I gradi della patente per la conduzione dei generatori di vapore sono:

1 grado	oltre 20t/h	superficie oltre 500 m²
2 grado	fino a 20t/h	superficie fino a 500 m²
3 grado	fino a 3t/h	superficie fino a 100 m²
4 grado	fino a 1t/h	superficie fino a 30 m²

t/h indica la producibilità (la potenzialità)
La producibilità è la quantità di vapore prodotto in un ora.

Si misura in kg/h o t/h

La superficie di riscaldamento è l'area in m² della superficie lambita da una parte dai fumi e dall' altra dall' acqua più il tubo focolare. Si misura lato fumi.
La producibilità specifica è il rapporto tra i kg di vapore prodotti in un'ora e la superficie di riscaldamento.

Si misura in kg_{vap}/m^2h

Formula $W_s = W/S$

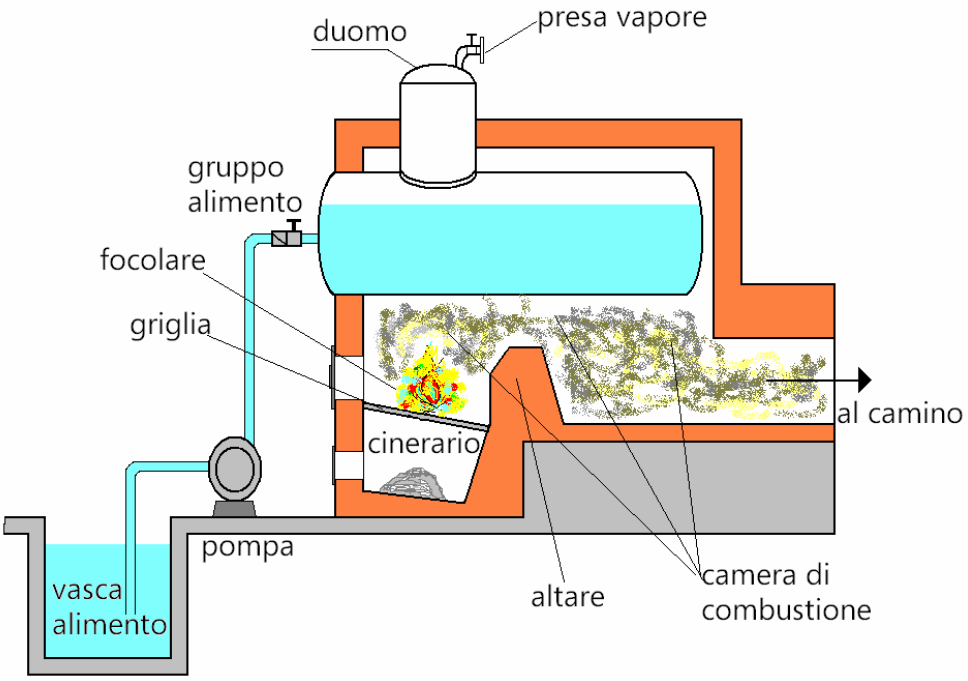
Perché si usa il vapore?

Il vapore ha due scopi:

1. per trasportare il calore e scambiarlo
2. trasporto del calore e trasformarlo in lavoro meccanico

Prototipo di generatore di vapore

Corpo cilindrico: costituisce la caldaia ed è un recipiente metallico costruito in modo da resistere alla pressione che si svilupperà al suo interno, riempito di acqua fino ad un certo livello *camera d' acqua*; nella sua parte più alta si raccoglie il vapore *camera del vapore*. La superficie che separa l'acqua dal vapore si chiama *specchio evaporante*.
Sulla parte più alta del corpo cilindrico si nota un' appendice verticale cilindrica, detta duomo, alla quale è collegata la tubazione della *presa del vapore*. Il prelievo del vapore viene fatto in quel punto, per averlo il più possibile secco, se si effettuasse più in basso il vapore prelevato trascinerebbe con sé delle particelle d' acqua *vapore umido*.



Caldaia = solo la scatola metallica(che contiene acqua e vapore).
Generatore di vapore = scatola metallica + tutti gli accessori che lo compongono

Ci sono almeno due valvole:
- una valvola di ritegno
- una valvola a volantino (mai a sfera)

Il focolare è la parte del generatore dove viene caricato il combustibile (in questo caso il carbone) e dove avviene la combustione.
La griglia è la parte del focolare destinata a sostenere il combustibile solido (carbone, legna) e a distribuire l' aria.
L'altare è il muretto di refrattario posto alla fine della griglia per contenere il carbone e deviare i fumi-(per aumentare la capacità di cedere calore).
Il cinerario è la parte dove si raccoglie la cenere.
La camera di combustione è tutto lo spazio del focolare che viene occupato dai fumi che si sviluppano nella *combustione*.
-La trasmissione del calore avveniva per irraggiamento per la sola parte di caldaia affacciata sulla camera di combustione e per convezione nella parte lambita dai fumi.

Elementi caratteristici dei generatori di vapore

-Producibilità o potenza (potenzialità): è la quantità di vapore prodotta in un'ora; si misura in kg/h oppure in (t/h)
E'ovviamente necessario precisare lo stato fisico del vapore (pressione, temperatura).
In tal caso, noto il contenuto termico del kg di vapore prodotto può essere più convenientemente espressa in unità di potenza [W] o [kcal/h]
-Producibilità specifica o potenza specifica: è il rapporto tra i kilogrammi di vapore prodotti in un'ora e la superficie di riscaldamento. Rappresenta i kilogrammi di vapore che si ottengono in un'ora per ogni metro quadrato di superficie riscaldata [S]; si misura in kg/m²h.→[kg_{vap}/m²h]

Formula Ws = W/S = kg/m²h→[kg_{vap}/m²h]

-Pressione di bollo:è la pressione effettiva massima alla quale il generatore può funzionare regolarmente. (E' anche la pressione di apertura della valvola di sicurezza).
L'unità di misura è il bar o il kg/cm² (ate). Il valore di pressione di bollo è rilevabile dal libretto matricolare dell' apparecchio e dall' apposito bollo esistente al centro della targa.
-Pressione di esercizio: è la pressione- alla quale si fa lavorare il generatore (più bassa di quella di bollo).
-Giro di fumo: è il percorso dei fumi→un giro di fumo ogni volta che attraversa la caldaia.
-Superficie di riscaldamento: è l'area in m² della superficie lambita da un lato dai fumi e dall'altro dall' acqua, si misura dalla parte esposta ai fumi.[S]
-Carico termico volumetrico della camera di combustione: è il rapporto fra la quantità di calore sviluppata dalla combustione nell'unità di tempo (potenza del bruciatore espressa in kW) e il volume della camera di combustione (espressa in m³). Si misura in [W/m³] o [kcal/m³ h]→[kW/m³]
-Carico termico superficiale della camera di combustione: è il rapporto fra la quantità di calore sviluppata dalla combustione nell'unità di tempo (potenza del bruciatore espressa in kW) e la superficie di riscaldamento della camera di combustione (espressa in m²). Si misura in [W/m²] o [kcal/m² h]→[kW/m²]

esempio:

1 t/h di vapore è circa 0,7 MW = 700 kW

parametro importante per esame

-Rendimento del generatore: è il rapporto tra il calore trasmesso al fluido e il calore sviluppato nella combustione
-Indice di vaporizzazione: è il rapporto tra la massa di vapore prodotto e la massa di combustibile bruciato nello stesso tempo. Rappresenta i kilogrammi di vapore che si ottengono dalla combustione di un kilogrammo di combustibile. Si misura in →kg_{vap}/kg_{comb}.

Classificazione dei generatori di vapore

La varietà dei tipi di generatori esistenti ha portato a classificarli in funzione delle loro principali caratteristiche.
Si cerca di distinguere i generatori in base alle caratteristiche essenziali che si intendono, di volta in volta mettere in evidenza.
Si riportano qui di seguito le principali classificazioni.
Con riferimento al modo di installazione (classificazione ormai superata)

- ***Generatori fissi***: sono quelli che, costituendo unità grande e complessa (un tempo erano rivestiti completamente in muratura), non possono essere trasferiti senza demolire, costruiti sul posto.
- ***Generatori semifissi***: sono quelli che, al contrario, sono eventualmente interamente trasportabili. Sono di potenza limitata. SI costruiscono però attualmente generatori tipo monoblocco trasportabili di oltre 50 t/h (30 000 000 kcal/h ≈ 35 MW)
Costruiti in fabbrica e montati (trasportati) sul posto; la maggior parte.
- ***Generatori mobili***: sono montati su basamento mobile e solitamente forniscono essi stessi la potenza necessaria per il movimento (es. locomotive ovvero dei generatori usati sulle navi).

Un altro possibile criterio di classificazione è la ***pressione***, ma come si è detto prima, tale distinzione non è ben netta; per comodità si fanno le seguenti distinzioni:

- ***a bassa pressione***	fino a 1 bar
- ***a media pressione***	da 1 fino a 15 bar
- ***ad alta pressione***	da 15 fino a 100 bar
- ***ad altissima pressione***	oltre 100 bar

Dal tipo di combustibile bruciato:

- ***Generatori a combustibile solido***
- ***Generatori a combustibile liquido***
- ***Generatori a combustibile gassoso***

Dalla disposizione del focolare*:*

- ***Generatori a focolare interno***, nei quali il focolare entra tutto a far parte della superficie di riscaldamento (caldaie Cornovaglia, semifisse orizzontali e verticali con o senza tubi da fumo)
- ***Generatori a focolare esterno***, nei quali non tutte le parti del focolare entrano a far parte della superficie di riscaldamento (caldaie multitubolari a focolare non o solo parzialmente schermato, ecc.).

Un importante classificazione è quella riferita al **volume d'acqua** in rapporto alla superficie di riscaldamento

$$\frac{\textbf{volume acqua}}{\textbf{sup. di riscald.}}$$

- ***Generatori a grande volume d'acqua:***
  da 130 a 250 litri d'acqua per m² di superficie di riscaldamento
- ***Generatori a medio volume d'acqua:***
  da 70 a 130 litri d'acqua per m² di superficie di riscaldamento
- ***Generatori a piccolo volume d'acqua:***
  meno di 70 litri d'acqua per m² di superficie di riscaldamento

-Classificazione più importante:
E' quella che riguarda il **percorso dei fumi** rispetto ai corpi che contengono l'acqua, si ha così:

-***Generatori a tubi da fumo***: se l'acqua bagna la parete esterna dei tubi al cui interno circolano i fumi caldi;
-***Generatori a tubi d'acqua***: se è l'acqua a passare all'interno dei tubi e i fumi passano invece dalla parte esterna.

Classificazione in base alla **circolazione dell'acqua** all'interno del generatore

-***Generatori a circolazione naturale***: quando il moto avviene spontaneamente per effetto della variazione di densità del liquido alle diverse temperature o alla differenza di densità fra acqua e miscela di acqua e vapore(tubi vaporizzatori)
-***Generatori a circolazione accelerata***: (ovvero a circolazione controllata o assistita), cioè aiutata per mezzo di pompe.
-***Generatori a circolazione forzata***: quando l'acqua pompata nel generatore viene riscaldata, evaporata e surriscaldata, percorrendo un unico circuito. I generatori di tale tipo vengono detti monotubolari perché è come se il circuito fosse costituito da un unico tubo.
-***Generatori a circolazione combinata***: derivata dall'unione dei due sistemi di circolazione con - trollata e forzata.

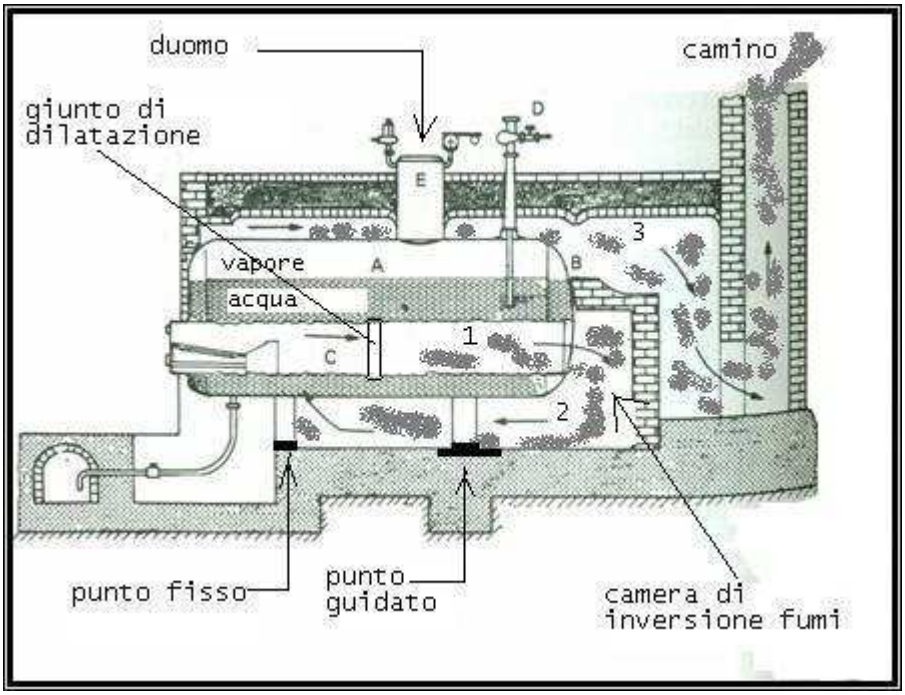
DESCRIZIONE DEI TIPI PIŬ COMUNI DI GENERATORI

Generatori a grande volume d'acqua

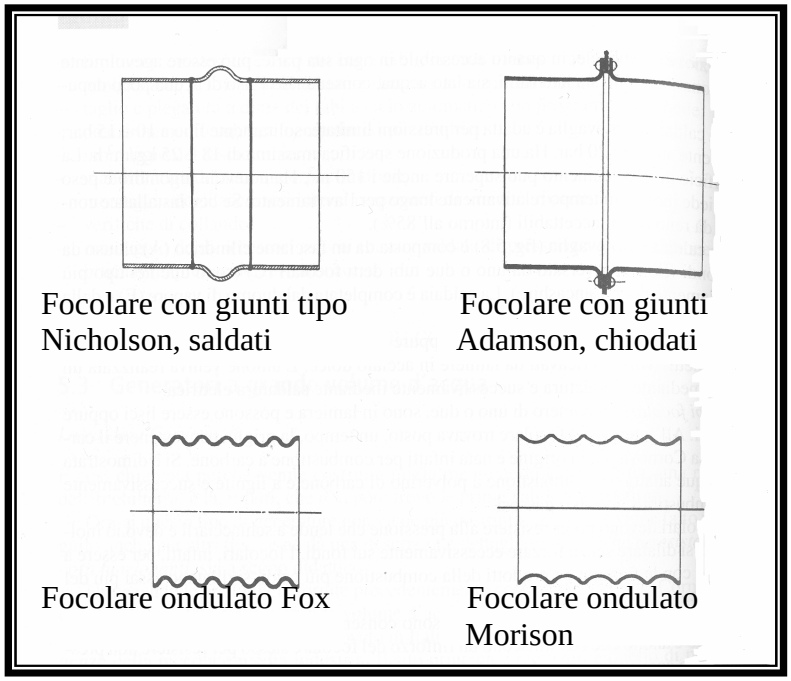
La caldaia Cornovaglia

E' così chiamata perché venne costruita inizialmente nella Cornovaglia, una regione dell'Inghilterra; è là infatti, che il vapore trovò le prime valide applicazioni.
Il suo principale requisito è quello di poter far fronte, data la grande massa d'acqua contenuta alla temperatura di ebollizione, a rapidi aumenti della richiesta di vapore, senza per questo subire forti cadute di pressione. E' di costruzione semplice e può essere agevolmente ispezionato sia il lato fumi sia il lato acqua, consentendo l' uso di acqua poco depurata. Essa è adatta per pressioni limitate solitamente fino a 10 ÷ 15 bar; raramente supera i 20 bar. Ha una producibilità specifica massima di 18 ÷ 25 kg/m² h. La superficie di riscaldamento può superare anche i 150 m². Ha notevole ingombro e peso e richiede un tempo relativamente lungo per l'avviamento. Se ben installata e

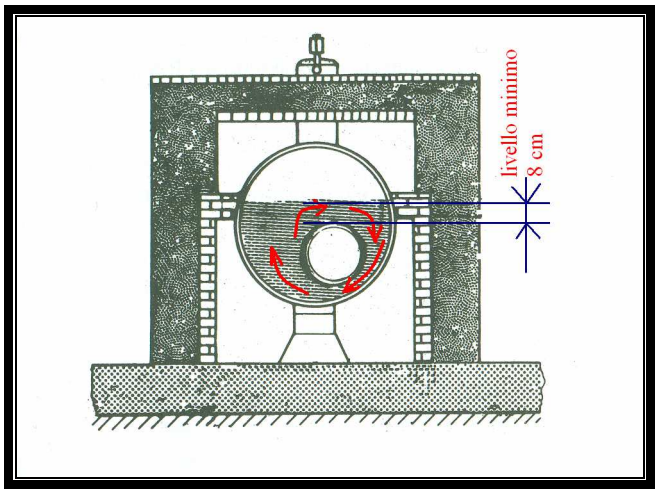
condotta dà rendimenti accettabili (intorno all’ 85%)



La caldaia Cornovaglia (immagine sopra) è composta da un fasciame cilindrico(A) chiuso da due fondi (B) la loro forma bombata permetteva dilatazioni e compensazioni; é attraversato da uno o due tubi detti focolari (C) in questo caso uno con un giunto di dilatazione che ne aumentava la nervatura e quindi la resistenza alla pressione, lato acqua e vapore che tende a schiacciarli, (vedi alcuni esempi nelle figure sotto). La caldaia è completata dal duomo di vapore (E) e dalla colonnina di alimentazione (D).



Nei focolari ondulati, le dilatazioni sono meglio consentite, come la resistenza allo schiacciamento (ovviamente a parità di diametro e spessore). Il focolare ondulato ha una superficie di scambio maggiore di circa il 10% rispetto al focolare liscio, a parità di diametro medio.

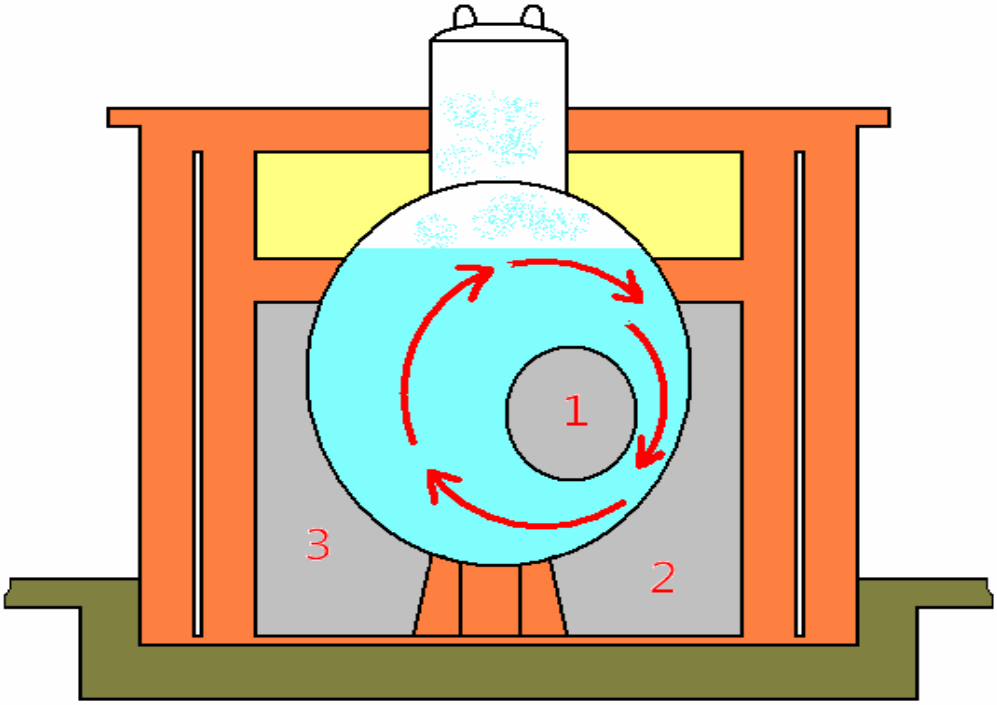


Il focolare di lato, di fatto diventa il motore di circolo dell' acqua.
- Il fondo anteriore porta gli attacchi per gli indicatori di ***livello minimo*** che deve essere **8 cm** sopra l'ultima lamiera lambita dai fumi (vedi immagine sopra).
Il duomo di vapore è la parte cilindrica verticale sistemata in alto sul fasciame, in esso si raccoglie il vapore meno umido, perché le goccioline d'acqua, che nell'ebollizione vengono trascinate dal vapore, cadono in basso. Sul duomo sono sistemate le prese del vapore, delle valvole di sicurezza, del manometro e quelle per il prelievo del vapore necessario per i mezzi di alimentazione(cavallini, iniettori). Il duomo termina in alto con un fondo su cui è praticato il passo d'uomo.
La Cornovaglia e una caldaia di tipo fisso, perché eccetto la facciata e la parte superiore del duomo è completamente rivestita di muratura. Nello spazio tra la caldaia e la muratura circolano i fumi, i quali percorrono tre giri: nel primo percorrono tutto il tubo focolare(1); nel secondo percorrono un cammino inverso al primo(2), investendo tutta la parte del fasciame bagnata dall'acqua(tornando sul davanti della caldaia); nel terzo giro(3) si portano in alto e percorrono, nella stessa direzione del primo, le parti del fasciame occupate internamente dal vapore da dove poi si dirigono al camino.

-Ricapitolando: la caldaia Cornovaglia è di tipo fisso, a grande volume d'acqua, combustibile solido,è un ibrido da tubi da fumo, circolazione naturale, il focolare ha temperatura maggiore rispetto al mantello esterno, la forma bombata dei fondi permetteva dilatazioni e compensazioni; il giunto di dilatazione ne aumentava la nervatura, con il focolare tipo Fox migliorava la turbolenza e maggior scambio di calore(costo maggiore). Il terzo giro di fumi era un problema.

