

# **Produzione e distribuzione dell'energia termica**

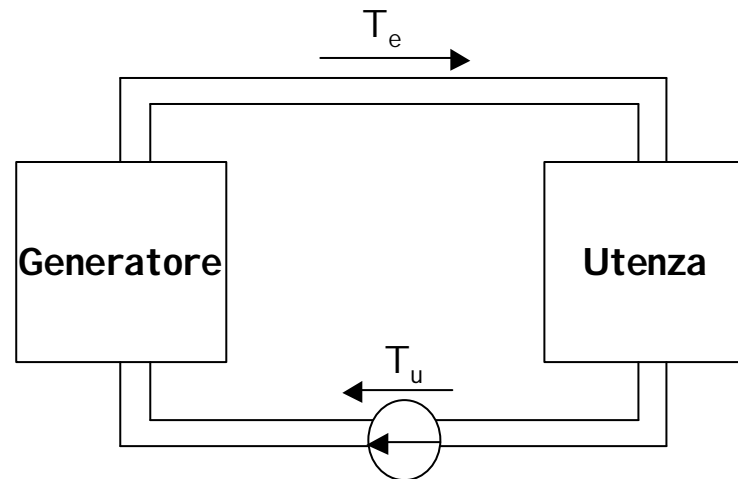
A cura di Giovanni Miragliotta

# Il problema

Fornire energia sotto forma di vapore ad utenze disperse all'interno del lay-out di impianto.

Il servizio deve:

- Generare la potenza necessaria nel tempo;
- Distribuire la potenza generata, tenendo conto dei requisiti (temperature, pressioni) delle utenze.



# Articolazione della lezione

- Obiettivo e leve decisionali;
- Analisi delle relazioni fondamentali;
- Scelta del fluido transfer;
- L'impianto:
  - Macro-componenti;
  - Il generatore di vapore:
    - Dimensionamento;
    - Regolazione;
  - L'accumulatore di vapore:
    - Descrizione;
    - Dimensionamento.

# Obiettivo e leve decisionali

## **Obiettivo:**

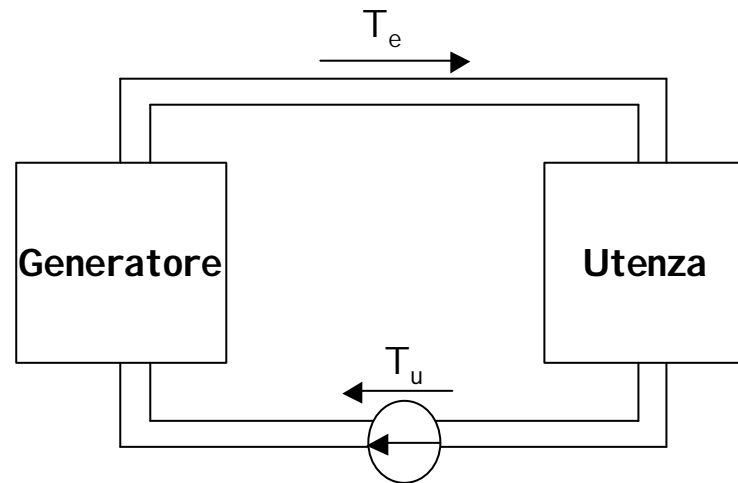
*Minimizzazione del costo globale del servizio*

- Costo impianto:
  - Generatore;
  - Tubazioni;
  - Pompaggio;
  - Scambiatori;
  - Serbatoi;
  - ecc.;
  
- Costo esercizio.

## **Leve decisionali**

- Fluido intermediario (natura, velocità,...);
- Generatore di calore (potenzialità, rendimento, eccesso d'aria,...);
- Salto di temperatura del fluido;
- Superficie degli scambiatori;
- Sistemi di regolazione (portata e temperatura);
- Accumulatori di vapore;
- Sistema di pompaggio;
- Combustibile.

# Analisi delle relazioni fondamentali



Si definisce Potenza termica utile  $Q_u$  (kcal/h) la potenza generata e trasferita che viene effettivamente ceduta all'utenza.

Nella selezione del fluido transfer, possono darsi due casi:

- Fluido che opera non sfruttando la transizione di fase;
- Fluido che opera sfruttando la transizione di fase.

# Analisi delle relazioni fondamentali

Fluido transfer senza transizione di fase:

$$Q_u = G \cdot c \Delta T = (\rho \cdot v \cdot 3600 \cdot A) \cdot c \cdot \Delta T$$

G: portata del fluido transfer, kg/h

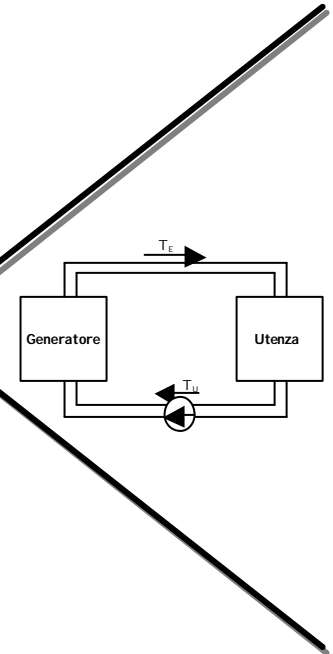
c: calore specifico, kcal/kg·°C

$\Delta T$  ( $T_e - T_u$ ): salto di temperatura del fluido, °C

A: sezione di passaggio, m<sup>2</sup>

$\rho$ : densità del fluido, kg/m<sup>3</sup>

v: velocità, m/s



Fluido transfer con transizione di fase:

$$Q_u = Q_u = (\rho \cdot v \cdot 3600 \cdot A) \cdot (c \cdot \Delta T + r)$$

r: calore latente di evaporazione, Kcal/kg

**Questa seconda espressione fa l'ipotesi che l'utenza sia in grado di sfruttare anche il calore latente, cosa questa che richiede scambiatori opportuni.**

