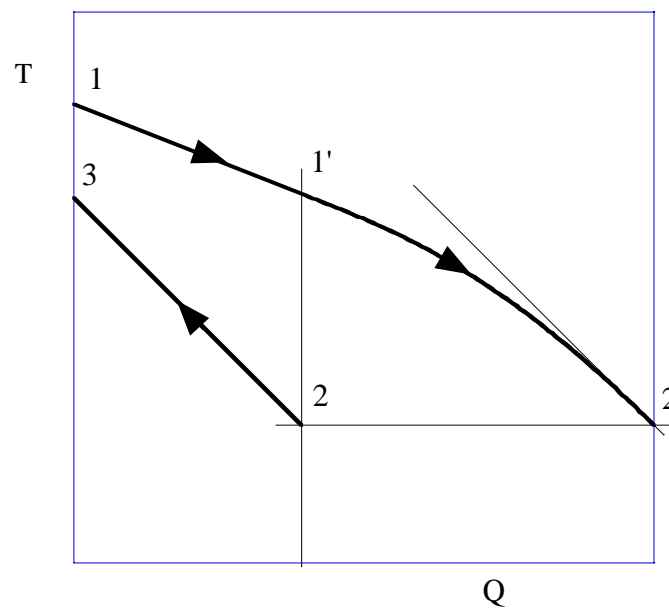


Figura 4