La caldaia Cornovaglia di secondo tipo

- 18 bar max
- Ws 18 ÷ 20 kg/m²h
- Generatore di tipo fisso a grande volume d'acqua



La caldaia Cornovaglia di 2° tipo

I fumi non percorrono la parte superiore della caldaia, ma fanno il seguente percorso: dal focolare, tornando in avanti, lambiscono tutta la parte sinistra (o destra) della caldaia bagnata dall' acqua; quindi ritornano nella parte posteriore lambendo la tutta la parte destra (o sinistra) della caldaia bagnata dall' acqua. Infine si dirigono al camino. La caldaia è montata leggermente inclinata, (mezzo centimetro per metro) verso il davanti per migliorare lo scarico durante lo svuotamento

LA DILATAZIONE TERMICA

E' noto che i corpi, con l'aumento della temperatura si dilatano. Se si scalda una sbarra e se ne misura l'allungamento , si trova come è intuitivo che questo è tanto maggiore quanto più lunga è la sbarra e quanto maggiore è l'aumento di temperatura.

-Dilatazione lineare
-si indica con ***k*** (oppure ***c***) il coefficiente di dilatazione →→→→k=[mm/m K*]

K*= Kelvin oppure °C

Alcuni esempi di coefficiente di dilatazione lineare di alcuni materiali a temperature comprese tra 10°C e 100°C in mm/m K

Sostanza	Coeff. di dilat.(k) (c)
Acciaio al carbonio	0,0123
Alluminio	0,0237
Ottone	0,018
Rame	0,0165
Zinco	0,036

Vedi anche tabella 1.32 del libro a pag 69

$\Delta l = l_0 \cdot k \cdot \Delta T$

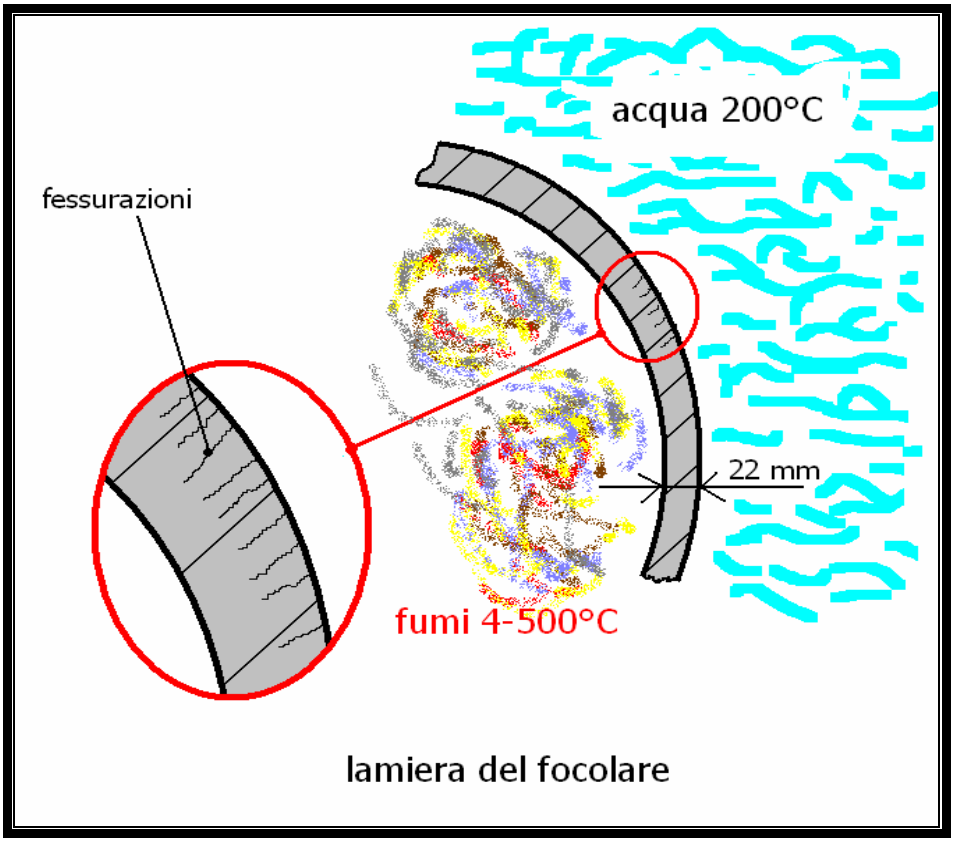
Δl = allungamento (mm)
l_0 = lunghezza iniziale (m)
k =coefficiente di dilatazione [mm/m K] →→→[mm/m °C]
ΔT= differenza di temperatura (K) oppure Δt = differenza di temperatura (°C)

Esempio:

calcolo dell'allungamento di una sbarra di acciaio di lunghezza 6m, temperatura iniziale (t_1) 10°C e temperatura finale (t_2) 200°C

$\Delta l = l_0 \cdot k \cdot \Delta t$→→→$6 \cdot 0{,}0123 \cdot (200-10)$→→→$6 \cdot 0{,}0123 \cdot 190 = 14{,}022$ mm↓
↓
6m + 14,022mm = 6,014 m

Temperatura media della parete del focolare 310 ÷ 320°C
Spessore max 22mm
Nota: la situazione migliora montando giunti termici o focolari Fox



“Resistenza alla pressione. Esempio batiscafo.”

Nei focolari per aumentare la resistenza alla pressione applicata dall'esterno, a causa delle dilatazioni termiche, non e' possibile aumentare lo spessore oltre i 22 mm. La zona (lo strato) interna dilaterebbe di piu' dello strato esterno ed il focolare si criccherebbe. Se non vi sono in gioco elevate differenze di temperatura, lo spessore si può aumentare senza problemi secondo necessità, come nel caso dei batiscafi.

GENERALITA' SULLA COSTRUZIONE DEI GENERATORI DI VAPORE

►Tutti gli apparecchi a pressione, e pertanto i generatori di vapore, devono resistere con alto grado di sicurezza alla pressione interna e alle altre sollecitazioni cui sono sottoposti.
►Il progetto, la costruzione, le prove, la messa in servizio e le ispezioni periodiche, nei vari Paesi sono regolamentate a termini di legge. Nella Unione Europea è in vigore la direttiva 97/23/CE del 29 maggio 1997 denominata "PED" (Pressure Equipment Directive) recepita in Italia con decreto legislativo n.93 del 25 febbraio e la sua applicazione è diventata obbligatoria a partire dal 29 maggio 2002.
In Italia RES (Requisti Essenziali di Sicurezza)
ISPESL (Istituto Superiore Prevenzione e Sicurezza sul Lavoro).
In Europa tutti i generatori di vapore devono portare la marcatura CE (salvo nei casi in cui sussistano particolari esoneri). Detta marcatura attesta che il generatore di vapore è stato assoggettato ad una valutazione di conformità ai requisiti essenziali di sicurezza stabiliti dalla PED relativamente alla progettazione,ai materiali, alla costruzione alle prove e collaudi. E' da rimarcare che la PED non impone l'applicazione di una normativa particolare, l'unico vincolo è il rispetto dei requisiti essenziali di *sicurezza*.

-Progetto caldaia▼
►Ente accreditato▼
►Costruzione▼(lamiere,elettrodi)
►Personale (tecnici,saldatori)

E' opportuno precisare infatti che la rispondenza del progetto alla normativa è una condizione necessaria, ma non sufficiente, vale a dire che la stabilità, la disponibilità e conseguentemente la sicurezza dell' apparecchio sono assicurate dalla qualificazione dell'azienda e dalla professionalità dei tecnici operatori.
-I generatori di vapore, infatti, sono costruiti unendo insieme, mediante saldature elettriche i diversi elementi opportunamente predisposti.
-I materiali impiegati nella costruzione degli apparecchi a pressione(lamiere,tubi ecc.) devono essere di qualità e ammessi dagli Organismi Notificati.

-Il termine *caldaia* significa parte metallica che contiene acqua e vapore.
-Il termine *generatore* significa insieme di macchina funzionante cioè caldaia + bruciatore +
-accessori, ecc.

Ciclo di costruzione di caldaia a tubi da fumo (esempio semplificato)

- Formatura a caldo o a freddo delle piastre tubiere
- foratura secondo dime prestabilite delle piastre tubiere
- formatura dei giunti di dilatazione
- taglio e calandratura delle lamiere del fasciame esterno e del focolare
- preparazione dei cianfrini di saldatura
- assiemaggio delle virole mediante saldatura
- unione delle virole del fasciame e del focolare alle piastre tubiere
- montaggio accessori interni
- montaggio dei tronchetti flangiati al fasciame mediante saldatura
- esecuzione dei controlli non distruttivi (radiografico-ultrasuoni-liquidi penetranti magnetoscopico)*
- posa in opera del fascio tubiero

- mandrinatura dei tubi alle piastre mediante appropriata apparecchiatura per assicurare uniformi espansioni dei tubi anche in funzione di tolleranze prestabilite
- saldatura di tenuta dei tubi alla piastra tubiera
- montaggio accessori esterni
- verifiche e collaudi**

Saldature

zona terrmicamente alterata

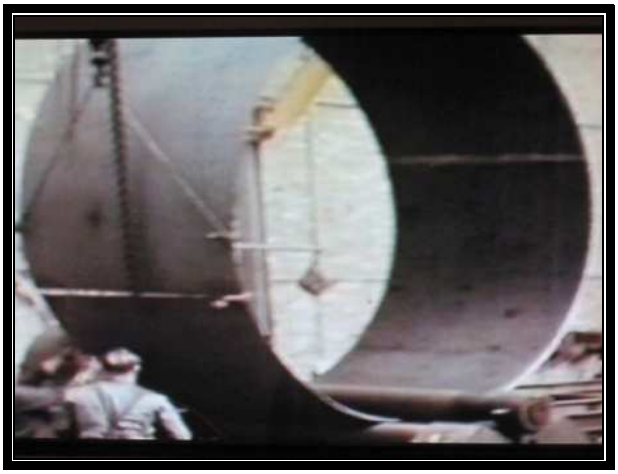
La zona a fianco delle saldature si dice *termicamente alterata*.*(la parte eccedente della saldatura non viene smerigliata)*
(*) (**)Esistono vari tipi di controllo delle saldature:

Liquidi penetranti, ci evidenziano una cricca affiorante ma non la profondità
Ultrasuoni,tramite un trasmettitore e un ricevitore, ci indica un'anomalia ma non l'entità
Magnetoscopica, anche in questo caso la limatura attirata in prossimità della cricca non ci indica la sua profondità.
Radiografica, i raggiX attraversano lo spessore della piastra e rilevano ogni minimo difetto. Al momento del collaudo, ancora presso il costruttore l'ISPESL controlla il 15% delle saldature, se da tale controllo dovesse risultare anche solo un difetto si procederà a radiografare un ulteriore 15% e se si dovesse trovare un altro difetto si controllerà il 100% delle saldature. Oltre all'iniziale 15% viene radiografato ogni incrocio di saldatura.

-Esistono tre tipi di passaggi o aperture di ispezione
Passo d'uomo:è quasi sempre ovale misura (30X40cm) *eccezionalmente tondo* (Ø38cm)
Passa testa: misura (20X25cm)
Passa mano: misura (10X15cm)

Lamiera pronta per la calandratura

Foro per passo d'uomo



Calandratura

Virola (insieme di lamiere saldate)

Virole + fondi } Fasciame

-*verifiche e collaudi*►prova idraulica: (consiste a 1,5 volte la pressione di bollo)

- applicazione del BOLLO con chiodi in rame del diametro Ø 10mm

esempi di BOLLO e targhetta CE

Verifiche

Le verifiche prescritte sono:

- ***visita interna***
- ***prova idraulica***
- ***prova a caldo*** *o di funzionamento*

-***Visita interna***: ogni due anni consiste nell'esame di tutte le parti del generatore, sia esterne che interne e dei suoi accessori. A tale scopo vanno rimossi il coperchio del passo d'uomo, quelli di eventuali portine di ispezione, nonché i portelloni delle camere a fumo. Il generatore va presentato pulito, esente da incrostazioni e depositi sia sul lato acqua-vapore che sul lato fumi. In occasione della prima visita interna si esegue il rilievo dei dati riguardanti gli accessori di sicurezza, di controllo e dei mezzi di alimentazione. La prima visita interna sul luogo dell'impianto deve accompagnare la prima prova idraulica; la seconda deve avere luogo entro un anno dalla prima prova a caldo. La prova a caldo e la visita interna verranno poi eseguite ad anni alterni.

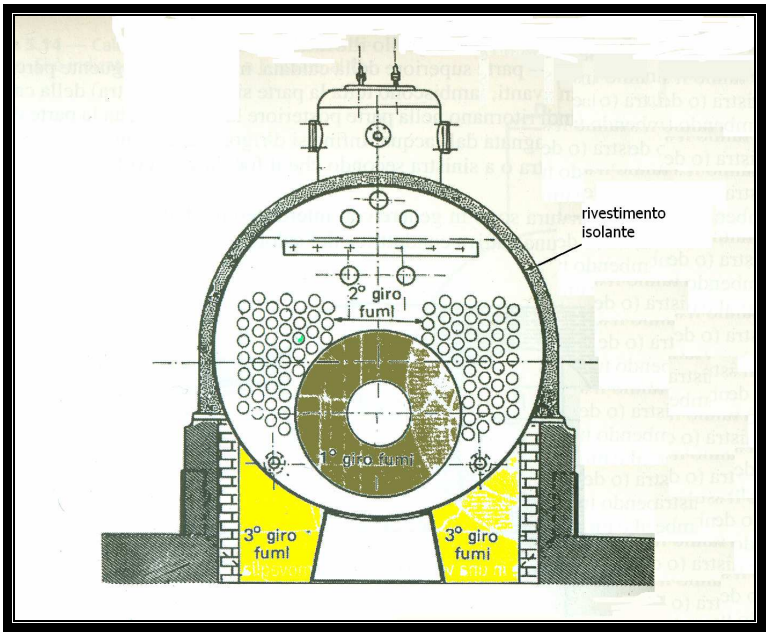
-***Prova idraulica***: ogni 10 anni, consiste nel sottoporre l'apparecchio a pressione idraulica. A tale scopo, il generatore, collegato ad una pompa viene portato ad una pressione non inferiore a quella di bollo, dopo averlo riempito d'acqua fredda e vuotato dalle sacche d'aria. La prova idraulica viene eseguita in occasione di nuovo impianto e come prima prova periodica a dieci anni dalla precedente e così di seguito dopo altri dieci anni. Il valore della pressione di prova è in funzione della *pressione*

di bollo ed è diverso se si tratta di nuovo impianto (1,5 volte) o di verifica periodica (1,25 volte); la pressione di prova viene mantenuta per tutto il tempo necessario all'ispezione del generatore in tutte le sue parti visibili ed accessibili. Durante la prova non devono verificarsi deformazioni o altre anomalie.

-***Prova a caldo***:ogni due anni e consiste nell'esame accurato del funzionamento del generatore e dei suoi accessori. La prima prova a caldo (o di nuovo impianto) segue la prova idraulica e rappresenta se positiva , l'atto conclusivo dei collaudi di legge. Le prove a caldo successive sono fatte, anche senza preavviso a intervalli di tempo non maggiori di due anni.

Note: da luglio 2012 i controlli li fanno gli enti accreditati

La caldaia Cornovaglia di terzo tipo a tubi da fumo

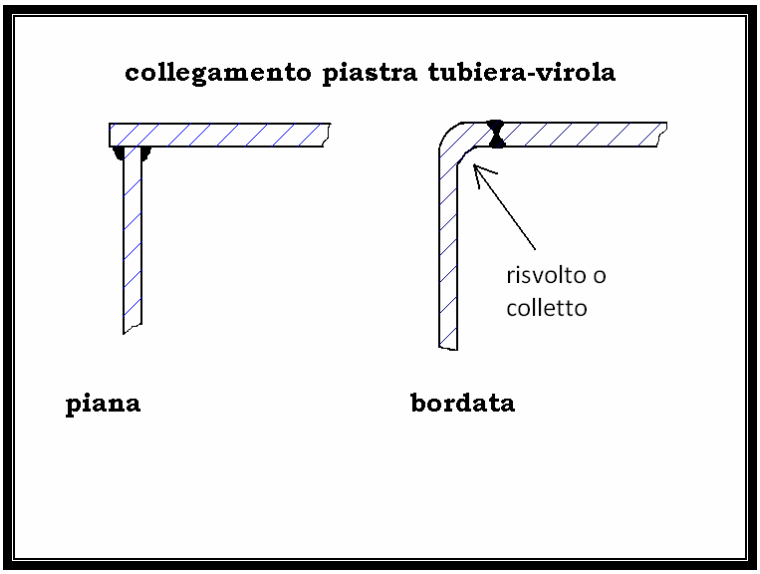


Caldaia Cornovaglia fissa a tubi da fumo (costruita fino agli anni 60)

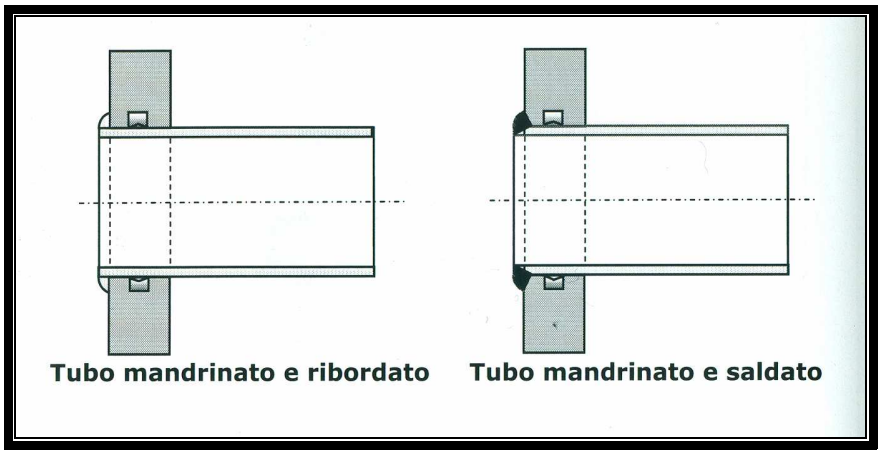
E' sostanzialmente identica alla Cornovaglia ma i fondi, oltre che dal focolare sono attraversati da una serie di tubi da fumo distribuiti attorno al focolare stesso, cosicché a parità di dimensioni risulta aumentata la superficie di riscaldamento.
I tubi da fumo hanno diametro solitamente di 50-70 mm e 3-4 mm di spessore. Sono innestati e mandrinati o saldati in fori praticati con trapano nelle piastre che fanno da fondi e che si chiamano appunto ***piastre tubiere***.
La caldaia è rivestita in muratura come una Cornovaglia (*nell' immagine sopra la muratura è limitata solo alla parte inferiore il resto è rivestito da un materiale isolante*)e i fumi vi fanno tre giri: attraverso il focolare (1° giro); ritorno sul davanti percorrendo i tubi (2° giro); si ripiegano in basso lambendo la zona inferiore del fasciame (3° giro) e quindi imboccano il camino.

Pressione: 15 ÷ 18 bar
Producibilità: 30 ÷ 35 kg/m²h
Generatore a medio volume d'acqua

Piastre tubiere

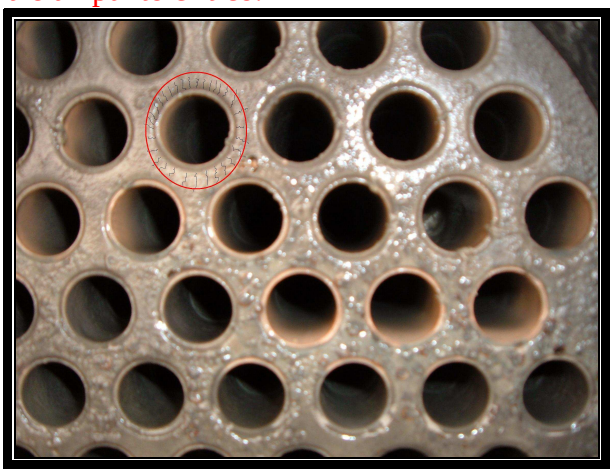


Esempi di collegamento tubo piastra con mandrinatura



I tubi da fumo hanno solitamente diametro 48-89mm e sono collegati alle piastre mediante mandrinatura, mediante saldatura o entrambe.

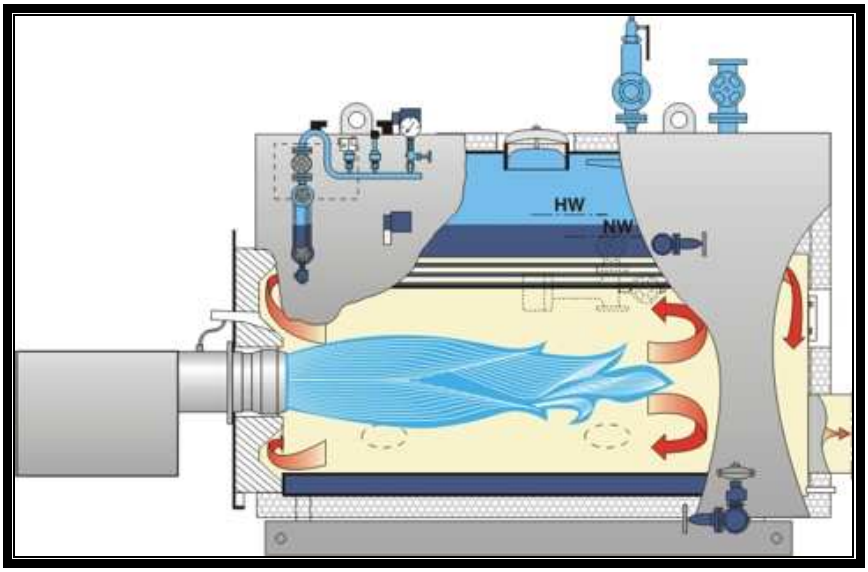
Il collegamento tubo piastra è un punto critico.