# Analisi delle relazioni fondamentali

Da quanto detto alla slide precedente, discendono le seguenti proprietà del fluido transfer perché sia massima la potenza termica utile  $Q_u$  trasferita:

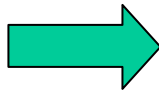
$$Q_u = G \cdot c \cdot \Delta T = (\rho \cdot v \cdot 3600 \cdot A) \cdot c \cdot \Delta T$$

- Abbia elevata densità  $\rho$ ;
- Consenta elevate velocità  $v$ ;
- Abbia elevata capacità termica;
- Stabilità chimica, per ottenere elevate temperature  $T_e$ .

*Questa potenza è veicolata dal fluido transfer,  
ma deve ancora essere scambiata...*

# Analisi delle relazioni fondamentali

Guardando dal punto di vista del processo di scambio termico, per la potenza  $Q_u$  vale la seguente relazione:

$$Q_u = k \cdot S \cdot \Delta\theta_{ml}$$
$$k = \frac{1}{1/\alpha_t + 1/\alpha_f + s/\lambda}$$
$$\Delta\theta_{ml} = \frac{\Delta\theta_c - \Delta\theta_f}{\ln(\Delta\theta_c/\Delta\theta_f)}$$


Slide successiva

$S$ : superficie dello scambiatore,  $m^2$

$k$ : coeff. di scambio termico globale,  $Kcal/(h \cdot m^2 \cdot ^\circ C)$

$\Delta\theta_{ml}$  = delta medio logaritmico,  $^\circ C$

$\alpha_t$  = coeff. di scambio convettivo fluido transfer,  $Kcal/(h \cdot m^2 \cdot ^\circ C)$

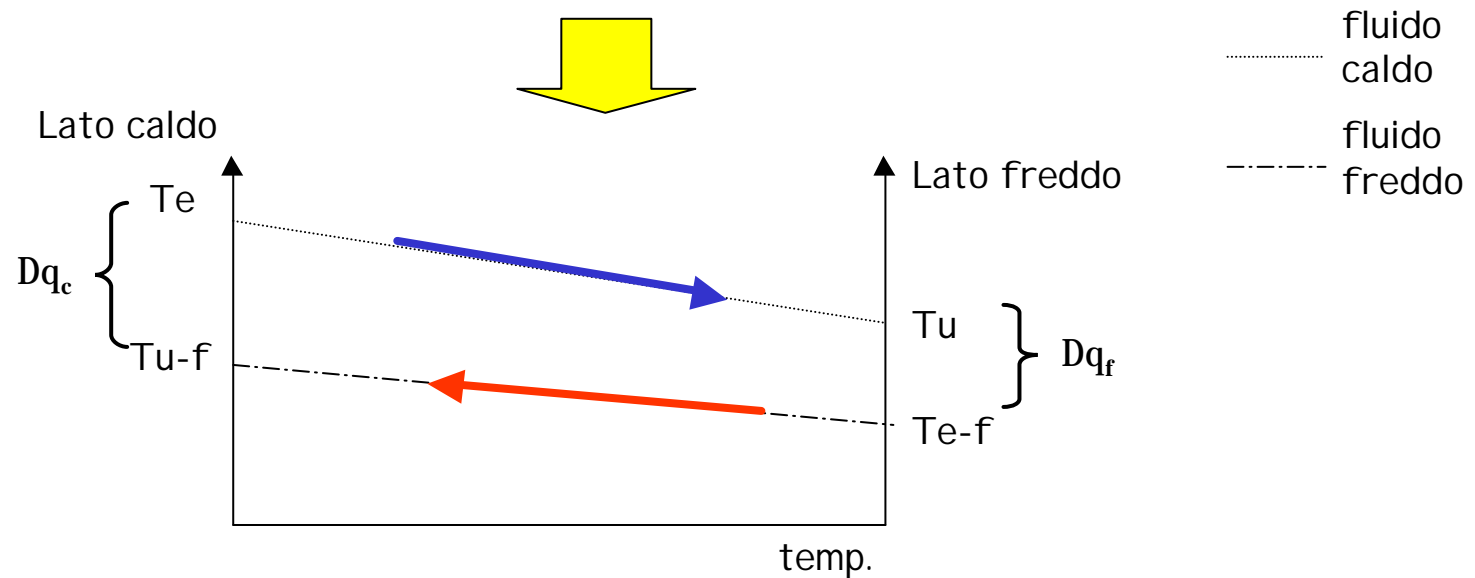
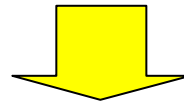
$\alpha_f$  = coeff. di scambio convettivo fluido freddo,  $Kcal/(h \cdot m^2 \cdot ^\circ C)$

$\lambda$  = conducibilità parete di scambio,  $Kcal/(h \cdot m \cdot ^\circ C)$

$s$  = spessore parete di scambio,  $m$

# Analisi delle relazioni fondamentali

$$\Delta\theta_{ml} = \frac{\Delta\theta_c - \Delta\theta_f}{\ln(\Delta\theta_c/\Delta\theta_f)}$$



- $\Delta\theta_c$ : delta temperature al lato caldo =  $T_e - T_{u-f}$ , °C;
- $\Delta\theta_f$ : delta temperature al lato freddo =  $T_u - T_{e-f}$ , °C.

# Analisi delle relazioni fondamentali

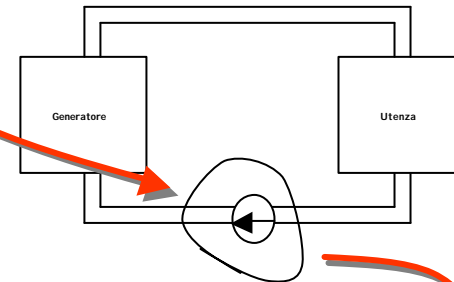
Da quanto detto alle slide precedenti, discendono le seguenti proprietà richieste ai componenti dell'impianto:

- Fluidi transfer:
  - Elevato coefficiente di scambio convettivo ( $\alpha_t, \alpha_f$ );
- Scambiatore:
  - Elevata superficie  $S$  di scambio;
  - Elevato coefficiente di scambio conduttivo  $\lambda$  ;
  - Limitato spessore  $s$  di parete.

# Analisi delle relazioni fondamentali

Per veicolare la potenza termica  $Q_u$  si rendono necessarie due sorgenti di potenza:

- Generazione del calore per il riscaldamento del fluido transfer;
- Pompaggio del fluido nel circuito.



Per la potenza della pompa vale la relazione:

$$P_n = \frac{V \cdot \Delta p}{\eta}$$

- $V$ : portata volumetrica,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;
- $\Delta p$ : prevalenza che la pompa fornisce al fluido,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;
- $\eta_{\text{pompa}}$ : rendimento della pompa.

# Analisi delle relazioni fondamentali

Dall'insieme delle relazioni fisiche precedentemente studiate, è possibile stimare, almeno qualitativamente, quale sia l'impatto delle leve decisionali sulle singole componenti della funzione obiettivo.

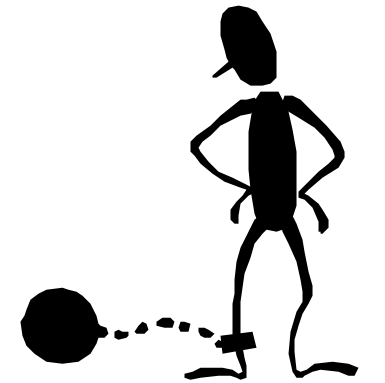
	Costo tubazioni	Costo pompaggio	Costo superfici di scambio
Temperatura $T_e$			
Temperatura $T_u$			
Calore latente $r$			
Velocità di trasporto $v$			
Densità $\rho$			
Calore specifico $c$			

*Le relazioni tra questi fattori vanno studiate di volta in volta!*

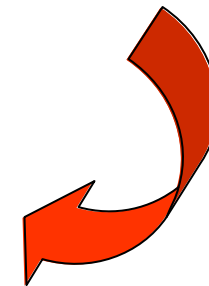
# Scelta del fluido transfer

Oltre alle caratteristiche fisiche precedentemente discusse, il fluido intermedio dovrebbe essere:

- Facilmente maneggiabile;
- Non tossico;
- Facilmente reperibile;
- Economico;
- (Chimicamente stabile);
- (denso:  $\uparrow \rho$ );
- (trasportabile ad elevate velocità);
- (dotato di buona capacità termica);
- (dotato di buone capacità di scambio convettivo).



***Aria e acqua!!!***



# Scelta del fluido transfer

Principali parametri termodinamici.

	Aria 75°C	Acqua 75°C	Acqua 8 bar	Vapore saturo 5 bar
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1	975	918	2.61
c (kcal/kg-°C)	0.24	1	1	0.48
r (kcal/kg)	-	-	-	≈ 500
v (m/s)	40	2÷4	2÷4	40÷50
$\alpha$ (kcal/m <sup>2</sup> -h-°C)	20÷40	200÷10000	200÷10000	40000(*)
T <sub>e</sub> (C°)	75	75	150	151

(\*) = in fase di transizione di stato

# Scelta del fluido transfer

Principali parametri termodinamici.

<b>Fluido transfer (caldo)</b>	<b>Materiale parete</b>	<b>Fluido freddo</b>	<b>K</b>
Aria	Lamiera acciaio	Acqua	10
Acqua	Lamiera acciaio	Acqua	200
Vapore	Lamiera acciaio	Acqua	800

# Scelta del fluido transfer

## Conclusioni.

Da quanto emerge dai dati precedentemente discussi, il fluido transfer usato nella maggior parte delle applicazioni è il **vapore d'acqua**.