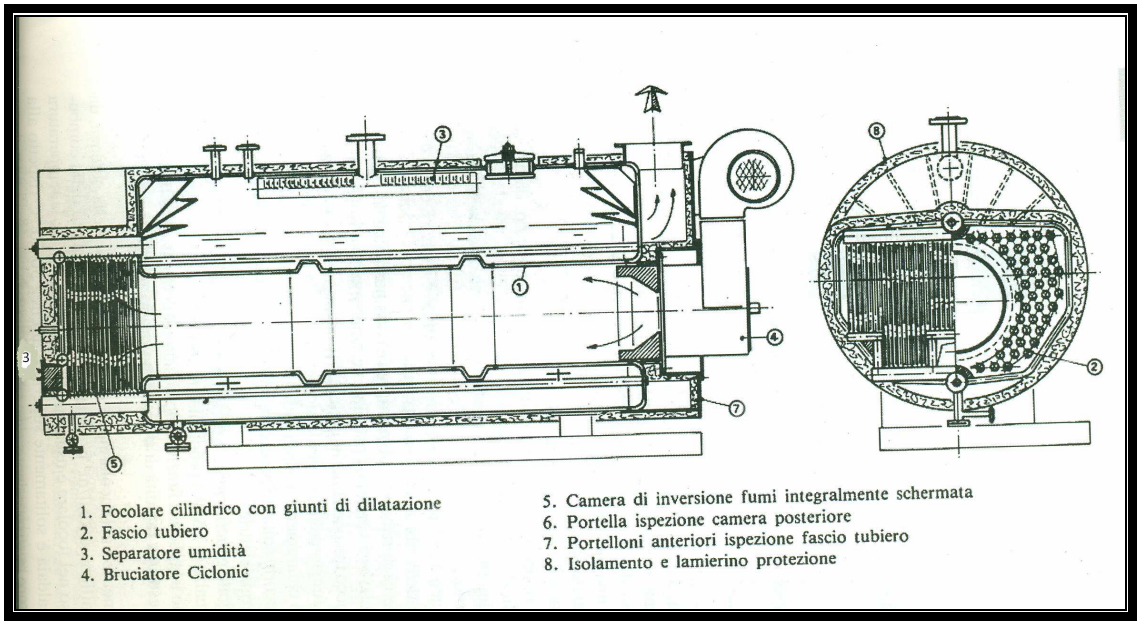
Il moderno generatore semifisso a tubi da fumo

Il generatore moderno è in pratica il risultato delle modifiche subite nel tempo dalla vecchia caldaia Cornovaglia.
Un generatore a tubi da fumo è essenzialmente costituito da un fasciame cilindrico, chiuso alle due estremità con piastre tubiere a cui è saldato il focolare(o due focolari). I tubi sono mandarinati alle piastre e a volte viene realizzato intorno a essi un cordoncino(saldatura) di tenuta.
-***Il bruciatore*** è posto sul davanti della caldaia; i gas caldi della combustione, dopo aver percorso il focolare (1° giro fumi), invertono il loro moto in una camera (*camera di inversione posteriore*) esterna alle membrature della caldaia e si immettono nel gruppo di tubi(2°giro fumi) posto nella parte bassa del generatore e giunti nella parte anteriore del generatore, i fumi subiscono una seconda inversione(*camera di inversione anteriore*) e imboccano i tubi nella parte alta della caldaia(3° giro di fumi), ritornando in una zona della camera posteriore(separata a mezzo di un diaframma da quella costituente la prima zona di inversione dei fumi), per dirigersi al camino.
I percorsi dei fumi possono essere *due* ovvero *tre* come nel caso descritto(*è il più frequente*), o più di tre.
-***Le camere di inversione*** sono costituite da una parte cilindrica, di solito il prolungamento del fasciame esterno, chiusa da una parete piana. Su tale parete vi sono in genere due portelloni, che a caldaia ferma permettono l'ispezione, la pulizia e la manutenzione.
-***Il focolare*** può essere di tipo ondulato(più costoso) o liscio; ha diametri generalmente da 400mm fino a 1200mm circa. I focolari lisci di solito vengono rinforzati per resistere alla pressione dall'esterno(lato acqua) mediante elementi ondulati o anelli.
Nelle unità di una certa potenza possono esistere due o più focolari.
-***Le piastre tubiere*** sono generalmente bordate e vengono saldate al fasciame e al focolare mediante saldatura di testa.
-***I tubi da fumo*** hanno solitamente diametro 48-89mm e sono collegati alle piastre mediante mandrinatura, mediante saldatura o entrambe. All' interno dei tubi, allo scopo di migliorare la trasmissione del calore possono essere sistemati elementi di varia forma (lamine metalliche detti *turbolatori*) per imprimere al fumo un moto turbolento e aumentare la trasmissione del calore.

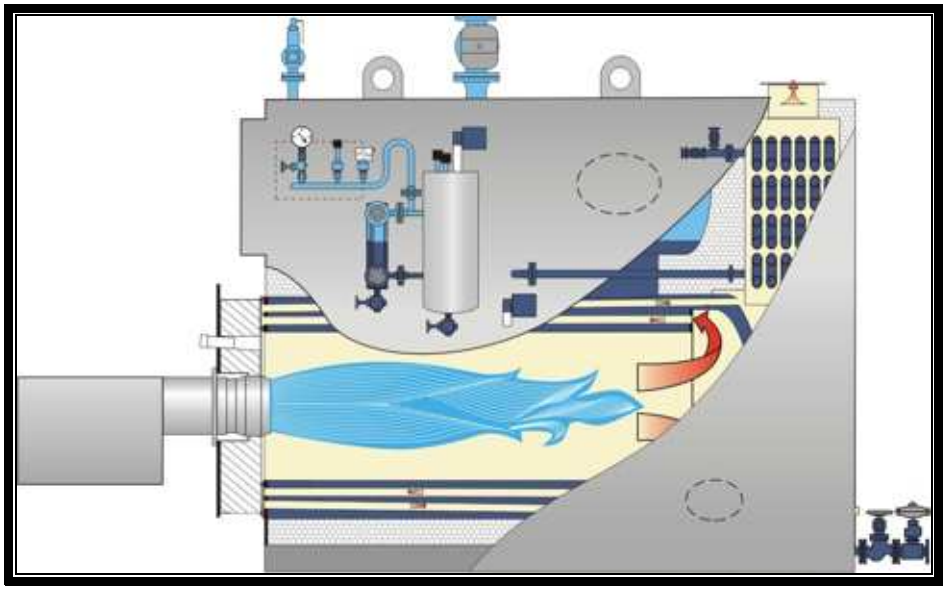
Esempi di camera d'inversione



Schema di generatore semifisso a tubi da fumo a fondo secco



Generatore a due giri di fumo con camera di inversione schermata



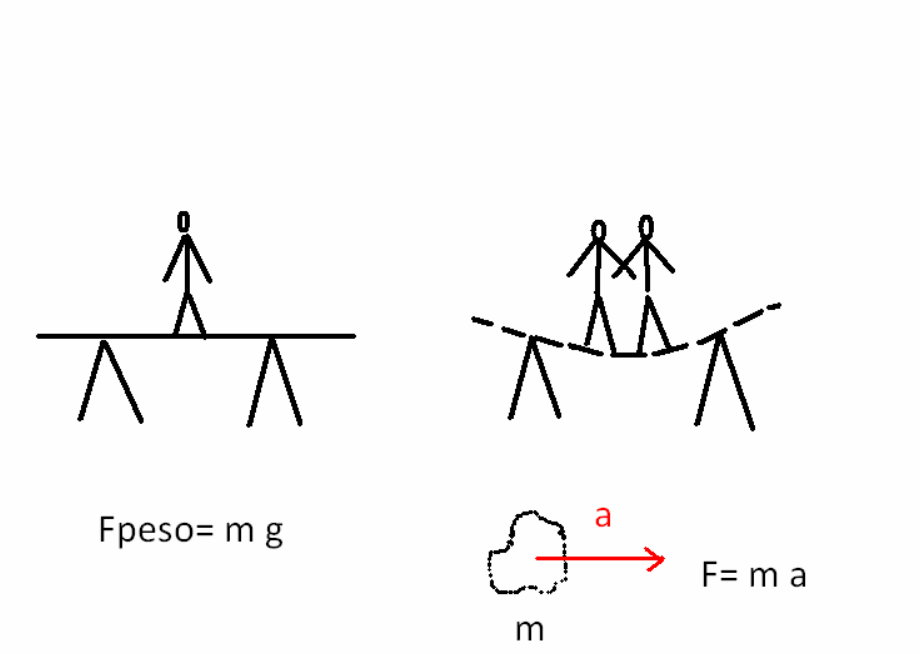
Schema di generatore semifisso a tubi da fumo a fondo bagnato (a fungo)

NOZIONI GENERALI

Forza, lavoro, potenza , energia

Forza

-Una forza è una causa, essa non si vede ma si vedono gli effetti..
E' la causa, qualunque essa sia, che può modificare lo stato di quiete o di moto di un corpo



Nel Sistema Internazionale (**SI**) l'unità di misura della forza è quella forza che imprime alla massa unitaria di un kilogrammo l'accelerazione unitaria di un metro al secondo per secondo ($kg \cdot m/s^2$)= N

Forza peso

La *forza peso* è una delle più importanti forze di tipo meccanico. Essa è caratterizzata dal fatto che la Terra esercita su tutti i corpi un'attrazione verso il centro. La forza peso chiamata comunemente *peso*, ha un'intensità proporzionale alla massa del corpo e la sua direzione coincide sempre con la verticale del luogo dove il corpo si trova, il verso è diretto sempre verso il centro della Terra, il suo punto di applicazione è in quel particolare punto del corpo chiamato *baricentro*.
La *forza-peso*, oltre che in newton può essere misurata nell'unità del Sistema Tecnico (**ST**), kilogrammoforza (kgf), che esprime la forza con cui la massa di 1 kg viene attirata dalla Terra (**g**=9,80665 m/s^2)

Forze (F)	
1 N (Newton) = 0,102 kgf	1 kgf = 9,81 N
1 daN = 1,02 kgf	1 kgf = 0,981 daN

Lavoro

In genere il concetto di *lavoro* comunemente inteso è associato a quello di forza e di spostamento. Analogamente viene definita in meccanica la grandezza lavoro (L)*
*La grandezza derivata lavoro nel **SI** è espressa con il simbolo **W**

Lavoro = Forza x spostamento →→→→→→→L=F·s↓
↓
J = N·m

Nel **SI** l'unità di lavoro è denominata joule(J),ed è il lavoro che compie la forza di 1 newton quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione e nel senso della forza.
Nel **ST** l'unità di lavoro è il kilogrammetro(kgf m) definito come il lavoro che compie una forza di 1 kilogrammoforza quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione e nel senso della forza.
Tra le due unità:
kilogrammetro e joule vale la stessa equivalenza esistente tra
kilogrammoforza e il newton

1kgf m = 9,80665 joule

Energia

Il principio di conservazione dell' energia afferma che: "*l'energia non si crea né si distrugge, solo si trasforma da una forma in un'altra*".
-Varie forme di energia (energia potenziale – energia cinetica – energia termica (calore) – energia chimica ecc.
L'energia è una grandezza omogenea con un lavoro e pertanto assume le unità proprie del **lavoro**.

J = N·m

Potenza

Il concetto di *lavoro* risulta indipendente dal *tempo*; infatti un lavoro può essere eseguito indifferentemente in un tempo (t) breve come in tempo lungo, ne deriva l'importanza di stabilire in quanto tempo un dato lavoro viene compiuto. Tale concetto di lavoro associato all'elemento tempo introduce in dinamica una nuova grandezza chiamata *potenza* (**P**), che viene definita come il rapporto del lavoro compiuto nell'unità di tempo:

P = L/t

Nel **SI** l'unità di potenza viene chiamata watt (**W**) e corrisponde al lavoro di 1 joule al secondo.
Nel **ST** è il kilogrammetro al secondo (kgf m/s)

1W(watt) = 1J/s→→→→1W= 0,101972 kgf m/s

altre trasformazioni

1 CV = 75kgf m/s = 75 · 9,80665 J/s = 735,5 W = 0,7355 kW

Essendo il watt un'unità molto piccola si usa molto spesso il suo multiplo il (kW) pari a 1000 W

MECCANICA DEI CORPI FLUIDI – STATICA DEI FLUIDI

La meccanica dei fluidi studia le condizioni di quiete e di moto dei fluidi con riferimento alle quali viene usualmente suddivisa in *statica dei fluidi* e *dinamica dei fluidi*.

Fluidi

I fluidi hanno molecole dotate di scarsissima coesione e libere di muoversi una rispetto all'altra, per questo a differenza dei solidi non hanno una forma propria; si distinguono in liquidi che hanno un volume proprio e in aeriformi che non hanno volume proprio.

Pressione

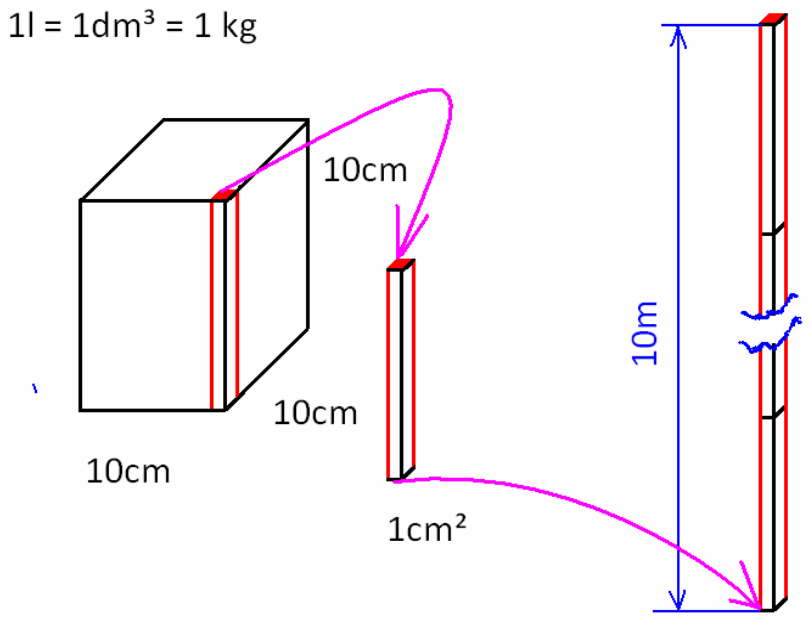
La *pressione* (**p**) è una delle grandezze fisiche più importanti e interviene costantemente nello studio del comportamento dei fluidi.
-Se si considera una *superficie* di area (**A**) e su di essa si applica una *forza* (**F**)normale a detta superficie e distribuita uniformemente su tutta la superficie presa in esame si può definire il rapporto:

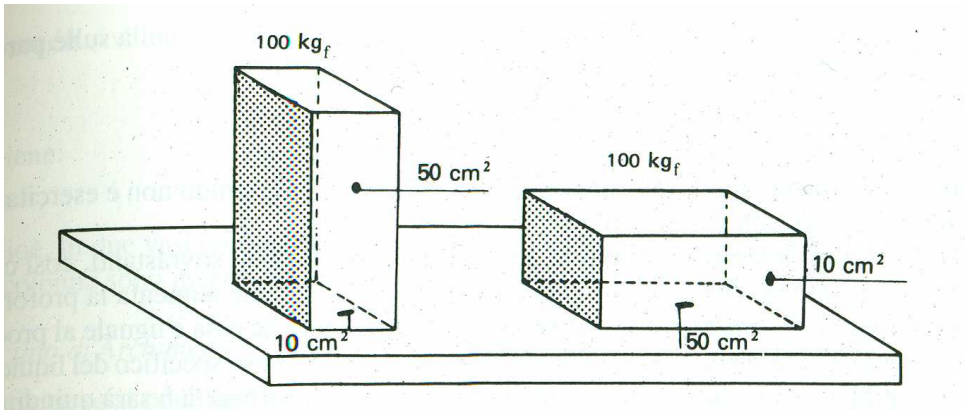
$$\mathbf{p = \frac{F}{A}}$$

Nel **SI** la pressione si misura in (N/m²) detto *pascal* (**Pa**) nella pratica però, essendo il pascal un'unità molto piccola viene usato il suo multiplo centomila volte più grande denominato **bar** (1 *bar* = 100.000 *Pa*)
Nel **ST** la pressione si misura in (kgf/m²) è tuttavia usato il (kgf/cm²) detto anche: *atmosfera tecnica* (**at**),per l'essere come unità di misura di valore molto prossimo al valore della pressione atmosferica al livello del mare, chiamata anche *atmosfera fisica* (**atm**). Da cui:

1 atm = 1,033 at = 1,033 kgf/cm² = 10.330 kgf/m² = 101.300 N/m² = 1,013 bar

1 kg/cm² ≈1 bar→→→→→→1 kg/cm² = 10m.c.a.(metri colonna d'acqua)





Uno stesso peso distribuito su superfici di diversa area determina pressioni diverse*

Nel caso il blocco sia appoggiato con la superficie più grande si avrà:

p= F/A = 100kgf/50cm² = 2kgf/cm² = 2 at ≈ 2 bar

nell'altro caso si avrà:

p= F/A = 100kgf/10cm² = 10kgf/cm² = 10 at ≈ 10 bar

Risulta evidente come a parità di forza applicata ***F*** la pressione ***p*** sia tanto maggiore quanto minore è l'area della superficie su cui agisce.

Pressione idrostatica (legge di Stevino)

In un recipiente pieno di liquido, se sulla superficie del liquido non è esercitata nessuna forza, su di essa non vi è pressione (*a prescindere da quella atmosferica*).
Ma sugli strati inferiori del liquido agisce il peso degli strati sovrastanti, così che la pressione nell'interno del liquido aumenta con l'aumentare della profondità.
Tale pressione (**p**) si chiama pressione idrostatica e si dimostra che essa è uguale al prodotto della profondità (**h**) altezza di colonna liquida sovrastante per il peso specifico del liquido(**γ**)

$$\mathbf{p = \gamma \cdot h}$$

La relazione che lega la pressione idrostatica al peso specifico e all'altezza della colonna liquida viene indicata come la *legge di Stevino*.

Note:

h = 1,83 m

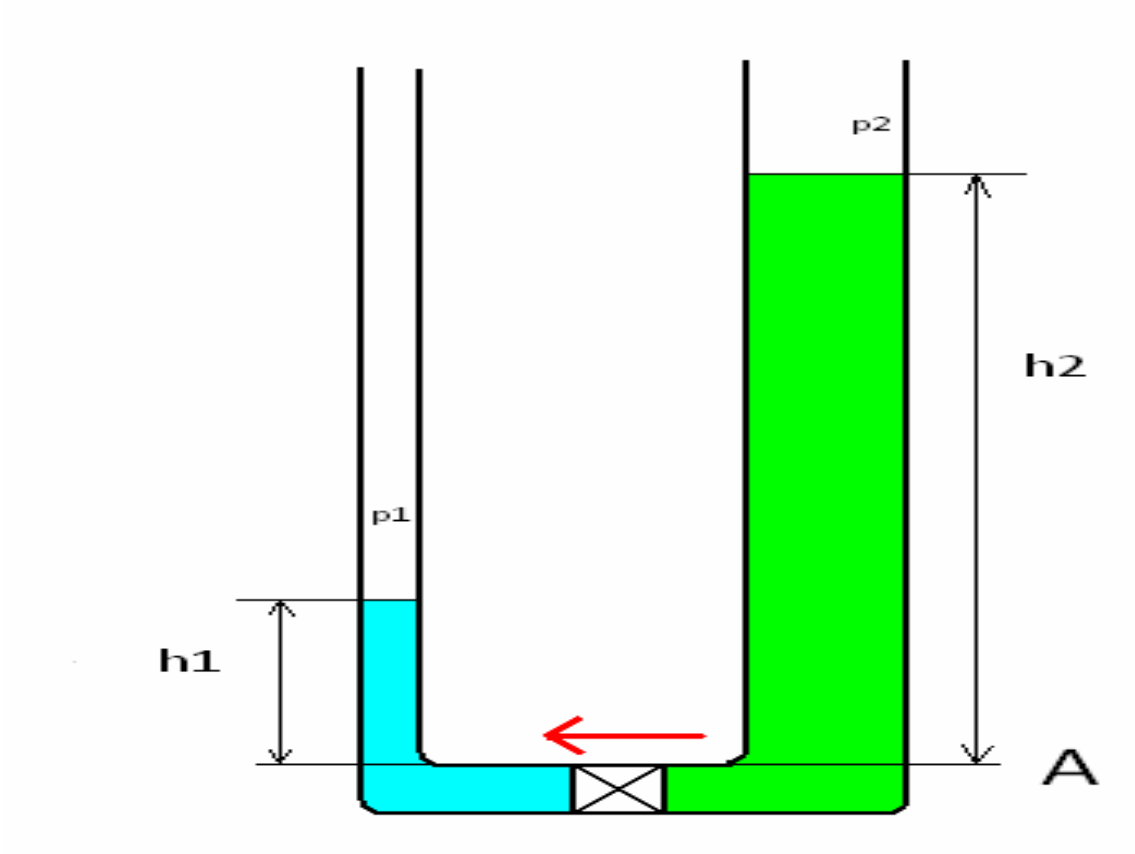
grandezza fisica

valore numerico

unità di misura

Principi di idraulica

-***Vasi comunicanti***



h2 > h1
p2 > p1

Un fluido si muove all'interno di una tubazione per differenza di pressione.

L'equilibrio di due liquidi posti in due differenti vasi tra loro comunicanti si stabilisce in relazione al peso specifico di detti liquidi.
Tali liquidi saranno in equilibrio quando:

$$p1 = p2$$

ed essendo

$$p1 = \gamma 1 \cdot h1 \qquad\qquad p2 = \gamma 2 \cdot h2$$

si ottiene:

$$h1/h2 = \gamma 2/\gamma 1$$

Cioè, in due vasi comunicanti due liquidi si fanno equilibrio quando le altezze delle loro colonne sono inversamente proporzionali ai rispettivi pesi specifici.

-*Pressione atmosferica (esperienza di Torricelli)*

L'aria ha come tutti i corpi, un suo peso e quindi esercita sulla superficie dei corpi una *pressione* detta *pressione atmosferica*. Tale valore lo si può determinare dall'*esperienza di Torricelli:*
-si prende un tubo di vetro chiuso a una estremità(*canna barometrica*) lungo circa un metro e lo si riempie completamente di mercurio(**Hg**); tenendo chiusa con un dito l'estremità aperta lo si capovolge immergendolo in una bacinella piena anch'essa di mercurio, ed invece di vedere il mercurio scendere fino a raggiungere lo stesso livello della bacinella, al contrario si osserva che esso si arresta ad un livello di circa 760 mm superiore al livello di mercurio nella bacinella.
Ciò si spiega osservando che mentre sul mercurio della bacinella si esercita la pressione atmosferica, sul mercurio internamente al tubo c'è il vuoto non essendovi potuta entrare l'aria.
Tale altezza rappresenta una misura della pressione atmosferica.
Applicando la legge di Stevino:

Note:
ρ = (ro) →densità o massa volumica
g = acc. di gravità
h = altezza

Mercurio (Hg)

$$p_{atm} = \gamma_{Hg}\, h = \rho_{Hg}\, g\, h$$

$$\rho_{Hg} = 13.596\ kg/m^3$$
$$g = 9{,}80665\ m/s^2$$
$$h = 760\ mm = 0{,}76\ m$$

$$13.596 \cdot 9{,}80665 \cdot 0{,}76 = 101.332\ N/m^2 = 101.332\ Pa = 1{,}013\ bar$$

essendo 1kgf = 9,80665 N si ha:

$$p_{atm} = \frac{101.332 N/m^2}{9{,}80665 N/kgf} = 10.333\ kg/m^2 = 1{,}033\ kgf/cm^2 = 1{,}033\ ata = 1\ atm$$

Acqua (H_2O)

$$p_{atm} = \gamma_{H2O}\, h = \rho_{H2O}\, g\, h$$

$$\rho_{H2O} = 1.000\ kg/m^3$$
$$g = 9{,}80665\ m/s^2$$
$$h = 10.330\ mm = 10{,}33\ m$$

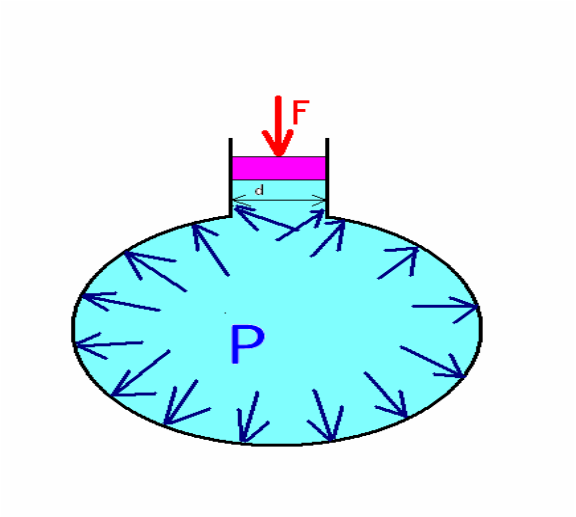
$$p_{atm} = 1{,}0 \cdot 9{,}80665 \cdot 10{,}33 = 101.302\ Pa = 1{,}013\ bar$$

1 kg/cm² = 1 atm = 0,981 bar
1 daN/cm² = 1 bar = 1,02 kg/cm²

Principio di Pascal

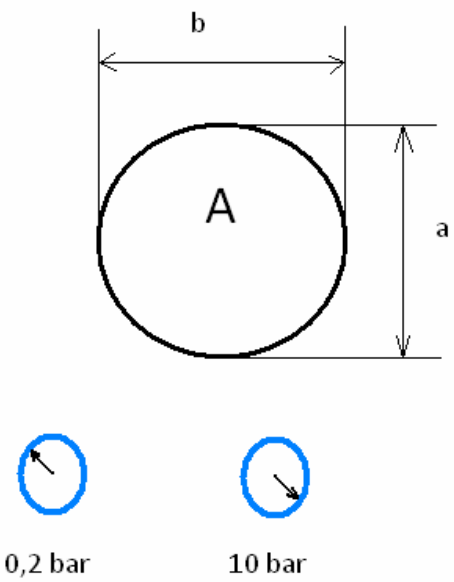
$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$p = \frac{F}{A}$$



La pressione applicata ad un recipiente la ritrovo su tutta la superficie dello stesso (con qualsiasi forma del recipiente) e anche all' interno del fluido in esso contenuto.

Esempio relativo al passo d'uomo (semplificazione)



a = 30 cm
b = 40 cm
A = 30 · 40 = 1200 cm²

p = F/A→→→F = p · A

caso 0,2 bar
F = p · A = 0,2 · 1.200 = 240daN

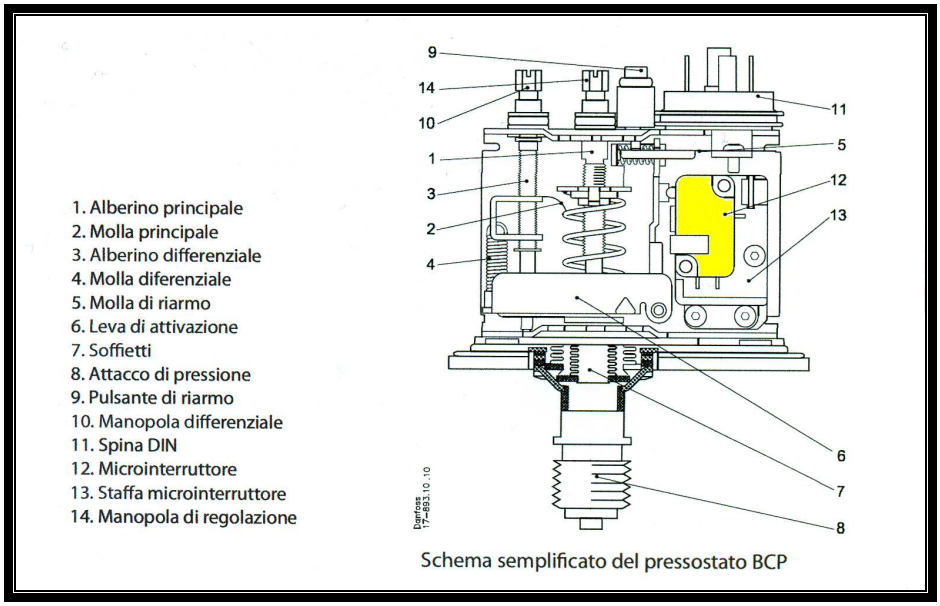
caso 10 bar
F = p · A = 10 · 1.200 = 12.000daN

ACCESSORI DI PROTEZIONE

Gli *accessori di protezione* non si possono considerare accessori di sicurezza positiva, in quanto il loro funzionamento richiede l'apporto di energia meccanica, pneumatica, elettrica ecc.

Pressostati di regolazione

I *pressostati di regolazione* sono dispositivi che servono a controllare la pressione nel generatore, o meglio, a mantenere la pressione nel generatore entro due valori (massimo e minimo) determinati e prefissati.
-Il pressostato provvede a spegnere il bruciatore quando il generatore raggiunge una certa pressione (*massima pressione d'esercizio*) e a riaccenderlo quando la pressione scende a un altro valore prefissato (*minima pressione d'esercizio*).
Per esempio, avendo una caldaia con pressione di bollo di 10 bar (1MPa), il *pressostato* può essere tarato in modo che il bruciatore venga spento a 7,5 bar e riacceso a 7 bar circa



Schema semplificato del pressostato BCP

Il pressostato spegne e accende il bruciatore mediante un elemento di manovra, la *valvola elettromagnetica* (o *valvola a solenoide*) e questa apre o chiude il passaggio del combustibile al bruciatore.

Pressostato di sicurezza o di blocco

Accanto al pressostato di regolazione, che come si è visto, comanda il funzionamento del bruciatore, esiste quasi sempre il *pressostato di sicurezza o di blocco*(*limite o di massima*), con compiti esclusivamente di sicurezza. Esso viene tarato a una pressione superiore a quella massima del pressostato di regolazione, ma sempre inferiore a quella di sfioro delle valvole di sicurezza.
-Il *pressostato di sicurezza* interviene in caso di avaria del pressostato di regolazione; il bruciatore viene così spento e mandato in blocco. La riaccensione del bruciatore avviene soltanto dopo aver eliminato la causa del blocco e con un successivo riarmo manuale del dispositivo di blocco.

ACCESSORI DI OSSERVAZIONE

Manometri

-*I manometri* sono apparecchi che servono a misurare e indicare la pressione relativa esistente all'interno del generatore; in genere sono metallici e principalmente del tipo Bourdon o del tipo Shaeffer.
-Il regolamento vigente prescrive che ogni generatore deve essere provvisto di un manometro posto in modo tale da essere facilmente letto.
-Il manometro deve essere provvisto di una scala graduata in [kg/cm²; ate; bar; MPa]
esempi:
1 bar = 100.000 Pa
1 bar = 0,1 MPa
1 MPa = 1.000.000 Pa
8 bar = 0,8 MPa
15 bar = 1,5 MPa

-Il *fondo scala del manometro* deve spingersi sino a un valore di pressione non inferiore ad 1,25 volte ma non superiore a 2 volte la pressione di bollo.
-Possono anche essere usati manometri unificati il cui fondo scala può essere determinato in base alla corrispondenza fissata nella tabella (vedi sotto).

Corrispondenza tra la pressione di bollo e il fondo scala del manometro		
Pressione di bollo	**Fondo scala manometro**	
bar	**bar**	**MPa**
<0,50	0,60	0,06
0,50÷0,80	1,00	0,1
0,80÷1,30	1,60	0,16
1,30÷2,00	2,50	0,25
2,00÷3,20	4,00	0,4
3,20÷4,80	6,00	0,6
4,80÷8,00	10,00	1
8,00÷12,80	16,00	1,6
12,80÷20,00	25,00	2,5
20,00÷32,00	40,00	4,0
32,00÷50,00	63,00	6,3
50,00÷80,00	100,00	10
80,00÷128,00	160,00	16
128,00÷200,00	250,00	25
200,00÷320,00	400,00	40
320,00÷500,00	630,00	63
500,00÷800,00	1000,00	100

Esempio:

Pressione di bollo = 12 bar

Fondo scala min.= 12 · 1,25 = 15 bar **Fondo scala max.= 12 · 2 = 24 bar**

-Sul manometro deve essere indicata con segno facilmente visibile (esempio segno rosso) la pressione di bollo.
-Il manometro non va applicato direttamente al generatore perché l'alta temperatura del vapore non ne permetterebbe la buona conservazione e il buon funzionamento.
-Tra il manometro e il generatore viene montato un tubo a sifone (ricciolo) dove il vapore ha modo di condensarsi è così l'acqua fredda a venire a contatto con gli organi sensibili del manometro.
-Il Regolamento prescrive pure che tra il manometro e il generatore sia inserita una valvola a tre vie o "*rubinetto di intercettazione*" questa valvola sia provvista di una appendice intercettabile con un disco piano di 40mm di diametro e 4mm di spessore (briglia di controllo) per l'applicazione del *manometro di controllo* o *manometro campione*; se necessario, per elevato valore di pressione l'appendice a disco può essere sostituita da un attacco filettato da 1/2".

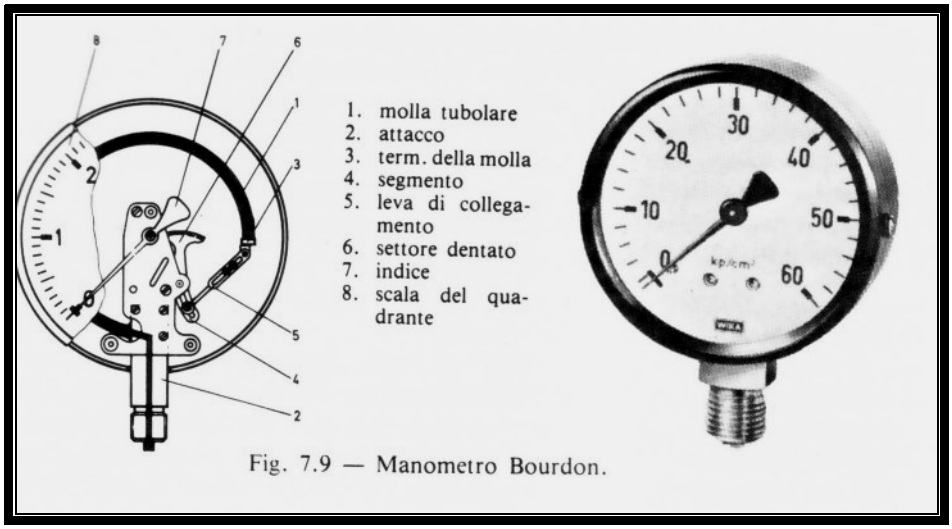
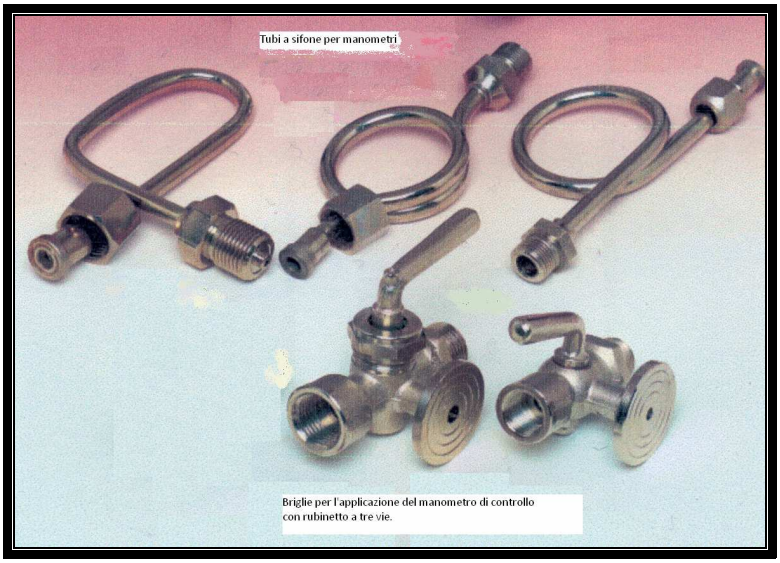


Fig. 7.9 — Manometro Bourdon.



Tubi a sifone e briglie per l'applicazione del manometro di controllo con rubinetto a tre vie

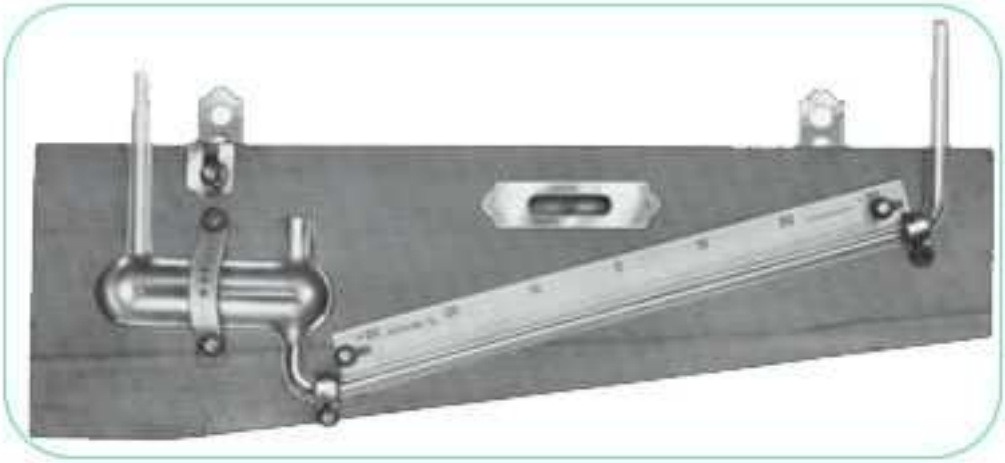
Riepilogando:
-I manometri vanno montati solo sul lato vapore
-Devono essere dotati di una valvola a tre vie (per lo spurgo del manometro o del tubo a sifone oltre all'applicazione del manometro campione o normale funzionamento).
-***In centrale deve esserci un manometro di riserva***.

-Il manometro deve essere obbligatoriamente di **classe 1** (cioè ha un limite di tolleranza di 1% errore riferito al fondo scala del manometro).Tolleranza +1% e -0,5% rispetto al manometro campione.

-*Domanda*:
Come fai a sapere che pressione hai in caldaia, se il tuo manometro si è rotto ed era quello di riserva, quindi non ne hai altri?
-*Risposta*:
Prendendo la temperatura del vapore dallo spurgo del livello visivo e confrontandolo la temperatura misurata con la tabella del vapore saturo.(da verificare se vera)

Pressodeprimometri

Sono strumenti molto semplici e servono per misurare pressioni o depressioni di basso valore. Trovano impiego per misure nei vari punti dell'impianto (camera di combustione, condotti del fumo, base del camino).
Nella forma più semplice, un deprimometro è costituito da un tubo di vetro piegato a U, fissato ad una tavoletta che porta una scala graduata in millimetri.



MICROMANOMETRO O DEPRIMOMETRO A TUBO INCLINATO

Manometro differenziale il cui ramo di misura è disposto secondo un angolo stabilito rispetto alla verticale. Questo accorgimento fa si che la colonna idrostatica equivalente alla pressione misurata, venga distribuita su una scala di lunghezza moltiplicata per un fattore di amplificazione dovuto all'angolo di inclinazione. La precisione di misura risulta pertanto incrementata in proporzione. Questi strumenti vengono costruiti in vetro PYREX e montati su tavola di legno o plancia metallica.

LA PORTATA

La portata è la quantità di fluido che attraversa una determinata sezione in un determinato tempo.
In altre parole la portata è il rapporto tra il volume che passa e il tempo impiegato a passare.

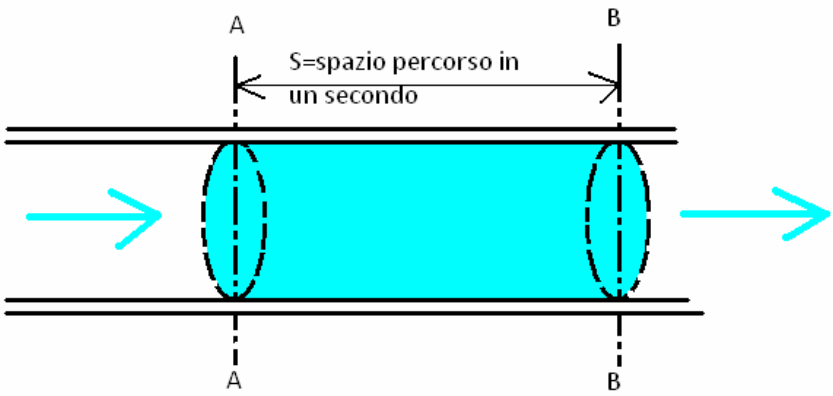
→*Portata volumetrica* = $\frac{\textbf{volume}}{\textbf{tempo}}$ → **Q**

→*Portata massica* = $\frac{\textbf{massa}}{\textbf{tempo}}$ → **ṁ** (**ṁ**) simbolo di portata massica

in generale portata →→→Q→ V

$$Q = \frac{l}{sec} \rightarrow \frac{1}{min} \rightarrow \frac{m^3}{h}$$

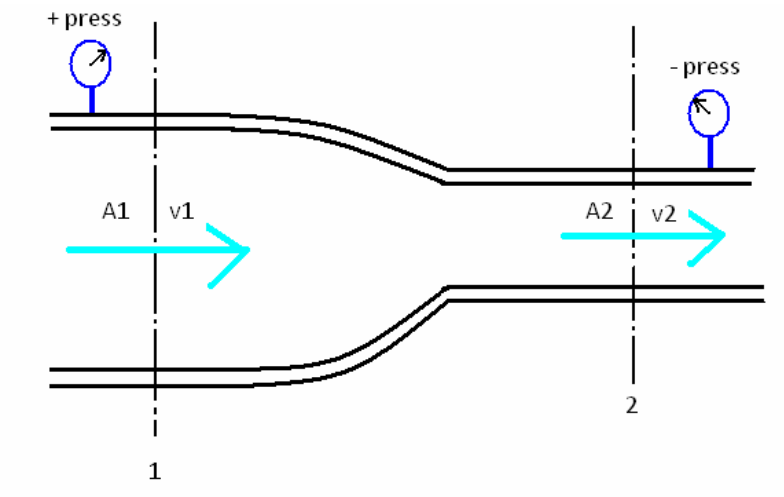
$$\dot{m} = \frac{kg}{h}$$



Q = A · v
[m³/s] [m²] [m/s]

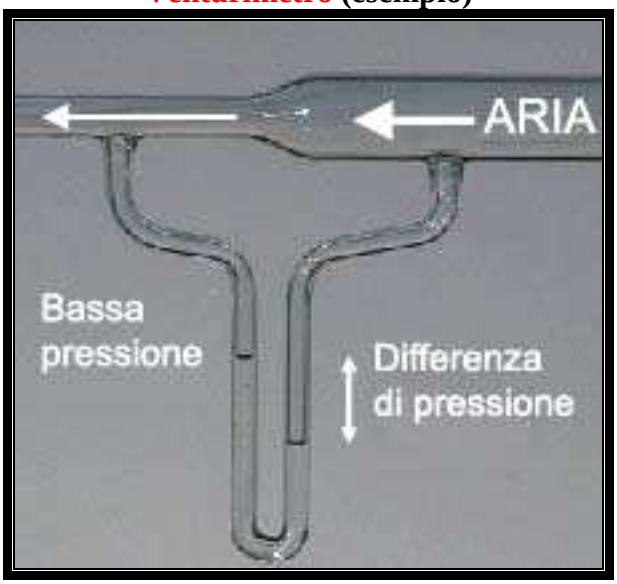
Fra la portata (Q) e la velocità (v) rapporto fra lo spazio e il tempo impiegato per percorrerlo esiste una relazione; ricordiamo innanzitutto le grandezze coinvolte nella determinazione della portata:
V= A · S (Volume = sezione interna del tubo x spazio percorso dalla sezione AA)
Q= V/T (Portata = Volume/tempo
ma se V = A · S allora possiamo anche scrivere:
Q= A · S/T (Portata = sezione interna x Spazio percorso dalla sezioneAA/tempo;
a questo punto notiamo che il rapporto S/T contenuto nella precedente relazione, altro non è che una velocità (v). Possiamo allora dire che:
Q= A · v (Portata = Sezione interna del tubo x velocità dell'acqua.
Ciò rende evidente il fatto che quando è costante la portata (sappiamo come questa sia costante lungo tutta la condotta qualsiasi ne sia la forma e le dimensioni) allora la velocità dell'acqua cambia in modo inversamente proporzionale: se il tubo si restringe, la velocità aumenta, se il tubo si allarga diminuisce.

EQUAZIONE DI CONTINUITA'



$$Q1 = Q2$$
$$A1 \cdot v1 = A2 \cdot v2$$
$$A1 > A2$$
$$v1 < v2$$

Venturimetro (esempio)



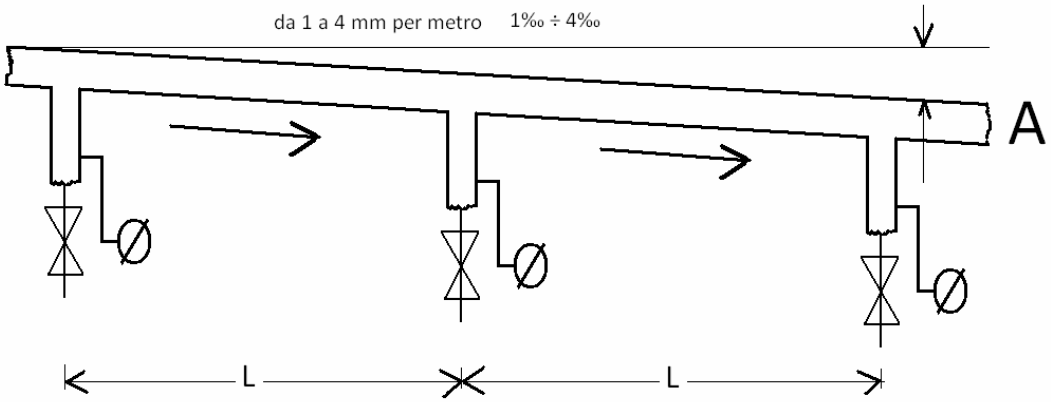
Il **venturimetro** o **tubo di Venturi** è uno strumento che serve a misurare la *portata* di una condotta. Questo strumento sfrutta l'effetto Venturi e prende il nome proprio dal fisico *Giovanni Battista Venturi*. Esso, infatti, calcola la *velocità* media del fluido partendo dalla relazione esistente tra questa grandezza e la pressione (illustrata dall'effetto Venturi). Dalla velocità è poi facile calcolare la *portata* volumetrica, essendo legate dalla relazione:

$$Q = A \cdot v$$

Il venturimetro si compone anche di un manometro differenziale, che misura la differenza di pressione prima del tratto convergente e subito dopo, cioè nella sezione contratta della condotta.