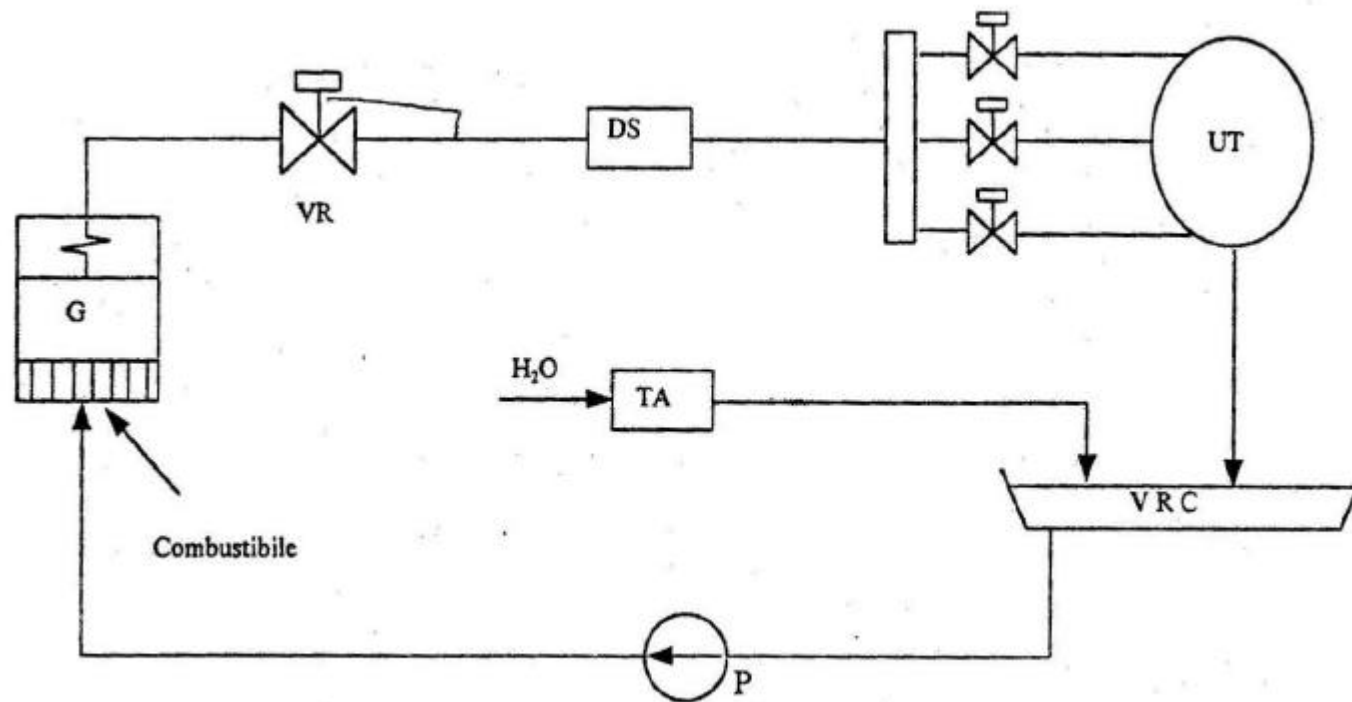
Al crescere della pressione del vapore migliorano le sue caratteristiche di scambio ( $\uparrow r$  e  $\rho$ ), ma crescono i costi dei particolari sottoposti ad azione meccanica. Di conseguenza, le pressioni tipiche di realizzazione non superano i 20 bar.

In alternativa si usano i fluidi diatermici:

- Ortodichlorobenzene;
- Dowtherm;
- Oli minerali;
- Ecc.

# L'impianto di produzione e distribuzione

Schema generale delle componenti.