LINEA DI DISTRIBUZIONE DEL VAPORE

-La ***linea di distribuzione del vapore*** e la linea di recupero delle condense costituiscono, con il generatore di vapore con gli apparecchi utilizzatori,l'impianto termico completo.
E' molto importante che il calore contenuto nel vapore prodotto dal generatore raggiunga gli utilizzatori diminuito del minimo possibile e che il calore residuo contenuto nelle condense sia riutilizzato.(Le tubazioni sono perciò ben coibentate)
-E' IMPORTANTE ricordare che in un impianto conta il rendimento complessivo, non solo quello del generatore. Ad esempio, anche se il generatore raggiunge un rendimento termico(η_g) del 95%, la distribuzione del vapore ha un rendimento(η_d) dell'80% e gli utilizzatori un rendimento(η_u) pure dell'80%, il *rendimento complessivo*(η_{tot}) è dato dal prodotto:
$\eta_{tot} = \eta_g \cdot \eta_d \cdot \eta_u = 0{,}95 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 = 0{,}608$; le eventuali perdite sulla linea di ritorno condensa peggiorano ulteriormente la resa.
-Per facilitare l'affluenza della condensa agli scaricatori, devono essere previste una pendenza delle tubazioni nel senso del flusso del vapore (da 1 a 4 mm per metro di tubazione) e tasche di raccolta a pieno diametro per ogni punto di drenaggio.



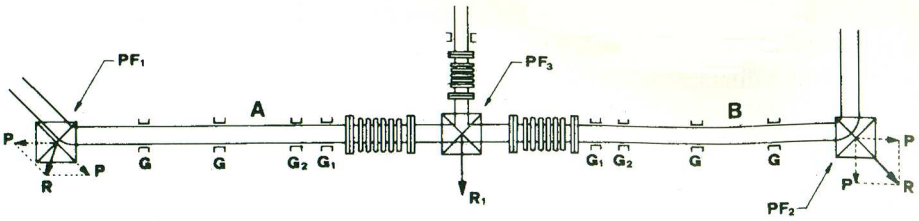
Tale pendenza delle tubazioni potrà essere garantita solo se l'impianto sarà progettato prevedendo la neutralizzazione delle *dilatazioni termiche* che provocherebbero distorsioni e disassamenti; da qui la necessità di installare, specie per le tubazioni di grande diametro e per lunghi tratti rettilinei dei *giunti di dilatazione*.

Giunto di dilatazione assiale con attacchi flangiati

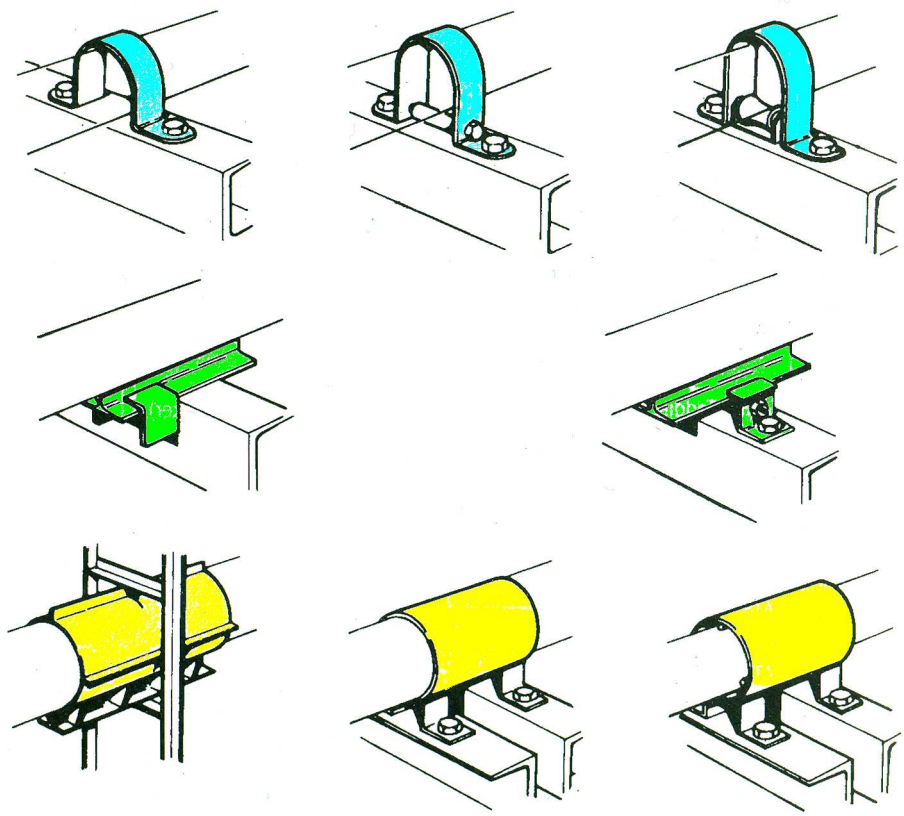
Giunto di dilatazione assiale con attacchi a saldare

Con giunti a dilatazione assiale, si divide la rete in tratti alle cui estremità vengono applicati degli ancoraggi (punti fissi principali) che sopportano le risultanti delle spinte di pressione e di compressione dei giunti. All'interno dei tratti in cui è stata suddivisa la rete, si considerano punti fissi intermedi quelli che sopportano i soli sforzi dei giunti di dilatazione. La sopportazione è poi completata da adeguate guide di scorrimento.

Esempi di guide

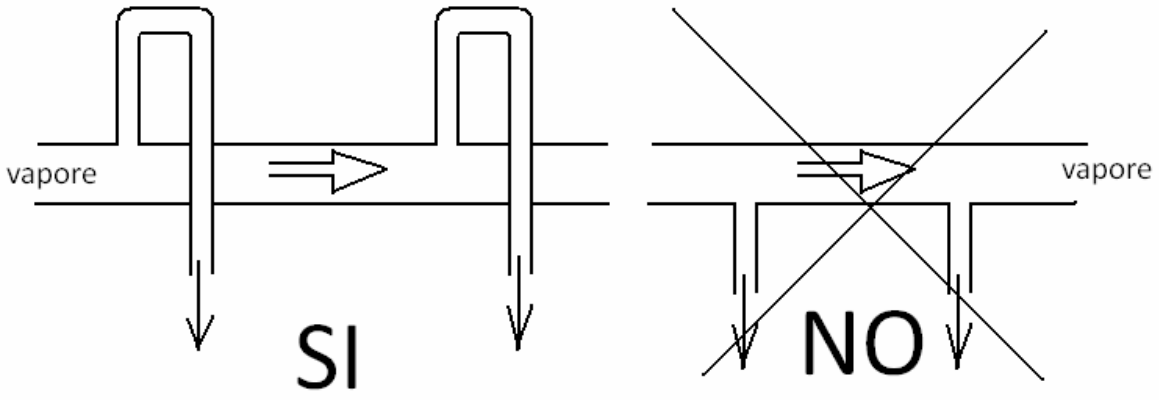


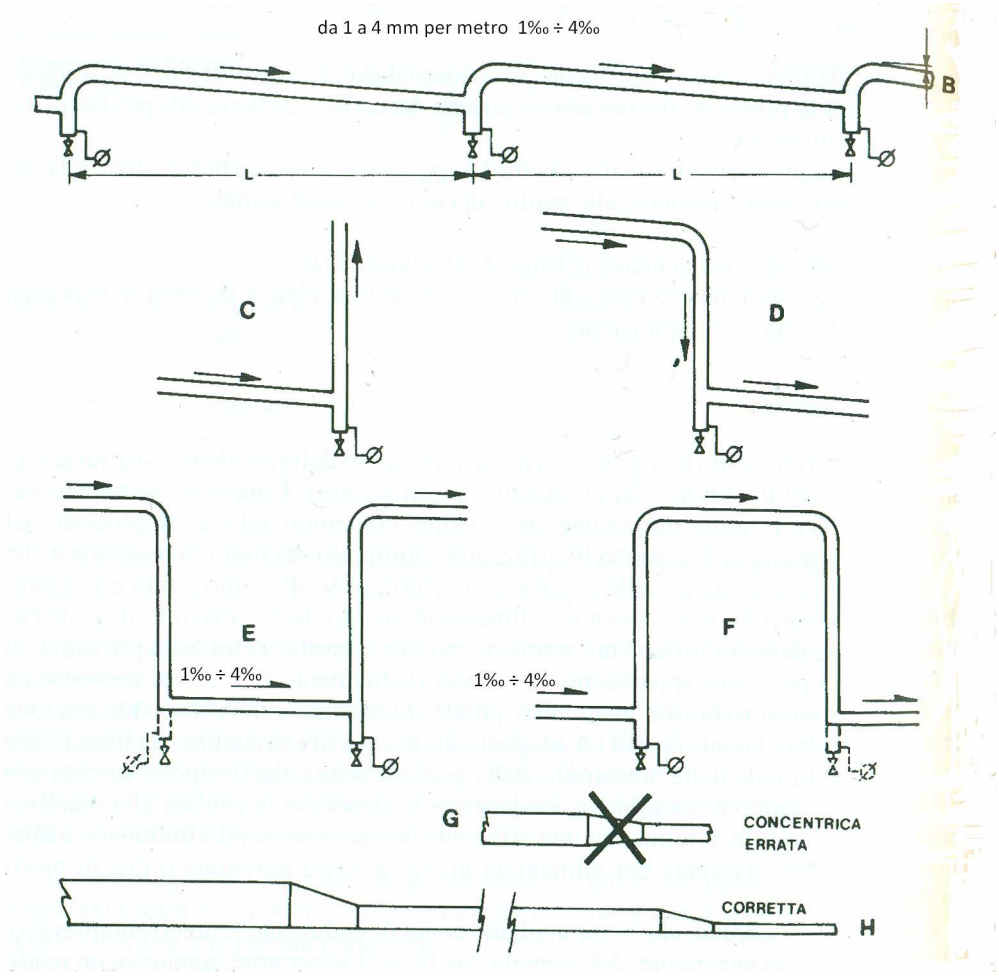
— Schema di installazione tipica di giunti di dilatazione assiale. Si notino i punti fissi PF_1 – PF_2 – PF_3 e le guide di scorrimento G di cui le G_1 e le G_2 ravvicinate.



Il *drenaggio* delle linee, cioè l'asportazione della parte liquida , viene effettuato con scaricatori di condensa installati, oltre che sui collettori di distribuzione, lungo le tubazioni a una distanza di circa 30-40 m, applicati in corrispondenza di tasche di raccolta a pieno diametro; inoltre alla base di risalite,di diramazioni, di terminali di linea, a monte di grossi utilizzi o riduttori di pressione, su separatori di condensa.
Il drenaggio delle linee previene anche il temibilissimo **colpo d'ariete**, urto violento di condensa trascinata dal vapore contro un ostacolo (valvola, curva, filtro ecc.) il quale oltre ad essere fastidioso, può provocare rotture di organi contro cui si infrange l'onda di condensa, con

conseguenze a volte disastrose (si tenga conto che la velocità a cui si verifica il colpo d'ariete può essere dell'ordine dei 100-120km/h.

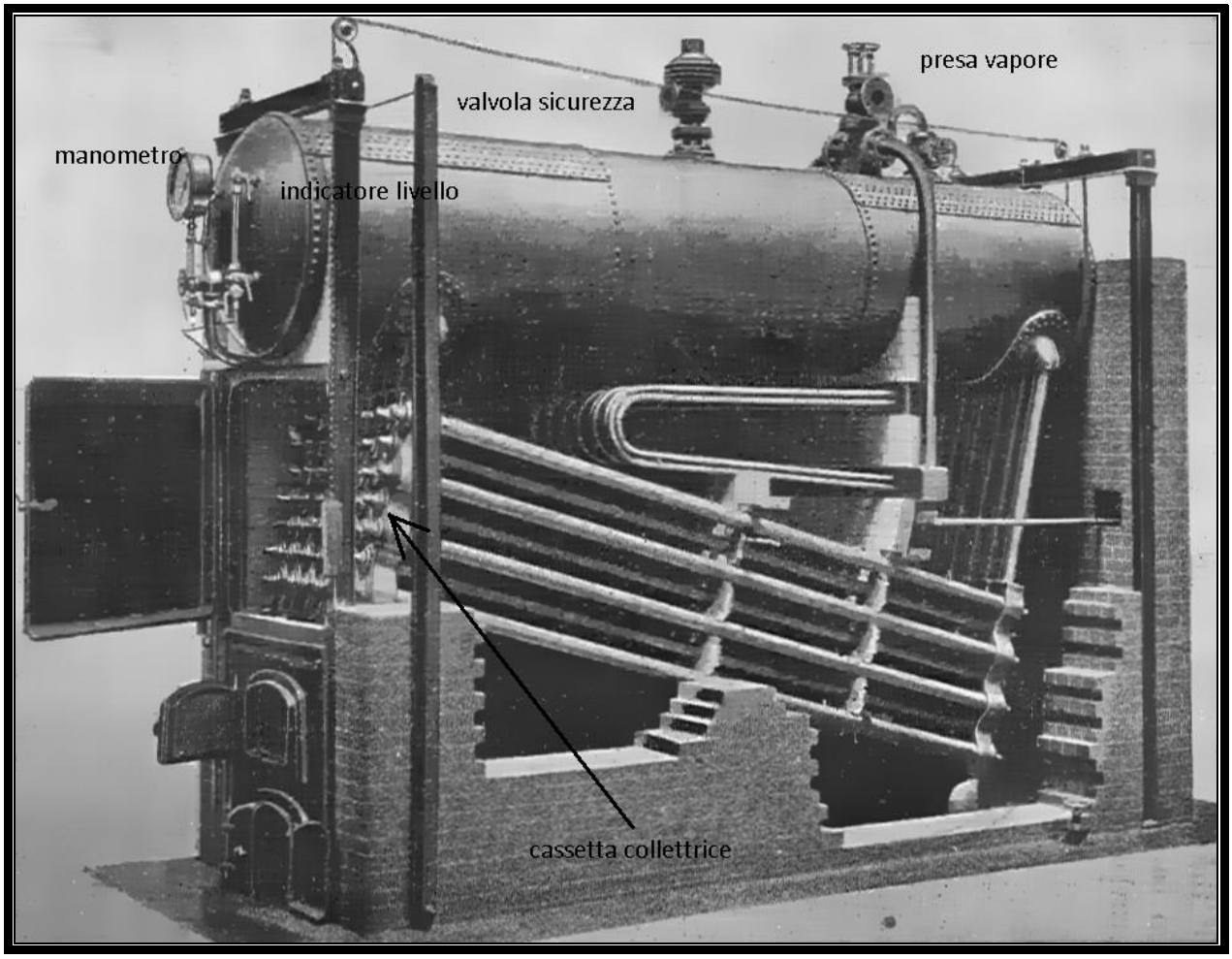




Schemi di tubazioni trasporto vapore (pendenze-drenaggi-riduzioni).
Si notino i pozzetti di raccolta condensa a pieno diametro

Linee di distribuzione del vapore con relativa coibentazione

GENERATORI A TUBI D'ACQUA



Caldaia Babcock & Wilcox, con surriscaldatore di vapore

I generatori a tubi d'acqua trovarono applicazione agli inizi del secolo scorso e da allora hanno avuto larga diffusione.
-Questi generatori sono caratterizzati dall'avere un minor volume d'acqua, a parità di superficie riscaldamento (rispetto al tipo Cornovaglia e derivati).
→*I vantaggi di questi generatori sono*:

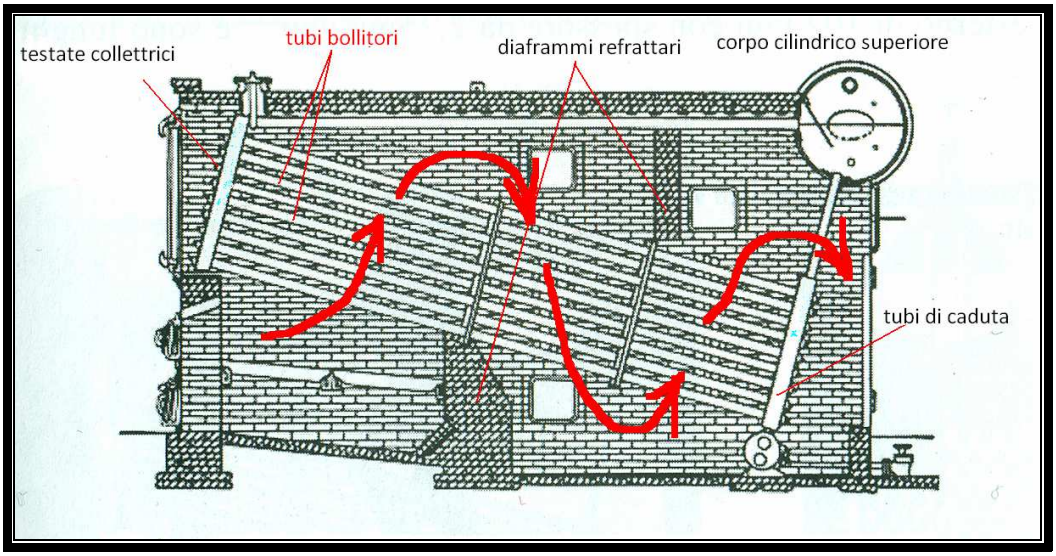
- idoneità a resistere ad alte pressioni
- maggiore produzione specifica di vapore (da30-50 sino oltre 100kg/m²h)
- rendimento termico fra i più elevati (se ben progettati e corredati con apparecchiature di regolazione e di recupero).
- minore pericolosità (per la minore quantità di acqua contenuta).
- buona ispezionabilità (agevole manutenzione e riparazione)
- minore ingombro a pari potenza
- idoneità a essere costruiti per elevatissima potenza

Per contro, data la limitata quantità di acqua contenuta, queste caldaie sono più sensibili alle variazioni di richiesta di vapore.

Generatori Babcock & Wilcox

Il prototipo delle caldaie multitubolari è quello che va sotto il nome della ditta inglese *Babcock & Wilcox* che ne iniziò la costruzione nel 1867.
Ora questo modello non viene più costruito ma ne esistono ancora modelli funzionanti.
-breve descrizione per una migliore comprensione dei moderni generatori a tubi d'acqua da esso derivati.
La caldaia B.W. è costituita da un *corpo cilindrico orizzontale* e da un *fascio di tubi vaporizzatori* inclinati, riuniti alle estremità da *testate collettrici*.
Le testate collettrici sono collegate con *tubi*,detti *di circolazione*, al corpo cilindrico superiore. Tra il fascio dei tubi vaporizzatori ed il corpo cilindrico superiore trova posto talvolta il *surriscaldatore*.
Il corpo cilindrico (costituito da più lamiere chiodate o saldate fra loro) è chiuso da due fondi convessi e funziona da serbatoio separatore d'acqua e di vapore; porta sul davanti, gli indicatori di livello, il manometro e spesso il tubo di alimentazione.
Sul fondo posteriore è praticato il passo d'uomo per la pulizia ed ispezione.
Sul dorso del corpo cilindrico sono montate le valvole di sicurezza(talvolta il tubo di alimentazione) e la presa vapore.
Il corpo cilindrico non ha duomo di vapore; il vapore viene fatto passare attraverso una serie di intagli praticati sulla parte superiore di un tronco di tubo orizzontale, chiuso alle estremità, posto nella parte alta della camera del vapore e collegato con la presa vapore.
I tubi del fascio vaporizzatore sono di acciaio senza saldatura;(lunghi da 4 a 6m)
Le testate collettrici nelle quali i tubi sono mandrinati sono a sezione quadrata, di forma ondulata e per effetto di questa forma ondulata i tubi risultano sfalsati e quindi sono tutti quasi completamente investiti dai prodotti della combustione

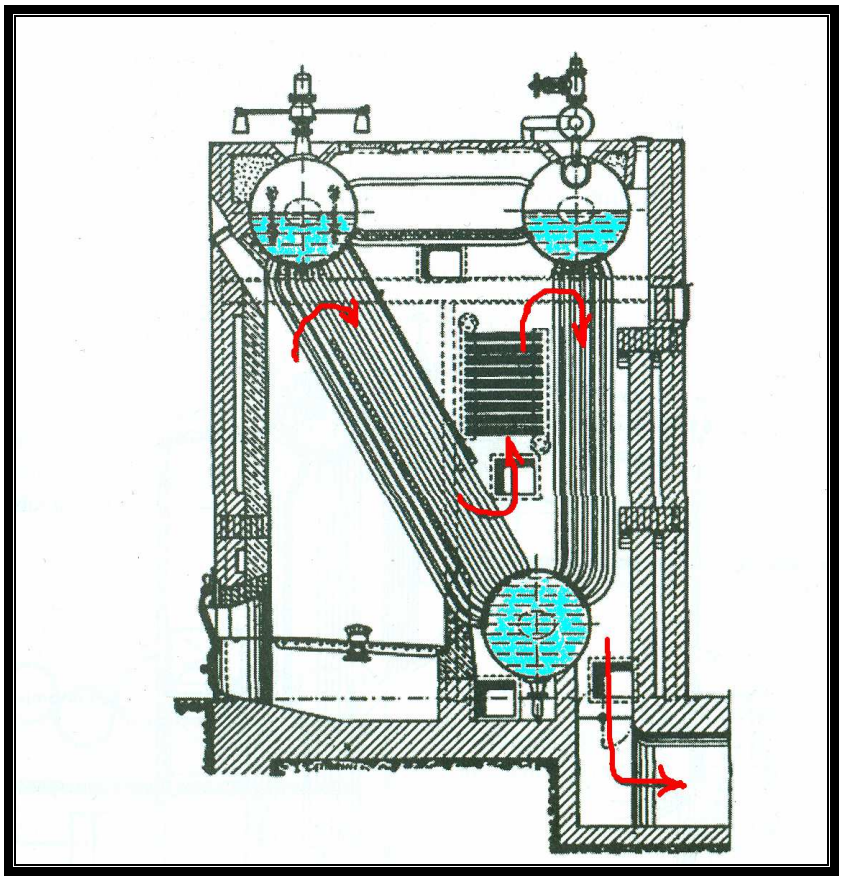
Per grandi superfici di riscaldamento le caldaie B.W. vennero costruite con due corpi cilindrici superiori affiancati, in questo modo era possibile innestare ad esse un numero di sezioni collettrici e quindi di tubi di circolazione. Lo stesso risultato si è ottenuto disponendo l'unico *corpo cilindrico superiore trasversalmente.*
Le caldaie multitubolari descritte sono chiamate "caldaie a tubi suborizzontali"(a tubi cioè poco inclinati rispetto all'orizzontale).