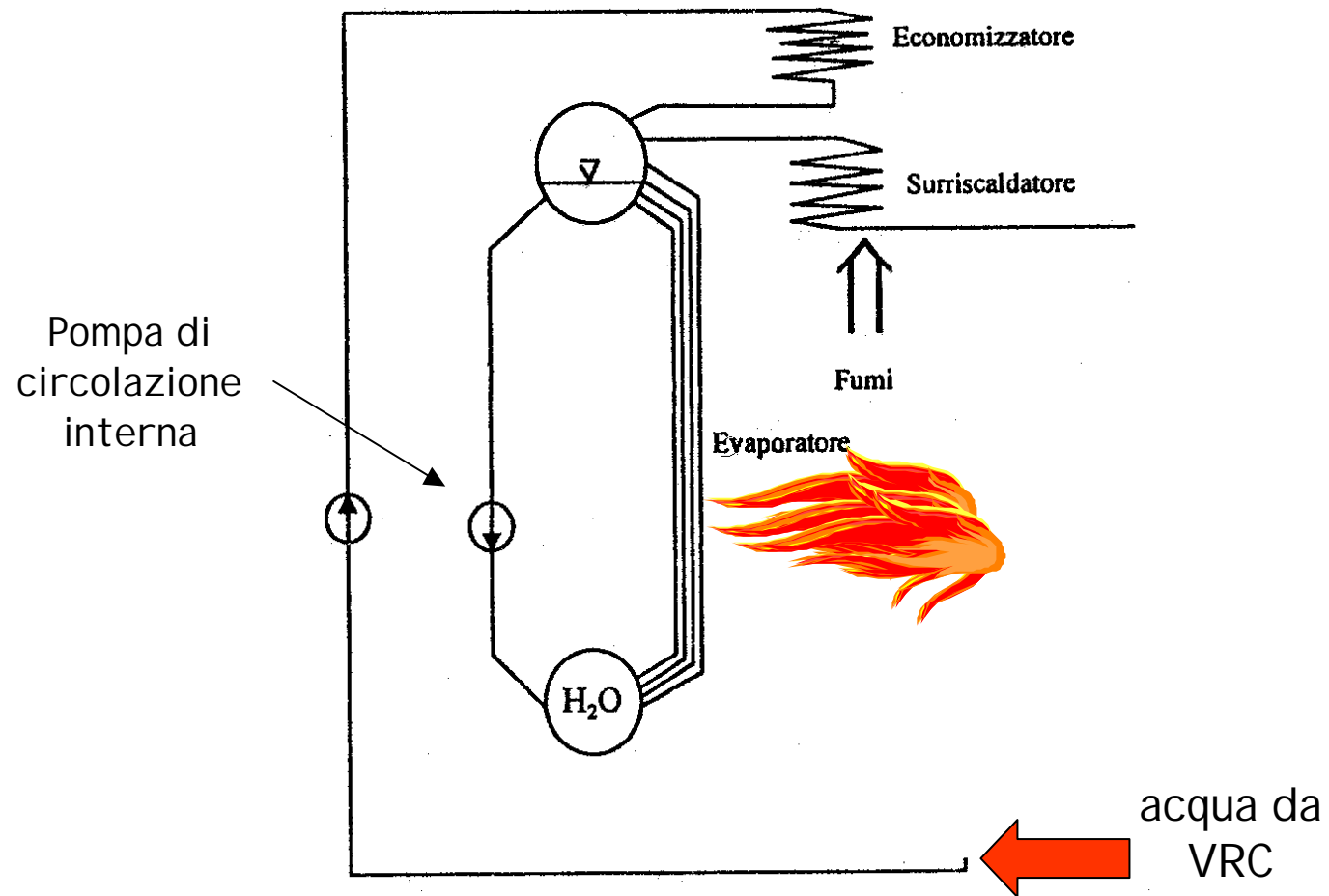


# L'impianto: componenti generali

## Componenti dell'impianto:

- Generatore:
  - Trasforma l'acqua in vapore;
  - Surriscalda il vapore;
- Valvola Regolazione (VR):
  - Regolata in pressione, modula l'erogazione seguendo la variabilità della richiesta dell'utenza;
- Desurriscaldatore:
  - Porta il vapore nella condizioni richieste dall'utenza;
- Vasca raccolta condensa:
  - Tipiche condizioni: 80°C, pressione ambiente;
- Trattamento acque:
  - Demineralizza l'acqua di reintegro;
  - Previene incrostazioni e conseguenti riduzioni dei coefficienti di scambio.

# L'impianto: il generatore di vapore



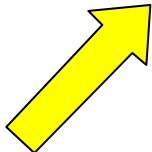
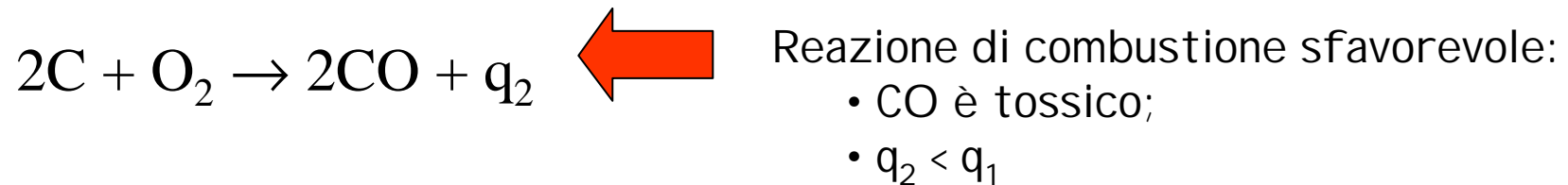
# Il generatore di vapore

## Descrizione generale:

- Caldaia di generazione:
  - Brucia il combustibile;
  - Orienta le fiamme verso il fascio tubiero di evaporazione;
  - Raccoglie ed indirizza i fumi;
- Pompa di circolazione interna:
  - Forza l'acqua dal serbatoio nei fasci tubieri investiti dalle fiamme;
- Surriscaldatore:
  - I fumi di combustione (ad alta temperatura) vengono indirizzati verso il vapore generato per portarlo a surriscaldamento;
- Economizzatore:
  - I fumi di combustione, impoveriti nel loro contenuto entalpico dopo lo sfruttamento presso il surriscaldatore, vengono impiegati per riscaldare l'acqua che circolerà nei fasci di evaporazione;
  - Incrementa il rendimento di generazione;
  - Previene cricche da tempra nel fascio tubiero.

# Dimensionamento del generatore di vapore

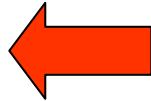
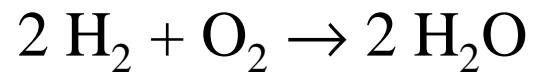
Le relazioni fondamentali relazioni chimiche sottostanti al processo di combustione sono:



***Per evitarla, faccio avvenire  
la combustione in eccesso d'aria  
rispetto ai valori stechiometrici.***

# Dimensionamento del generatore di vapore

Nel processo di combustione avviene anche un'altra reazione rilevante:



Nel caso in cui l'acqua formata si vaporizzi, si perde il suo calore latente di evaporazione.

Con riferimento ad un generico combustibile, si parla pertanto di:

- Potere calorifico superiore ( $H_s$ ): l'acqua formata non vaporizza;
- Potere calorifico inferiore ( $H_i$ ): l'acqua formata vaporizza.

*Tipicamente si fa riferimento al valore  $H_i$*

	$H_i$
Carbone	7000 kcal/kg
Nafta	9700 kcal/kg
Metano	9000 kcal/Nm <sup>3</sup>

# Dimensionamento del generatore di vapore

Come precedentemente richiamato, è opportuno far avvenire la combustione in eccesso d'aria.

Al crescere dell'aria in eccesso, si genera però un trade-off:

- Migliora la combustione;
- Si disperde calore:
  - Aria fredda in camera di combustione;
  - Maggiori perdite nei fumi caldi evacuati.

*L'esperienza suggerisce  
i seguenti valori di  
eccesso d'aria...*

	Eccesso $\epsilon$
Combustibili solidi	40%
Combustibili liquidi	20%
Combustibili gassosi	10%

# Dimensionamento del generatore di vapore

La potenza termica messa a disposizione dal generatore si calcola come:

$$Q_{\text{generatore}} = G_{\text{comb}} \cdot H_i \cdot \eta_{\text{generatore}}$$

(kcal/hg) = (Kg/h) · (Kcal/kg)

$$\eta = 1 - \left( \frac{P\%_{\text{fumi}}}{100} + \frac{P\%_{\text{incombusti}}}{100} + \frac{P\%_{\text{irraggiamento}}}{100} \right)$$

- P%fumi:
  - Funzione della portata dei fumi evacuati;
  - Funzione della temperatura dei fumi;
- P%incombusti:
  - combustione incompleta;
  - combustibile non ossidato,
  - residui di combustione (es. ceneri);
- P%irraggiamento:
  - si valuta per via sperimentale.

# Dimensionamento del generatore di vapore

Il contributo di abbassamento del rendimento per effetto dei fumi si può calcolare per mezzo della seguente espressione:

$$P\% \text{ fumi} = \frac{c_f \cdot \left[ \alpha_{\text{stechiom}} \cdot \left( 1 + \frac{\varepsilon}{100} \right) + f \right] \cdot \Delta T}{H_i} \cdot 100$$

Dove:

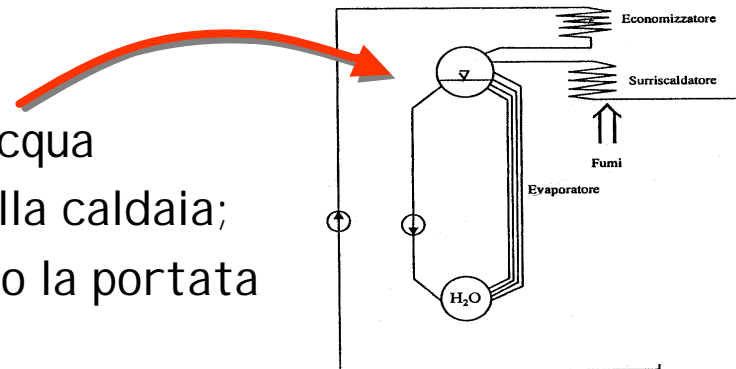
- $c_f$ : calore specifico dei fumi;
- $\alpha_{\text{stechiom}}$ : rapporto stechiometrico aria-combustibile;
- $\varepsilon$ : eccesso d'aria;
- $f$ : frazione di combustibile gassificata;
- $\Delta T$ : temperatura scarico fumi - temperatura ingresso aria;
- $H_i$ : potere calorifico inferiore del combustibile.

# Regolazione del generatore di vapore

## Regolazione in portata.

La richiesta dall'utenza è variabile: è necessario pertanto (nei limiti dell'elasticità del generatore) regolarne l'attività in funzione dell'effettiva richiesta istantanea. Questo viene fatto tramite la valvola VR:

- Quando cresce la richiesta dell'utenza, cresce il delta di pressione monte-valle;
- La valvola si apre;
- Si svuota il serbatoio contenente acqua in equilibrio col vapore presente nella caldaia;
- I sensori reagiscono, incrementando la portata di combustibile;
- Si ripristina l'equilibrio tra richiesta e produzione.

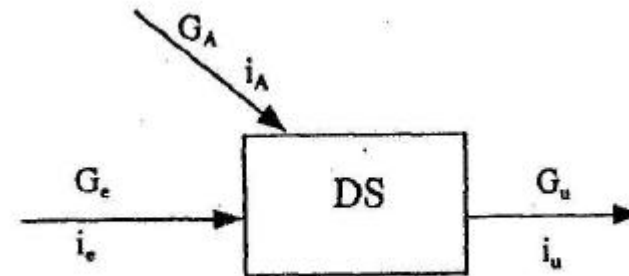


# Regolazione del generatore di vapore

Regolazione in temperatura.

Il vapore surriscaldato non è compatibile con le richieste dell'utenza, per questo si inserisce un desurriscaldatore (solitamente a miscela).

La trasformazione che avviene è isoentalpica.



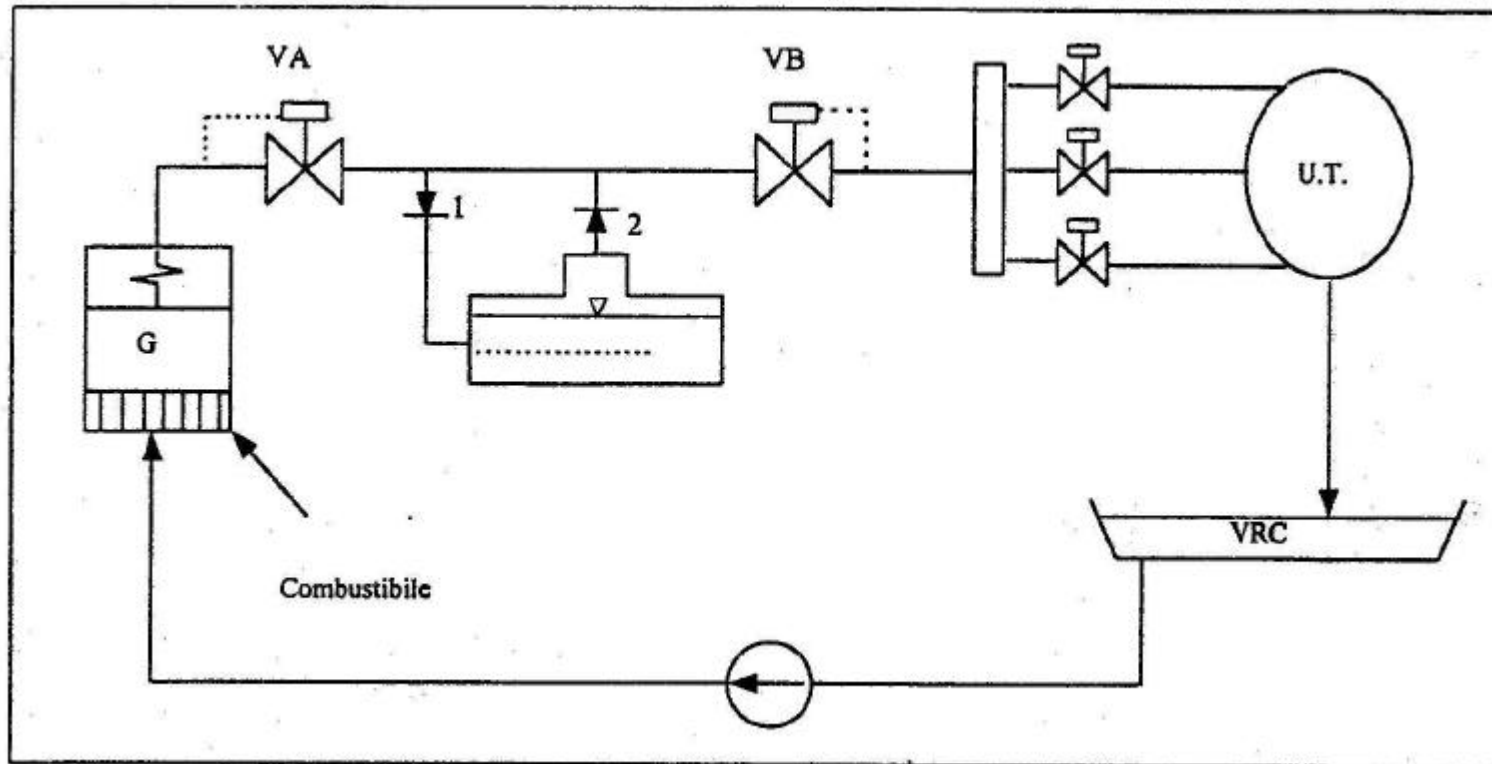
$$\begin{cases} G_e \cdot i_e + G_a \cdot i_a = G_u \cdot i_u \\ G_e + G_a = G_u \end{cases}$$