Caldaia a tubi d'acqua suborizzontali con corpo cilindrico disposto trasversalmente e i giri del fumo.

Trasversalmente al fascio di tubi esistono i *diaframmi refrattari* sagomati che determinano i "*giri del fumo*".I giri di norma sono tre.

L'acqua, che normalmente riempie a metà il *corpo cilindrico superiore*, scende attraverso i tubi di circolazione posteriori(*tubi di caduta*), nelle *cassette collettrici* posteriori, percorre il fascio inclinato dei tubi bollitori muovendosi verso il davanti della caldaia e in parte vaporizza.
-Un altro gruppo di caldaie multitubolari è quello che va sotto il nome di.
caldaie a tubi subverticali.
I tubi, in questo caso sono disposti con fortissima inclinazione tanto da essere quasi verticali e talvolta perfettamente verticali.



Caldaia a tubi subverticali Tosi-Garbe a 3 corpi cilindrici

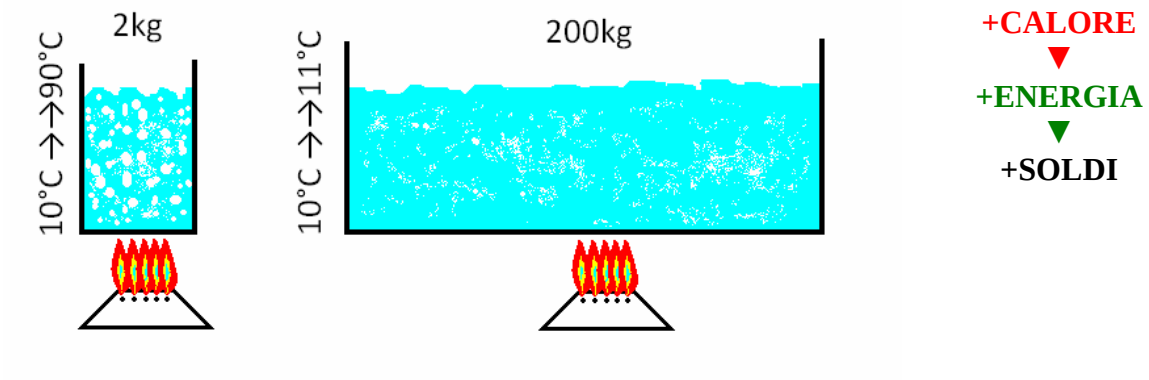
Queste caldaie , il cui prototipo è la caldaia Garbe sorsero principalmente per rendere più rapida la circolazione dell'acqua e quindi per aumentare la produzione specifica del vapore. Ciò era reso possibile anche dalla più ampia camera di combustione che si poteva ricavare, data la particolare forma della caldaia, pur mantenendo i tubi stessi a contatto o poco distanti dalla fiamma. Si costruirono così caldaie come quella raffigurata (sopra).
Oggi questi tipo di impianti sono caduti in disuso. (in Italia pochissime in funzione o di riserva)

ELEMENTI DI TERMOLOGIA

Temperatura

- E' una sensazione
- E' un livello (stato) termico ed indica il livello al quale si trova il calore.

Lo stato termico dei corpi può anche essere rilevato, grossolanamente dai sensi: il senso del tatto consente di percepire quando un corpo è più caldo o freddo di un altro.
Gli apparecchi che servono alla misura delle temperature si chiamano termometri.

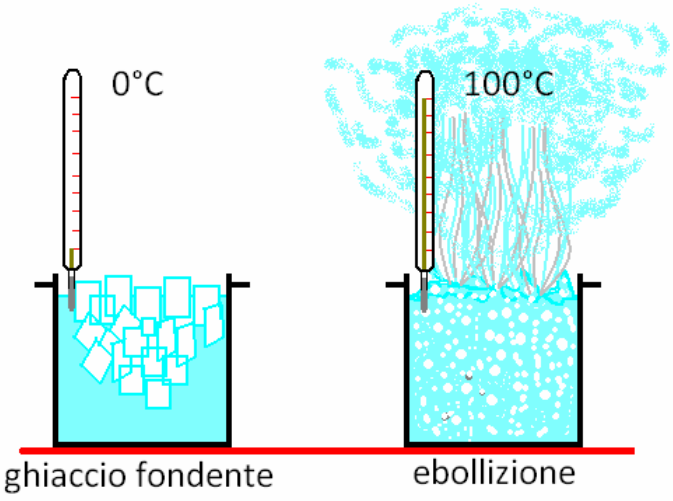


Esempio:
(la stessa quantità di energia per innalzare la temperatura di quantità diverse di acqua in un determinato tempo → risultato diverso)

Varie sono le unità di misura proposte e di conseguenza sono molte le scale termometriche adottate nei vari paesi o abbandonate con il trascorrere del tempo; tutte le scale però si fondano su due temperature invariabili e perfettamente determinate, cui vengono assegnati valori diversi a secondo del sistema di misura previsto.

Queste due temperature fisse sono:

a) la temperatura dell'acqua distillata in **fase di solidificazione**(detta: **ghiaccio fondente**) valutata alla pressione atmosferica, che viene assunta come **limite inferiore**.
b) la temperatura dell'acqua distillata in **fase di ebollizione** alla pressione atmosferica, che viene assunta come **limite superiore**.

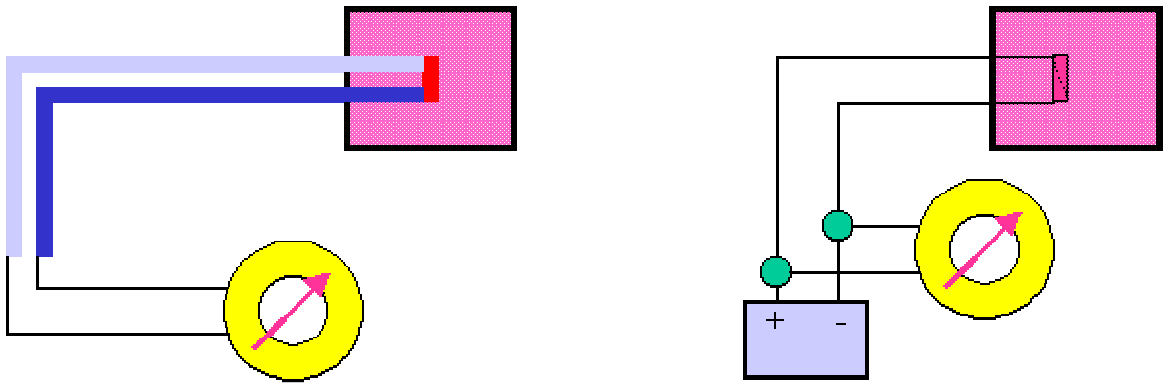


Termometri

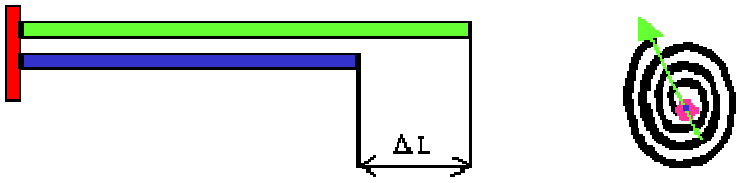
Servono per misurare indirettamente la temperatura;
l'avverbio "indirettamente" serve ad indicare che nei termometri si sfruttano fenomeni fisici che sono dipendenti dalla temperatura, e quindi in realtà essi misurano "altre cose". Per esempio quelli a mercurio misurano l'aumento di volume del liquido, quelli elettrici misurano la variazione di tensione o di intensità della corrente, quelli metallici la variazione di lunghezza, ecc. Poiché sono moltissimi i fenomeni fisici legati alla temperatura, altrettanti sono i tipi di termometro.

Alcuni tipi di termometro

1) termometro a coppia termoelettrica: due lamine di metalli diversi (per esempio rame e zinco) saldati ad una estremità (in rosso nella figura a sinistra), mostrano all'altra estremità una differenza di potenziale elettrico rilevabile con un voltmetro, differenza variabile con la temperatura della saldatura. Se mettiamo la saldatura all'interno dell'ambiente di cui si vuole conoscere la temperatura, il voltmetro ci darà una indicazione che viene tradotta in °C attraverso una opportuna taratura.



2) termometro elettrico: l'elemento sensibile è costituito da una resistenza elettrica inserita in un circuito elettrico alimentato da un generatore (per esempio un accumulatore); la resistenza (in rosso) è variabile con la temperatura e quindi un voltmetro in parallelo (come nella figura a destra) o un amperometro in serie possono misurarla.
3) termometro elettronico: è identico come concezione a quello elettrico, ma al posto della resistenza c'è un chip. Le differenze costruttive sono due: il generatore è di potenza quasi trascurabile e il chip ha una prontezza(*) di risposta di pochi decimi di secondo.
4) termometro metallico:
- lamina bimetallica. I due diversi metalli hanno due diversi coefficienti di allungamento; se i coefficienti sono noti, dalla differenza di allungamento ΔL si ricava la temperatura.



- spirale. La lamina a spirale si avvolge o si svolge a seconda della temperatura e nel suo moto trascina un indice rotante su un perno: l'angolo di rotazione è proporzionale alla temperatura.

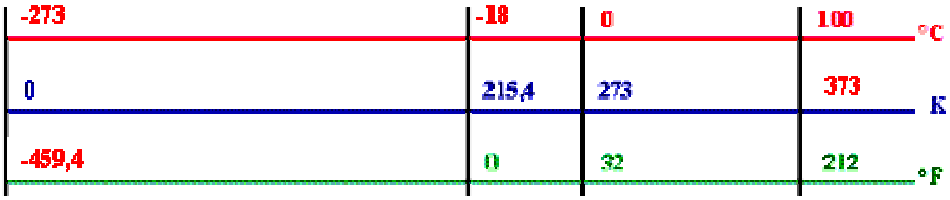
Non tutti i termometri possono misurare qualunque temperatura, anzi alcuni di essi hanno limitazioni molto grandi. Vediamone alcune:

a) termometro a mercurio e ad alcool. I limiti sono la temperatura di solidificazione (- 39 °C; -114 °C) e quella di vaporizzazione (357 °C; 78 °C). Con il mercurio si può arrivare a circa 900 °C usando un tubo più resistente al calore (il quarzo) riempito con un gas (per esempio azoto) ad alta pressione. L'alcool viene usato comunemente nei banchi frigoriferi a bassissima temperatura, anche perché una sua eventuale rottura non inquina i cibi, come invece farebbe il mercurio.
b) termometro a termocoppia, elettrico, elettronico e metallico. I limiti sono: 1) la temperatura di fusione (rame 1.083 °C; zinco 419 °C; acciaio 1.300 °C; nichel 1.450 °C; platino 1.766 °C; tungsteno 3.370 °C; quarzo, con il quale si costruiscono i chip, 1.470 °C); 2) la superconduttività: a temperature dell'ordine di - 250 °C tutti i metalli manifestano il fenomeno della superconduttività, che consiste in pratica nell'annullamento della resistenza elettrica, per cui essi non possono più misurare la temperatura.

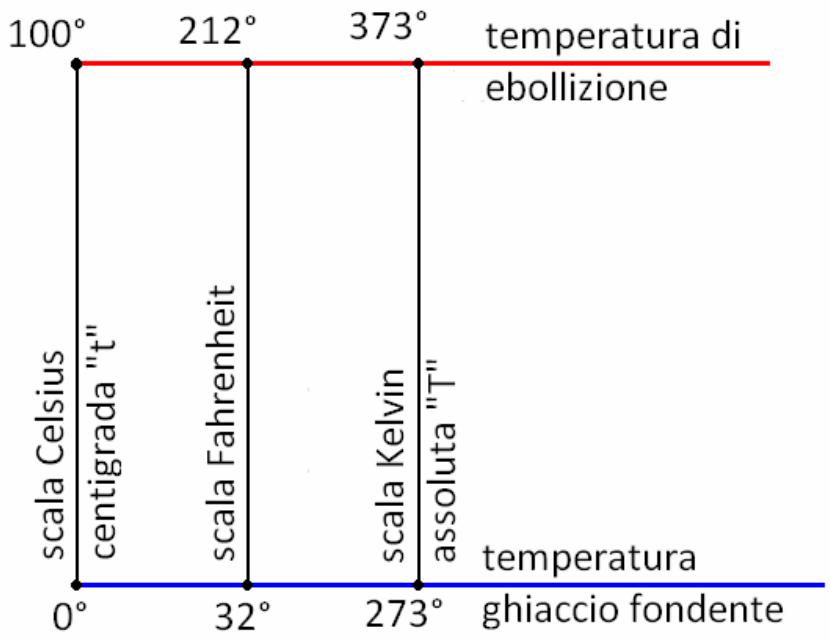
(*)La prontezza di uno strumento è il tempo necessario affinché l'elemento sensibile si porti in equilibrio con il fenomeno da misurare.

ATTENZIONE

Q = 0 QUANDO t = 0, COSA NON VERA. INFATTI IL CALORE POSSEDUTO DAI CORPI VALE ZERO SOLO ALLA TEMPERATURA **DELLO ZERO ASSOLUTO**, CIOE' Q = 0 QUANDO T = 0.



Alle temperature suddette si assegnano valori convenzionali, ed il relativo intervallo viene suddiviso in tratti uguali, la cui ampiezza varia a seconda della scala proposta:



-**La scala Celsius** assegna ai due punti fissi le temperature convenzionali rispettivamente di 0° e 100° ne consegue che l'intervallo è suddiviso in 100 parti uguali e per tale motivo si definisce comunemente ***scala centigrada***. Indicheremo la temperatura centigrada con "**t**" ed il relativo valore numerico con **°C**.
-**La scala Fahrenheit**, impiegata comunemente nei paesi anglosassoni assegna ai due punti fissi rispettivamente i valori di 32° e 212°, dividendo l'intervallo in 180 parti uguali.
Fra le due scale esiste la proporzione:→→→→ **°C : 100 = (°F – 32) : 180**

Nei calcoli di termodinamica si impiega comunemente una scala termometrica che costituisce una conseguenza di quella *centigrada*: è noto dalla fisica che si potesse asportare da un corpo tutto il calore che possiede, esso raggiungerebbe una temperatura teorica di -273,15°C.
tale limite viene definito "**zero assoluto**".
Viene così chiamata "**scala assoluta**" o "**scala Kelvin**" assegnando il valore nullo allo zero assoluto(-273,15°C) e mantenendo la suddivisone centesimale.
Indicheremo la temperatura assoluta con "**T**" ed il valore numerico con **K**; fra la temperatura assoluta e temperatura centigrada esiste la relazione

$$T = t + 273{,}15$$

Calore (energia)

Il calore è una forma di energia che può essere trasformata in *lavoro*, tanto più completamente quanto maggiore è la sua *temperatura*, quest'ultima è quindi una grandezza che ne condiziona l'utilizzazione e può essere ritenuta come un indice della qualità dell'energia disponibile.

L'unità di misura del calore nel **ST** è la "kilocaloria"- indicata con il simbolo[kcal]– definita come la quantità di calore che si deve somministrare ad un kilogrammo di acqua distillata per elevare la sua temperatura da 14,5° a 15,5°C
L'unità di misura nel **SI** "joule" [J]

Da ricordare: 1°C = 1kcal/kg (fino a 120°C approssimazione accettabile)

1 kcal = 4.186 J = 4,186 kJ

Esercizio:

dimensioni piscina contenente acqua H_2O:
h = 300cm;
largh. = 150dm;
lungh .= 25m)
t_1 = 10°C
t_2 = 28°C

Quantità di calore Q necessaria a innalzare la temperatura da t_1 a t_2

$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$

dove:
m = massa acqua[kg]
c = calore specifico[kcal/kg·°C]→[1]
Δt = diff. temperatura [°C]→[18°C]

Volume piscina → h 300cm=3m; largh. 150dm=15m →3·15·25=1.125m³→1.125.000kg

Q = 1.125.000·1·18=20.250.000kcal
=84.766.500kJ

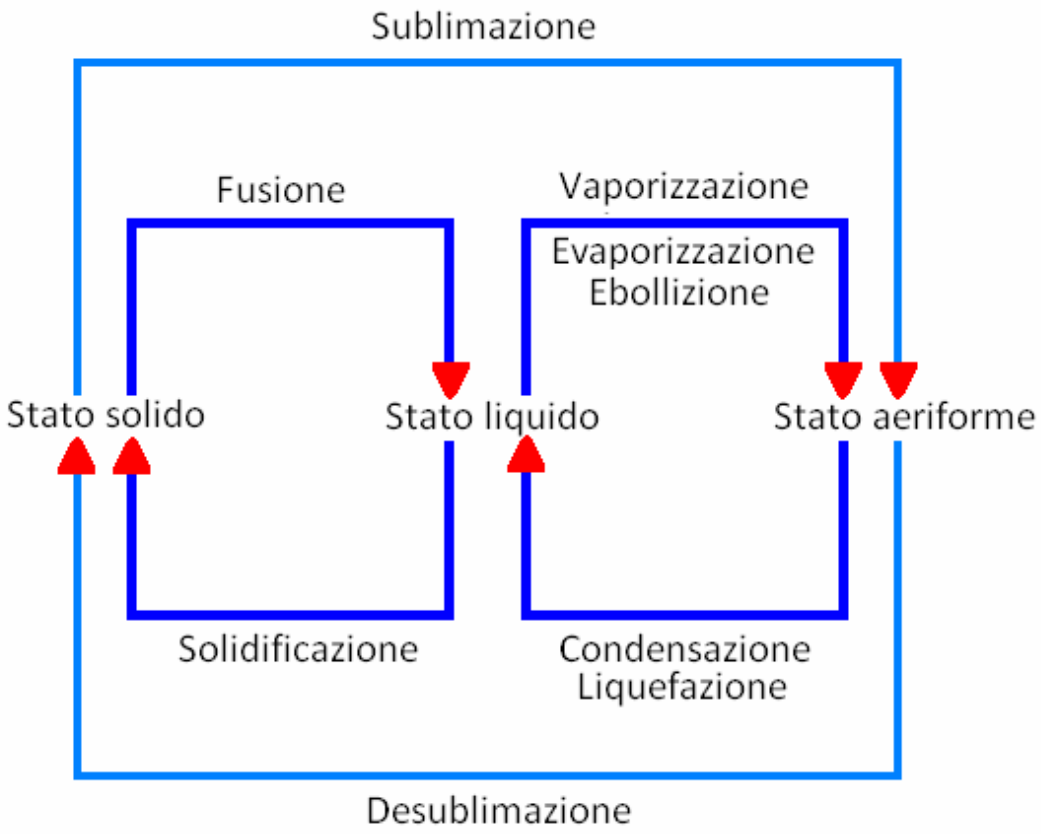
Capacità termica massica, (nel Sistema Tecnico, calore specifico)

DEFINIZIONE: il *calore specifico* è la quantità di calore necessaria per innalzare di un grado la temperatura di un kg di una determinata sostanza (materia).
-E' una caratteristica propria di ogni sostanza ed i valori si trovano su tabelle→ nate dall'esperienza "pratica", definibili con gli aggettivi "empiriche e sperimentali".

ST = Calore specifico (c) [kcal/kg°C]
SI = Capacità termica massica [kJ/kg°C]
Calore massico

Per l'acqua il calore specifico è **1** [kcal/kg°C]→→→(4,186kJ/kg°C)

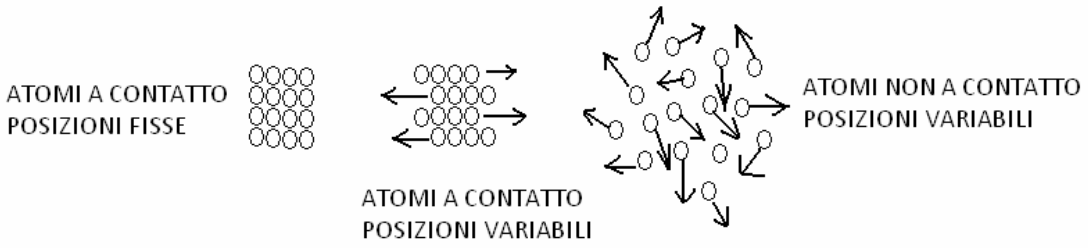
Cambiamento di stato fisico dell'acqua *(stati di aggregazione)*

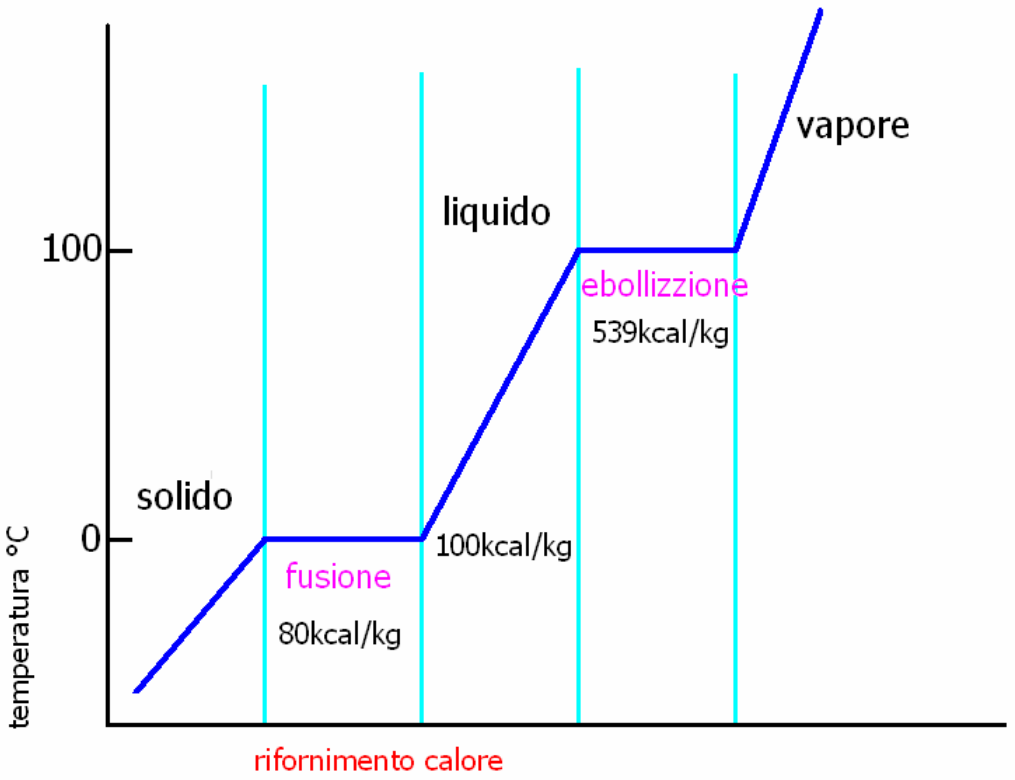


	STATO SOLIDO	STATO LIQUIDO	STATO AERIFORME
VOLUME	PROPRIO	PROPRIO	RECIPIENTE
FORMA	PROPRIO	RECIPIENTE	RECIPIENTE

ENERGIA AUMENTA+

ENERGIA DIMINUISCE-



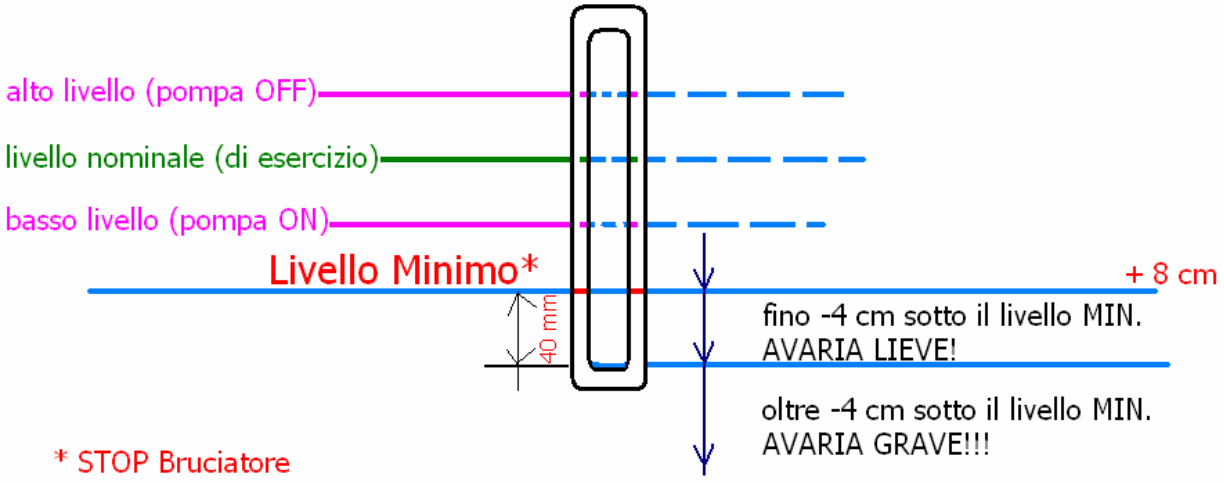


rappresentazione calore latente di fusione ed ebollizione

ACCESSORI DI OSSERVAZIONE

Indicatori di livello

Gli *indicatori di livello* servono a indicare visivamente il livello dell'acqua nel generatore di vapore. In maniera, molto semplice, un indicatore di livello può essere schematizzato in un tubo di vetro avente le due estremità in comunicazione con il corpo cilindrico del generatore, l'estremità superiore in comunicazione con la zona vapore, l'estremità inferiore con la zona acqua.

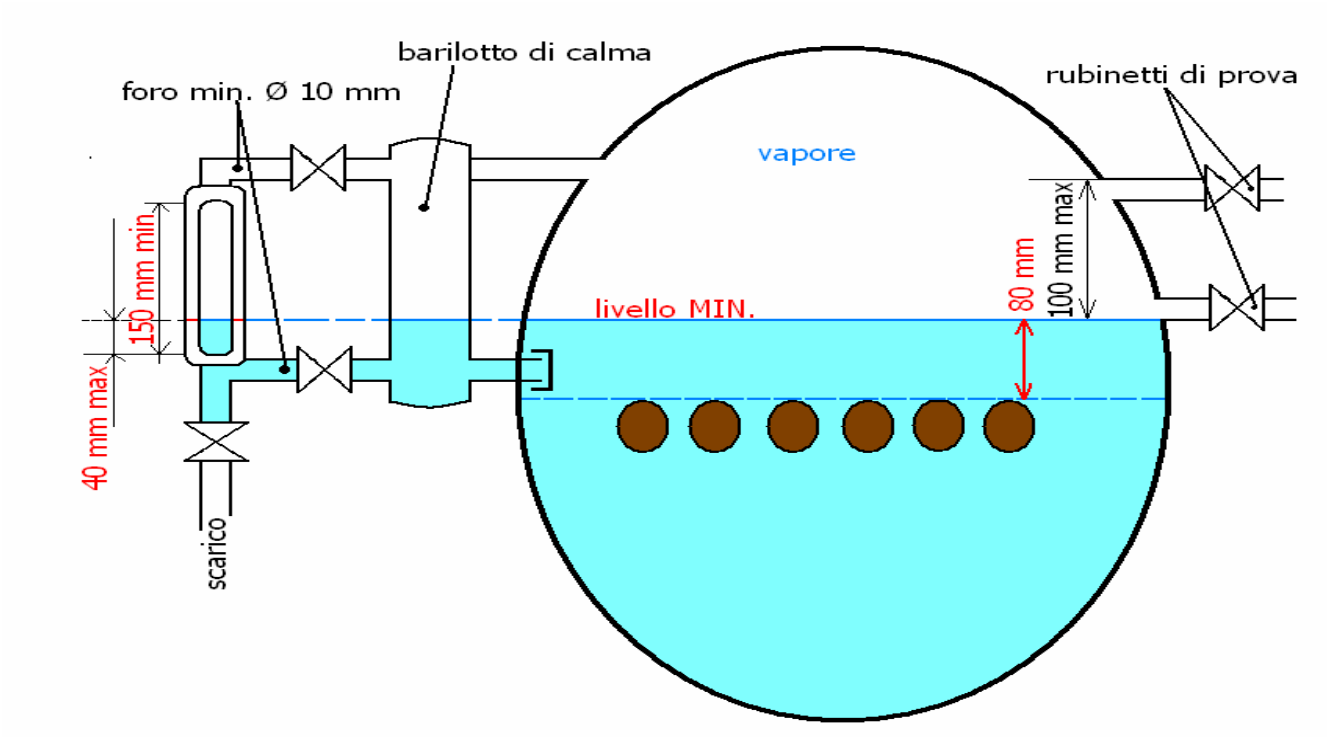


-Ogni generatore *deve avere non meno di due indicatori di livello d'acqua*, dei quali uno deve essere a vetro. L'altro indicatore può essere costituito da due rubinetti di prova.
-L'altezza visibile dell'indicatore di livello non deve essere inferiore a 150mm dei quali non più di 40mm devono essere sotto il livello minimo.
-Il diametro dei fori di comunicazione non deve essere inferiore ai 10mm.

Principio di funzionamento
-Il principio sul quale è basato il funzionamento dell'indicatore di livello a vetro è quello dei vasi comunicanti, ma a causa di una certa distanza dal corpo cilindrico a cui è connesso tramite dei tronchetti e interposte valvole, si ha sempre una caduta di temperatura per cui l'indicatore di livello è più freddo del corpo cilindrico (il peso specifico dell'acqua diminuisce all'aumentare della temperatura in modo considerevole) con il risultato che il livello al suo interno è più basso che nel corpo cilindrico; questa differenza non è rilevante nei generatori a bassa e media pressione, mentre assume valori di qualche centimetro in quelli ad alta e altissima pressione.

Costituzione dell'indicatore di livello
-Ogni indicatore di livello è sempre costituito da:
-una parte visiva (corpo dell'indicatore);
-almeno due valvole di intercettazione (una sulla connessione superiore e una su quella inferiore);
-una valvola di spurgo

Tipi di indicatore di livello (alcuni esempi)
-di cristallo a trasparenza;
-di cristallo a riflessione;
-a tubo di vetro;
-bicolore;
-a sensore magnetico;



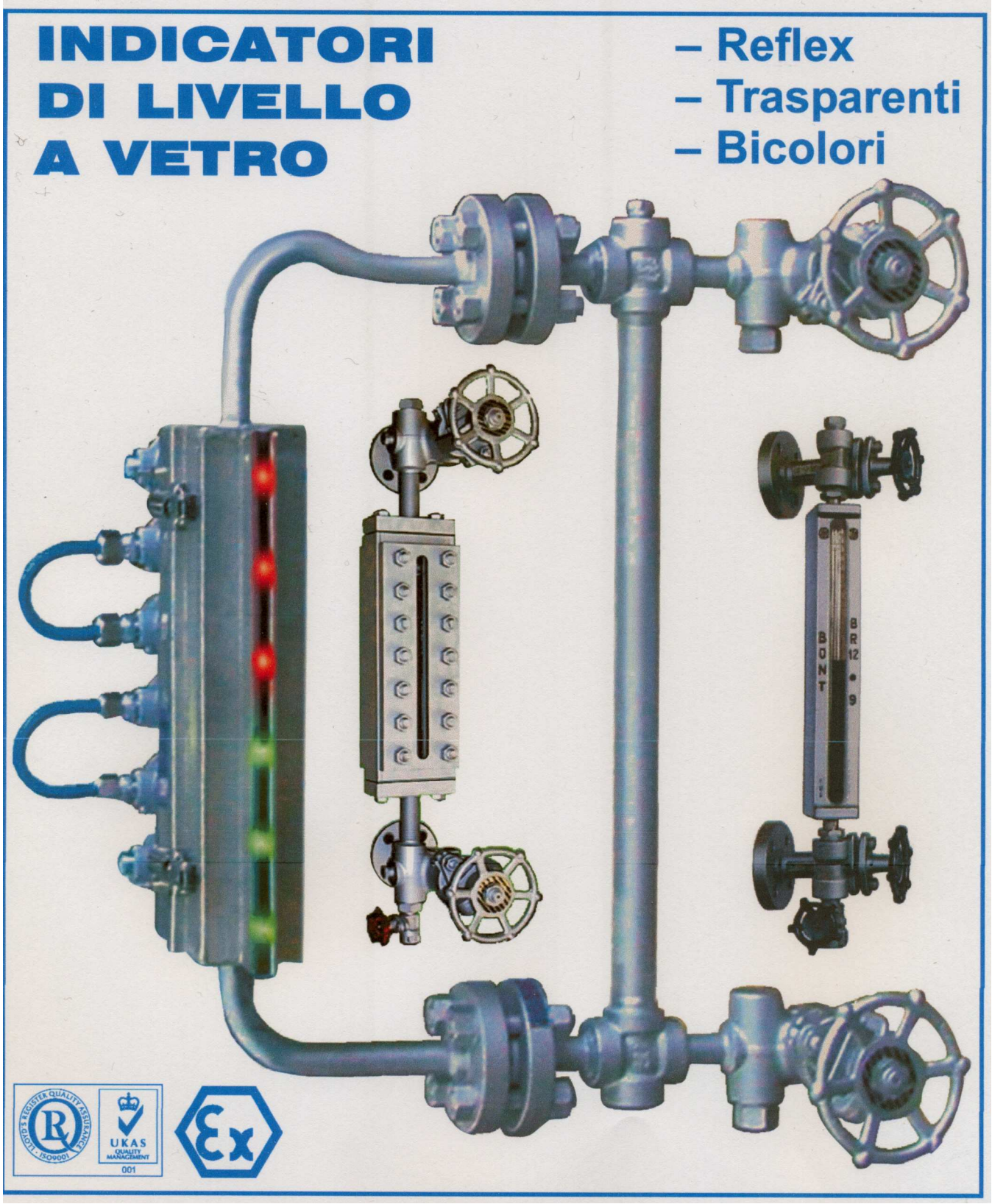
Rubinetti di prova:
Il rubinetto di prova inferiore deve essere posto all' altezza del livello minimo (vedi figura sopra), e quello superiore deve essere posto non più in alto di 100 mm

Operazioni da effettuar sugli indicatori di livello:

Prova completa (1 volta al giorno)
-chiudo la valvola lato vapore → l'indicatore si riempie d'acqua → apro lo scarico (spurgo) e poi lo richiudo così si pulisce il tubo lato acqua → riapro la valvola lato vapore;
-chiudo la valvola lato acqua → apro lo scarico così si pulisce bene il vetro → chiudo lo scarico → riapro la valvola lato acqua facendo attenzione che il livello torni velocemente a posto.

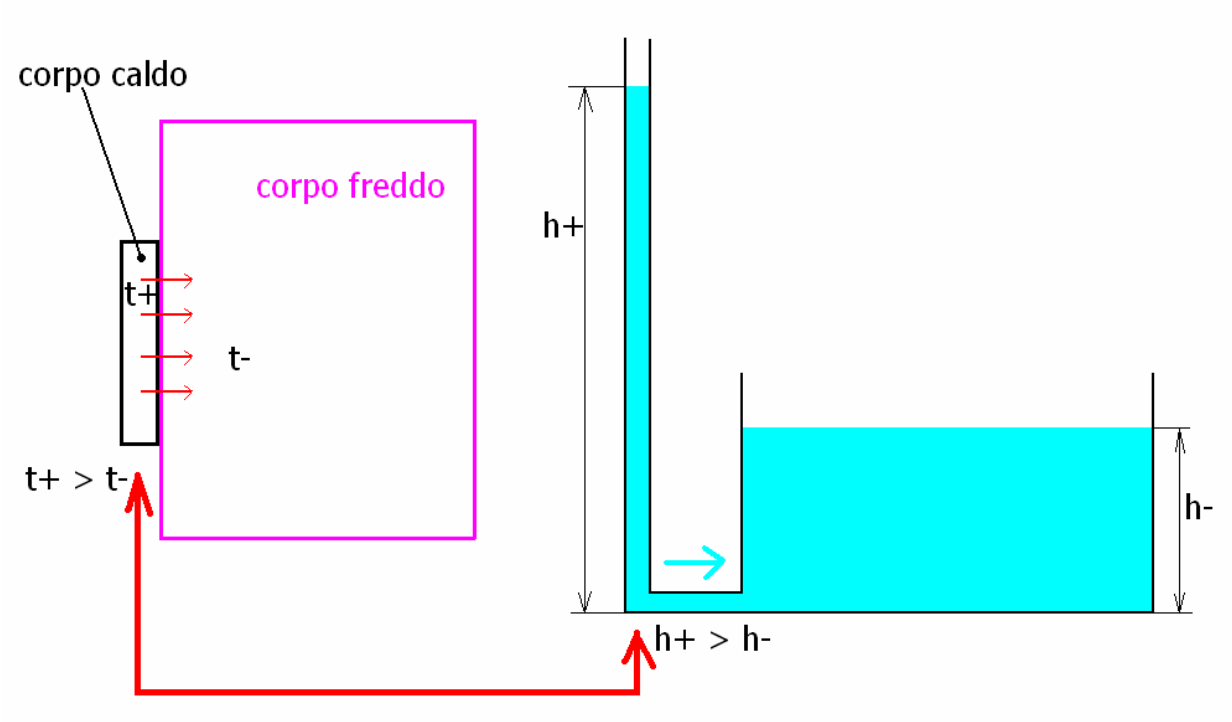
Prova rapida (ogni turno)
-apro e richiudo lo scarico → il livello deve tornare immediatamente a posto.

Domanda da esame:
-Se si rompe un vetro indicatore cosa devi fare?
-Devo spegnere il generatore perché la legge prevede che ci siano due indicatori, quindi fermo il generatore, sostituisco l'indicatore di livello e riavvio.



ELEMENTI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

La trasmissione del calore si occupa delle quantità di calore che passano da un corpo caldo ad uno freddo, chiamati sorgente e ricevitore.
Il calore passa spontaneamente dai corpi a temperatura più alta a quelli a temperatura più bassa



Paragone tra trasmissione del calore da un corpo caldo ad uno freddo e vasi comunicanti
la temperatura è il livello

Esempio da T1 > T2 quando c'è ΔT

Nel **ST** si misura in **[kcal]**
Nel **SI** si misura in **[J]** → **[kJ]**

Il calore può trasmettersi in tre modi:

-**1**. ***Per conduzione*** (contatto), è la trasmissione che si manifesta internamente ai corpi solidi o nei liquidi a riposo o tra due corpi posti a diretto contatto devi esserci ΔT
-**2**. ***Per convezione***, per mezzo di un fluido (acqua,aria) deve esserci ΔT
-**3**.***Per irraggiamento***, attraverso onde elettromagnetiche, che possono propagarsi attraverso qualsiasi gas ed anche nel vuoto. Può non esserci ΔT

VAPORE

Volume:
1kg d'acqua, allo stato liquido, a pressione atmosferica da 0 a 100°C occupa indicativamente 1dm³,

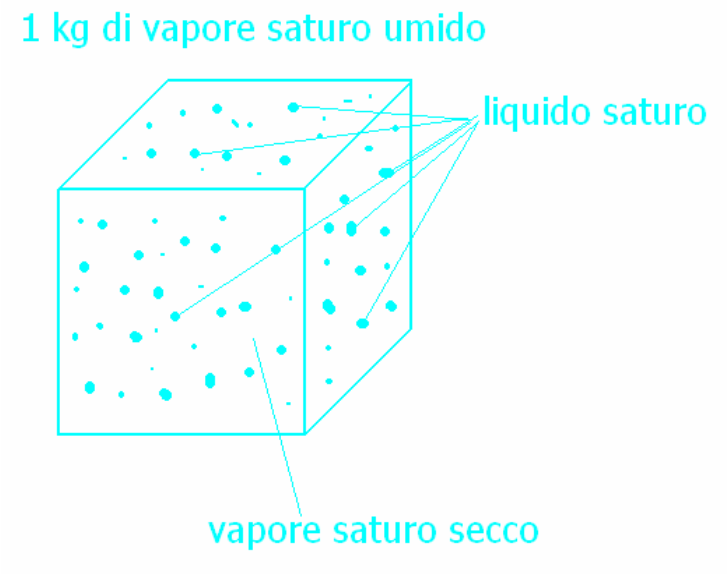
Entalpia:
h, entalpia o contenuto termico (se vogliamo "contenuto di calore"), "energia" contenuta nell'unita' di peso (1kg) di sostanza.

Saturo:
-Liquido saturo: liquido che ha raggiunto la temperatura di ebollizione, e che quindi non e' più in grado di assumere ulteriore energia in forma sensibile (aumento di temperatura) ma solo in forma latente (passaggio di stato).
-Vapore saturo secco: totalmente vaporizzato, privo di umidità. Ulteriore fornitura di energia possibile solo in forma sensibile: il vapore diventa surriscaldato
-Vapore saturo umido: presenza contemporanea di vapore e liquido, identica temperatura e pressione. Ulteriore apporto di energia aumenta la parte vaporizzata riducendo la parte liquida, mentre, sottrazione di energia, riduce la parte vaporizzata aumentando la parte liquida.
-Vapore surriscaldato: mantiene la stessa pressione del vapore saturo, ma con temperatura più alta.
Non dimenticare mai: ***in pratica saturo vuol dire presenza contemporanea di liquido e vapore, con stessa temperatura e pressione, ovunque esso si trovi, caldaia, linee vapore, utenze, tubazioni, ev. condense***.

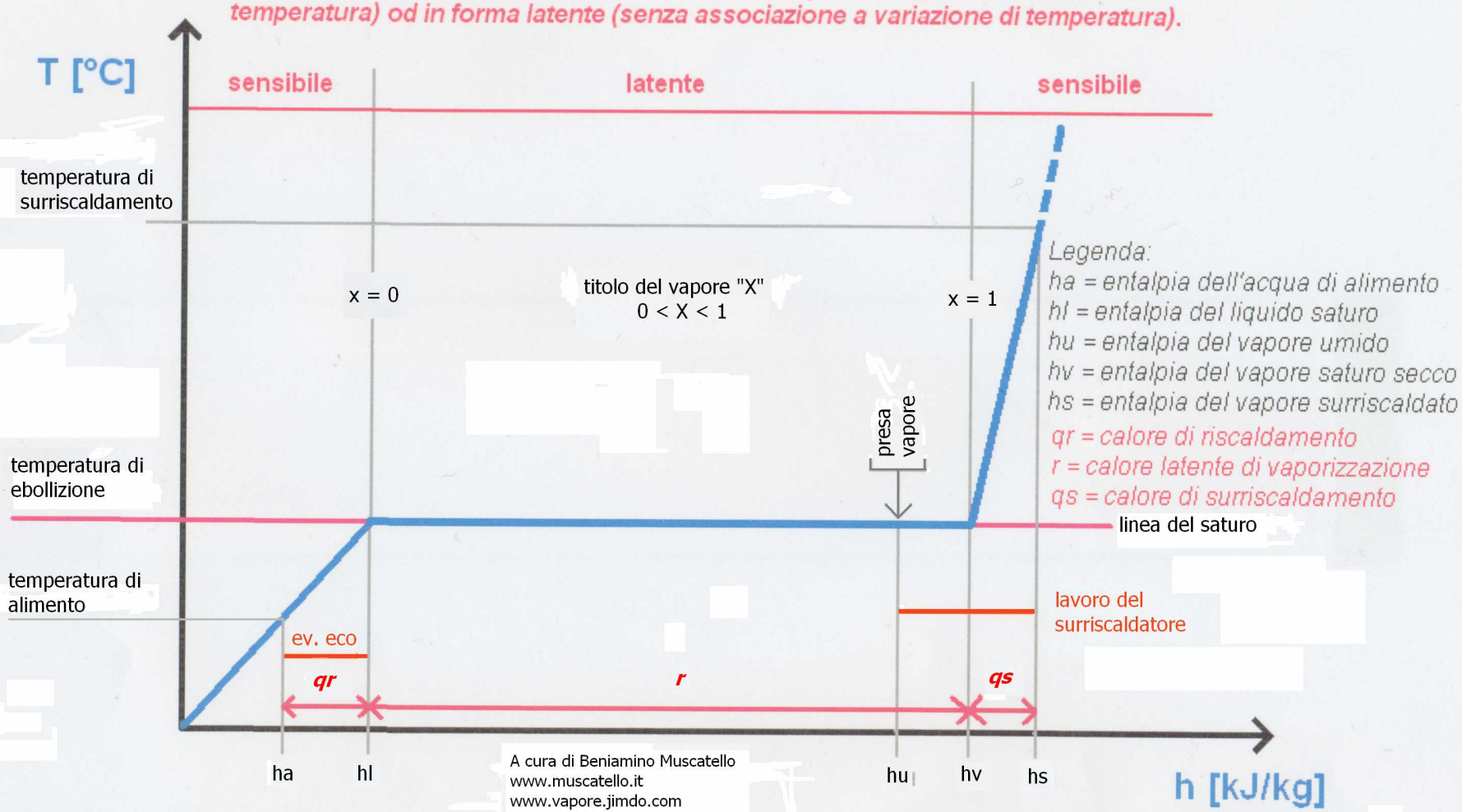
Titolo "X" :
Si parla di *titolo* solo con vapore saturo.
Il titolo stabilisce la parte in peso di acqua vaporizzata.
Il titolo ha un valore compreso tra zero (solo liquido saturo) ed uno (solo vapore saturo secco).
Valori diversi da zero indicano vapore saturo umido (una parte di liquido ed una di vapore).

$$0 < X < 1$$

Il titolo indica la quantità di vapore saturo secco contenuta in un kg di vapore saturo umido, e la differenza ad uno, (1-x), ci indica la quantità di liquido saturo presente.