- $G_e$ : portata vapore surriscaldato, kg/h;
- $i_e$ : entalpia vapore surriscaldato, Kcal/kg;
- $G_a$ : portata acqua di desurriscaldamento, kg/h;
- $i_a$ : entalpia acqua di desurriscaldamento, Kcal/kg;
- $G_u$ : portata vapore in uscita, kg/h;
- $i_u$ : entalpia vapore in uscita, Kcal/kg.

**Variabili di controllo**

# L'impianto: l'accumulatore di vapore

Schema generale.



# L'accumulatore di vapore

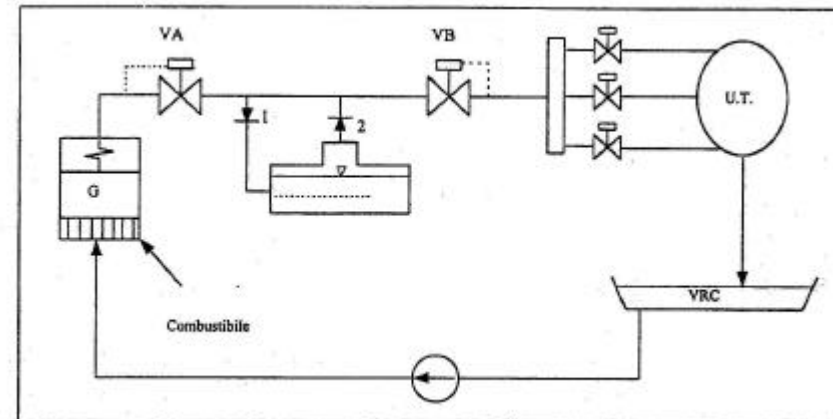
Generalità.

In alcune condizioni:

- Quando la variabilità delle richieste delle utenze è elevata;
- Quando l'elasticità del generatore è particolarmente bassa,

può essere conveniente introdurre un accumulatore polmone.

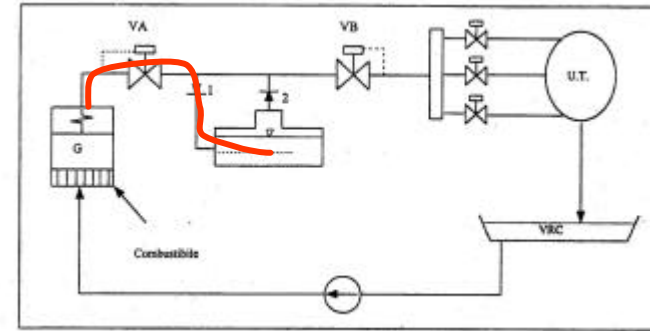
In un accumulatore, vapore ed acqua surriscaldata sono in equilibrio termodinamico tra loro.



# L'accumulatore di vapore

Funzionamento: fase di carica.

In fase di carica:

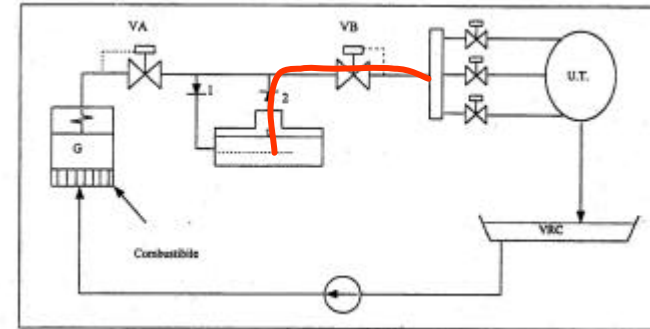


- La pressione a monte di Va sale, e la valvola 1 si apre;
- Il vapore prodotto gorgoglia nell'acqua presente nell'accumulatore;
- Il vapore condensa, cedendo il suo calore latente: la temperatura pertanto sale, così come il livello dell'acqua liquida;
- Allo stesso modo, un nuovo equilibrio termodinamico si forma tra acqua surriscaldata e suo vapore, con conseguente aumento della pressione.

# L'accumulatore di vapore

Funzionamento: fase di scarica.

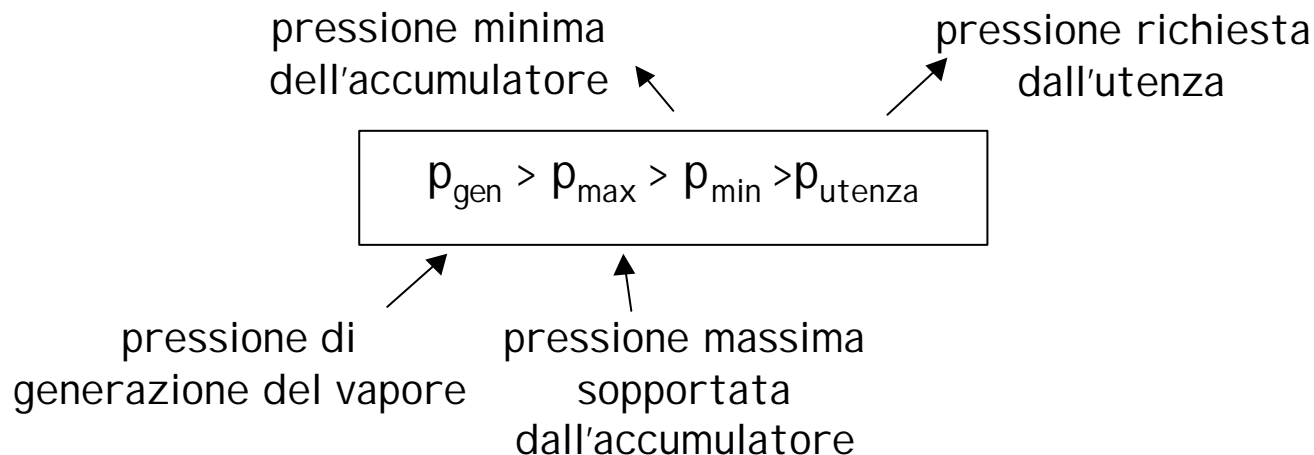
In fase di scarica avviene il processo inverso:



- La pressione a monte di Vb scende, e la valvola 2 si apre;
- Il vapore presente nell'accumulatore esce, rompendo l'equilibrio termodinamico;
- Per ripristinare questo, parte dell'acqua evapora;
- Si abbassano quindi temperatura, pressione e livello dell'acqua all'interno dell'accumulatore.

# Dimensionamento dell'accumulatore di vapore

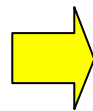
Perché questo meccanismo funzioni, deve valere la seguente catena di disequivalenze.



Come si intuisce, al crescere di  $p_{max}$ :

- Diminuisce il volume dell'accumulatore, e quindi il materiale necessario;
- Cresce però il costo della realizzazione, per la maggiore robustezza;
- Cresce anche il costo del generatore, dovendo crescere  $P_{gen}$ .

Valgono le due relazioni empiriche a seguire:



$$p_{max} \hat{I} [15, 18] \text{ bar}$$

$$p_{max} \hat{I} [2, 3] p_{min}$$

# Dimensionamento dell'accumulatore di vapore

Dimensionare un accumulatore significa:

Quantificare la massa di vapore immagazzinabile.



Quantificare l'energia immagazzinabile.



***... due diverse visioni  
del medesimo problema!***

# Dimensionamento dell'accumulatore di vapore

Quantificazione della massa di vapore immagazzinabile.



In primo luogo è importante ricordare come si possa scrivere il seguente bilancio energetico all'accumulatore, valido su un ciclo di carica-scarica.

$$M_{in} \cdot i_e = M_{out} \cdot i_u$$

In fase di scarica, l'entalpia del vapore  $i_u$  è inferiore ad  $i_e$ . Di conseguenza:

- Può rendersi necessario prevedere un sistema di reintegro dell'acqua;
- In caso di non adiabaticità dell'accumulatore, può rendersi invece necessario un sistema di spurgo.

# Dimensionamento dell'accumulatore di vapore

Quantificazione della massa di vapore immagazzinabile.



$$M_a = \frac{M_{out} \cdot r_m}{\eta \cdot c \cdot (T_1 - T_2)}$$

- $M_a$ : massa di vapore accumulata, kg;
- $M_{out}$ : massa di vapore ceduta in fase di scarica, kg
- $r$ : calore latente medio del vapore nella fase di scarica, kcal/kg;
- $c$ : calore specifico medio del vapore nella fase di scarica, kcal/kg;
- $T_1, T_2$ : temperature del liquido in condizioni di saturazione a  $p_{max}$  e  $p_{min}$ , °C ;
- $\eta$ : rendimento dell'accumulatore, per non adiabaticità.

# Dimensionamento dell'accumulatore di vapore

Quantificazione dell'energia immagazzinabile.



$$E_a = 0.9 \cdot \eta \cdot V \cdot c \cdot (\rho_1 T_1 - \rho_2 T_2)$$

- $E_a$ : energia accumulata, kcal;
- 0,9: fattore di riempimento dell'accumulatore;
- $V$ : volume dell'accumulatore,  $m^3$ ;
- $c$ : calore specifico medio del vapore nella fase di scarica, kcal/kg;
- $T_1, T_2$ : temperature del liquido in saturazione a  $p_{max}$  e  $p_{min}$ , °C ;
- $\rho_1, \rho_2$ : densità del liquido in condizioni  $p_{max}$  e  $p_{min}$ ,  $kg/m^3$ ;
- $\eta$ : rendimento dell'accumulatore, per non adiabaticità.