Il calore puo' venire scambiato in forma sensibile (in associazione a variazione di temperatura) od in forma latente (senza associazione a variazione di temperatura).



Legenda:
ha = entalpia dell'acqua di alimento
hl = entalpia del liquido saturo
hu = entalpia del vapore umido
hv = entalpia del vapore saturo secco
hs = entalpia del vapore surriscaldato
qr = calore di riscaldamento
r = calore latente di vaporizzazione
qs = calore di surriscaldamento

A cura di Beniamino Muscatello
www.muscatello.it
www.vapore.jimdo.com
Trento 2013

Nota 1: 1kcal = 4.186kJ
Nota 2: nei moderni generatori di vapore, il titolo alla presa vapore è X = 0,97 (fonte Bosch industrialkessel 11/2012)

Formule per il calcolo dell'entalpia e del calore

ha = entalpia acqua di alimento
ha = Cs · t[H_2O] · m → formula valida con temperatura di alimento fino a 120°C,
sopra i 120°C si prende la tabella a pag. 80 hl in [kcal/kg] e lo si trasforma in [kJ/kg] moltiplicando per 4,186

hl = entalpia del liquido saturo(livello energetico al quale l'acqua inizia a vaporizzare)
hl = vedi tabella del vapore saturo secco a pag. 83.

hv = entalpia del vapore saturo secco
hv = vedi tabella del vapore saturo secco a pag. 83.

hs = entalpia del vapore surriscaldato
hs = vedi tabella del vapore surriscaldato a pag. 83.

X = titolo del vapore (il vapore surriscaldato non ha titolo)
Il titolo indica la quantità di vapore saturo secco contenuta in un kg di vapore saturo umido, e la differenza ad uno, (1-X), ci indica la quantità di liquido saturo presente.
-Il titolo del vapore è migliore nelle caldaie a tubi d'acqua perché solitamente lavorano a pressioni superiori.

hu = entalpia saturo umido (cioè ancora in presenza di parte del suo liquido)
hu = (1-x) · hl + x · hv
o, se si preferisce, ad un' altra equivalente
hu = hl + r · x
dove r è il calore latente di vaporizzazione, r = hv - hl

qr = calore sensibile di riscaldamento
qr = hl – ha

r = calore latente di vaporizzazione
r = hv – hl

qs = calore sensibile di surriscaldamento
qs = hs – hv

calore fornito in caldaia = hu – ha

calore fornito nel surriscaldatore = hs –hu

calore fornito per completare la vaporizzazione = hv – hu

calore scambiato (tramite scambiatore) ad ogni kg di vapore e poi ritornato come condensa = hu - hl

Potenza che il bruciatore ha ceduto all'acqua o potenza assorbita dall' acqua

Potenza utile[kW] = P = W · (hu – ha)/3600 → senza surriscaldatore
Potenza utile[kW] = P = W · (hs – ha)/3600 → con surriscaldatore

Esercizio (caldaia a tubi da fumo)

W = 3,8 t/h
Pes = 13 bar
Pb = 16 bar
t H_2O alim = 90°C
X = 0,9

Trasformo le t/h in kg/h → 3,8 = 3.800
ha = Cs · t H_2O · m = 4,186kJ/kg · 90°C · 1 = 376,74 kJ/kg

dalle tabelle mi ricavo hl ed hv ricordandomi di aggiungere 1 bar per avere la pressione assoluta, quindi: 13 bar + 1 bar = 14 bar → TABELLE →hl = 830,1kJ/kg hv = 2787,8kJ/kg

hu = (1-x) · hl + x · hv = (1 – 0,9) · 830,1 + 0,9 · 2787,8 = 2.592,03kJ/kg

adesso posso calcolare la potenza [P] → P = W · (hu-ha)/3600 =
= 3.800 · (2.592,03 – 376,74)/3600 = 2.338,36 kW
= 2,33 MW

Esercizio (caldaia a tubi da fumo)

W = 10 t/h
Pes = 10 bar
Pb = 12 bar
t H_2O alim = 90°C
X = 0,9

Trasformo le t/H in kg/h →10 = 10.000
ha = Cs · t H_2O · m = 4,186kJ/kg · 90°C · 1 = 376,74 kJ/kg

dalle tabelle mi ricavo hl ed hv ricordandomi di aggiungere 1 bar alla pressione di esercizio ed avere la pressione assoluta.
Quindi: 10 + 1 = 11 bar →TABELLE → hl = 781,1kJ/kg hv = 2.779,7kJ/kg

sapendo che → r = hv – hl 2.779,7 – 781,1 = 1.998,6kJ/kg

hu = hl + r · x =
781,1 + (1.998,6 · 0,9) = 781,1 + 1798,74 = 2.579,84 adesso posso calcolare la potenza
P = W · (hu – ha)/3600
10.000 · (2.579,84 – 376,74)/3600 = 6.120kW = 6,12MW

Esercizio (caldaia a tubi da fumo)

W = 12 t/h
Pes = 12 bar
Pb = 14,7 2 bar
t H_2O alim = 85°C
X = 0,9

Trasformo le t/H in kg/h →12 = 12.000
ha = Cs · t H_2O · m = 4,186kJ/kg · 85°C · 1 = 355,81kJ/kg

dalle tabelle mi ricavo hl ed hv ricordandomi di aggiungere 1 bar alla pressione di esercizio ed avere la pressione assoluta.
Quindi: 12 + 1 = 13 bar →TABELLE → hl = 814,7kJ/kg hv = 2.785,4kJ/kg

hu = (1-x) · hl + x · hv = (1 – 0,9) · 814,7 + 0,9 · 2.785,4 = 2.588kJ/kg

adesso posso calcolare la potenza [P] →

P = W · (hu-ha)/3600 =
12.000 · (2.588 – 356)/3600 = 7.440kW = 7,44MW

▼
stesso esercizio

Trasformo le t/H in kg/h →12 = 12.000
ha = Cs · t H_2O · m = 4,186kJ/kg · 85°C · 1 = 355,81kJ/kg

dalle tabelle mi ricavo hl ed hv ricordandomi di aggiungere 1 bar alla pressione di esercizio ed avere la pressione assoluta.
Quindi: 12 + 1 = 13 bar →TABELLE → hl = 814,7kJ/kg hv = 2.785,4kJ/kg

sapendo che → r = hv – hl 2.785,4 – 814,7 = 1.970,7/kg

hu = hl + r · x =814,7 + (1.970,7 · 0,9) = 814,7 + 1.773,6 = 2.588kJ/kg

adesso posso calcolare la potenza [P] →

P = W · (hu-ha)/3600 =
12.000 · (2.588 – 356)/3600 = 7.440kW = 7,44MW

Esercizio (caldaia a tubi d'acqua)

W = 90 t/h
Pes = 49 bar
Pb =
t H_2O alim = 106°C
tsurr = 430°C
X = 0,9
trasformo le t/h in kg/h → 90 = 90.000
ha = Cs · t H_2O · m = 4,186kJ/kg · 106°C · 1 = 443,7kJ/kg

nel caso di generatore con vapore surriscaldato non c'è titolo X e vado a cercare il valore di hs sulla tabella del vapore surriscaldato ricordandomi di aggiungere 1 bar alla pressione di esercizio e incrociando i dati pressione assoluta con la temperatura surriscaldato

Quindi: 49 + 1 = 50bar →TABELLE → hs = 3.310kJ/kg

Adesso mi posso calcolare la potenza[P]

P = W · (hs – ha)/3600 = 90.000 · (3.310 -443,7) = 71.657,5kW = 71,66MW

Esercizio

W = 2,5 t/h
Pes = 10 bar
Pb =
t H_2O alim = 80°C
tsurr = +80°C
X = 0,8
Volume H_2O = 3m³

Trovare : ha –hl – hv – hu –hs – r – qr –qs
Potenza in kW di ha ; hu-ha ; hs-hu ;
Potenza totale (hs-ha)
Potenza alla turbina (hs)

Fare il calcolo del volume di scoppio

Trasformo le t/h in kg/h → 2,5 = 2.500
ha = 80 · 4,186 = 335 kJ/kg
Pass = Pes + 1 = 10 + 1 = 11bar e quindi la temperatura t = 184°C
Dalle tabelle vap saturo secco trovo hl e hv hl = 781 kJ/kg hv = 2.780

Aggiungo gli 80°C ai 184°C per avere la temperatura del vapore surriscaldato 184 + 80 = 264°C
Dalla tabella del vap. surriscaldato trovo hs (facendo un'interpolazione) hs =2970,5

Adesso posso calcolare hu
hu = (1 – x) · hl + x · hv = (1 – 0,8) · 781 + 0,8 · 2.780 = 156 + 2.224 = 2.380 kJ/kg

trovo qr dove qr = hl – ha = 781 – 335 = 446 kJ/kg
trovo r dove r = hv – hl = 2.780 – 781 = 1.999 kJ/kg
trovo qs dove qs = hs – hv = 2.970,5 – 2.780 = 190,5 kJ/kg

Calcolo la potenza in kW di [ha] P = W · ha/3.600 = 2.500 · 335/3.600 = 233 kW
Calcolo la potenza in kW di [hu – ha] P = W · (hu – ha)/3.600 =
= 2.500 · (2.380 – 335)/3.600 = 1.420 kW
Calcolo la potenza in kW di [hs – hu] P = W · (hs – hu)/3.600 =
= 2.500 · (2.970,5 – 2.380)/3.600 = 410 kW

Calcolo la potenza totale in kW di [hs – ha] = P_{tot} = W · (hs – ha)/3.600 =
= 2.500 · (2.970,5 – 335)/3.600 = 1.830 kW

Calcolo la potenza alla turbina in kW P_{turb} = W · hs/3.600 = 2.500 · 2.970,5/3.600 = 2.063 kW

Calcolo il volume di scoppio dalla formula $\dfrac{hl_1 - hl_2}{\dfrac{r_1 + r_2}{2}}$

dalle tabelle hl_1 = 781 e hl_2 = 417,5

r1 = $hv_1 - hl_1$ = 2.780 – 781 = 1.999 kJ/kg
r2 = $hv_2 - hl_2$ = 2.675,5 – 417,5 = 2.258 kJ/kg

$$\frac{781 - 417{,}5}{\dfrac{1.999 + 2.258}{2}} = \frac{363{,}5}{2.128} = 0{,}17[\text{kgvap/kgliq}]$$

adesso moltiplico per il volume dell'acqua in caldaia che sono 3m³ = 3.000 litri e poi per 1.725

0,17 · 3.000 · 1.725 = 879.750 l = 879,750 m³ (di vapore flash)

Esercizio

W = 3,8 t/h
S = 55,6 m²
Pes = 13bar
Pb = 16bar
t $_{H2O\ alim}$ = 90°C
X = 0,9
V_{H_2O} = 7.300l

Patente =? →Ws = ? → Fondo scala manometro min e max = ? →

Potenza termica fornita dalla caldaia = ? → Potenza termica disponibile alle utenze = ?

Patente richiesta: 2° grado → (2° grado da 3 t/h ÷ 20 t/h)

Producibilità specifica Ws = W/S prima trasformo le t/h in kg/h quindi 3,8 = 3.800 kg/h

Ws = W/S = 3.800/55,6 ≈ 68,35 kg/m²h

Fondoscala manometro min = Pb · 1,25 = 16 · 1,25 = 20bar max = Pb · 2 = 16 · 2 = 32bar

$ha = t_{alim} \cdot 4{,}186 = 90 \cdot 4{,}186 = 376{,}74$ kJ/kg

Pass = Pes + 1bar = 13 + 1 = 14bar

Dalle TABELLE mi ricavo hl e hv → hl = 830,1 kJ/kg hv = 2.787,8 kJ/kg

Adesso posso calcolare hu = hl · (1 – x) + hv · x =
= 830,1 · (1 – 0,9) + 2.787,8 · 0,9 ≈ 83 + 2.509 ≈ 2.592 kJ/kg

Calcolo la Potenza termica fornita dalla caldaia P = W · (hu – ha) / 3.600 =
P = 3.800 · (2.592 – 376) / 3.600 = 2.339 kW = 2,3 MW

Calcolo la potenza termica disponibile alle utenze P_{ut} = W · hu / 3.600 =
P_{ut} = 3.800 · 2.592 / 3.600 = 2.736 kW = 2,73 MW

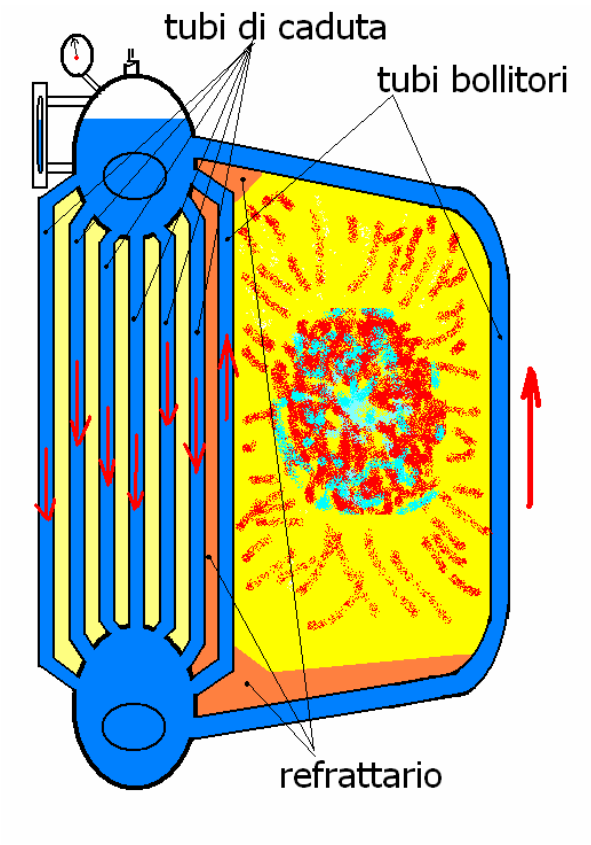
I MODERNI GENERATORI A TUBI D'ACQUA

I moderni generatori a tubi d'acqua sono il risultato di modifiche anche notevoli, intervenute nel tempo. Le soluzioni costruttive più frequentemente adottate, per le unità trasportabili, sono a due corpi cilindrici (in particolare le caldaie a "D"-(foto sotto)- per la forma dei tubi che delimitano la camera di combustione) o a un solo corpo cilindrico (caldaie modulari).

Principio di funzionamento

La caldaia è costituita, nella sua forma classica da due corpi cilindrici, da una camera di combustione prismatica formata da tubi tra loro tangenti e percorsi dall'acqua. In questa camera di combustione che scambia calore per irraggiamento, viene sviluppata la combustione.
L'altra parte costituente la caldaia sono i due corpi cilindrici orizzontali, uno superiore ed uno inferiore.
Quello superiore ha la funzione di raccogliere la miscela acqua/vapore proveniente dai tubi bollitori (vaporizzatori) e di separare il vapore dall'acqua.
Quello inferiore ha la funzione di collettore d'acqua per i tubi del fascio e della camera di combustione. I due corpi cilindrici sono collegati tra di loro nei seguenti modi:
- da un fascio di tubi verticale (tubi di caduta) che forma la zona di scambio termico a *convezione*;
- da un gruppo di tubi a forma di "D" tangenti e saldati tra loro innestati in testa nei corpi cilindrici lungo una generatrice formando una parte della camera di combustione per lo scambio termico per *irraggiamento*;
- da pareti di tubi tangenti verticali saldati tra loro e collegati a due collettori per realizzare la chiusura frontale e posteriore della camera di combustione, sulla parete frontale è realizzata l'apertura per l'alloggiamento del *bruciatore*.
- l'asse delle fiamme è parallelo all'asse dei corpi cilindrici;
- i generatori sono generalmente di tipo pressurizzato;
- la tenuta dei gas della camera di combustione verso l'esterno è garantita dalle pareti della camera realizzate mediante la saldatura continua dei tubi tra di loro o delle alette dei tubi stessi;
- il rivestimento esterno ai tubi non ha funzione di tenuta alla pressione, ma ha lo scopo di evitare dispersioni di calore verso l'esterno

Generatori fissi con pressioni di bollo superiori a 20 bar.
Si trovano in grandi insediamenti produttivi, cartiere, raffinerie, centrali termoelettriche, industrie chimiche, ecc.
L'acqua è contenuta nei tubi, che sono lambiti dalla fiamma (irraggiamento) esternamente.



L'acqua si scalda nei tubi e sale al corpo cilindrico superiore ove si espande e libera il vapore. Così facendo si raffredda e scende nuovamente nel cilindro inferiore, si forma con ciò una circolazione naturale del tipo a termosifone.
I gas tramite un'apertura si infilano attraverso il fascio dei tubi (di caduta) con un giro o più frequentemente con due giri mediante la realizzazione di un diaframma fra giro e giro: questo può essere realizzato in muratura refrattaria o con lamiere in acciaio o dagli stessi tubi che vengono muniti di alette.
Il percorso dei gas è parallelo all'asse dei corpi per poi imboccare un' uscita posta di lato e quindi il camino.
Nei tipi di maggiore potenzialità e dimensioni è spesso presente, a valle del corpo cilindrico superiore, un fascio tubiero per surriscaldare il vapore;

Sono anch'esse equipaggiate con i principali dispositivi come nelle caldaie a tubi da fumo cioè ci saranno.

- Almeno due pompe di alimento
- pressostati di funzionamento e di sicurezza
- due indicatori di livello
- un regolatore di livello (normalmente di tipo continuo)
- una sonda di blocco per minimo livello
- un manometro
- due valvole di sicurezza

Se c'è un aumento anomalo della temperatura all'uscita fumi.
Se non sono presenti incrostazioni di fumo o di acqua e il bruciatore funziona bene → potrebbe essere caduto un deflettore (parte del diaframma) per cui una parte dei gas viene deviata al camino prima e questo provoca l'aumento di temperatura.

LO SCOPPIO DELLE CALDAIE A VAPORE

Si intende riferirsi al classico fenomeno dello scoppio di una caldaia originato da eccesso di pressione, da avarie o da difetti di costruzione, da errori di conduzione (esempio eccessive incrostazioni), che abbiano determinato la formazione di zone di minor resistenza con conseguente squarcio delle lamiere e l'istantanea liberazione della enorme quantità di energia contenuta nella caldaia.

Si cercherà quindi di dare un'idea di questa energia esponendo il fenomeno dello scoppio in modo forse non molto rigoroso, ma chiaro ed evidente.
Del vapore saturo sappiamo che ad ogni pressione corrisponde una certa temperatura dell'acqua; è noto che in un recipiente aperto l'acqua bolle alla temperatura di 100°C e in un recipiente chiuso (caldaia) bolle a temperature via via crescenti man mano che aumenta la pressione; a 2 bar l'acqua bolle a 120°C, a 6 bar a 158°C a 11 bar a 183°C e così via.
Quindi in una caldaia ad esempio dove si produce vapore a 10 bar =11 bar (assoluti) si ha una massa d'acqua a 183°C e se per una qualsiasi causa si formasse nella caldaia un ampio squarcio, la pressione diminuirebbe istantaneamente da 11 bar sino alla pressione atmosferica e la temperatura scenderebbe da 183°C a 100°C (cioè alla temperatura di ebollizione a pressione atmosferica).
Occorre ricordare che mentre 1 kg di acqua a 100°C a pressione atmosferica occupa il volume di 1 litro = 1 dm^3;
1 kg di vapore alla stessa temperatura e pressione occupa invece 1725 litri = 1,725 m^3 cioè un volume 1725 volte maggiore; nello scoppio tale aumento è istantaneo:

La formula per il volume di scoppio è:

Vap.flash [kgvap/kgliquido] = $\frac{hl_1 - hl_2}{\frac{r_1 + r_2}{2}}$ →→→→ cioè quanti kg di vapore per ogni kg acqua,detto: vapore istantaneo o vapore flash

Facciamo un esempio:

1. Condizioni normali	2. Condizioni di esplosione
Pes = 10 bar	Patm = 1 bar
t H_2O = 184°C	t H_2O = 100°C
Volume H_2O = 10 m³	Volume vapore = 2.932,5 m³
hl_1 = da tabella → 781kJ/kg	hl_2= da tabella → 418kJ/kg
hv_1 = da tabella → 2.779kJ/kg	hv_2 = da tabella → 2.675kJ/kg

Dalle tabelle mi ricavo i valori hl_1 e hv1 ricordandomi di aggiungere 1 bar alla (Pes) pressione di esercizio, quindi 10 + 1 = 11bar → TABELLA hl1 = 781kJ/kg hv_1 = 2.779kJ/kg
(Può essere anche Pb pressione di bollo o comunque la pressione indicata in cui avviene lo scoppio)
Sempre dalle tabelle mi ricavo hl_2 e hv_2 alla pressione atmosferica di 1 bar →
→ TABELLA hl_2 = 418kJ/kg hv_2 = 2.675kJ/kg

adesso mi posso ricavare r1 e r2 dalla formula → r = hv – hl

$r_1 = hv_1 - hl_1 = 2.779 - 781 = 1.999$kJ/kg

$r_2 = hv_2 - hl_2 = 2.675 - 418 = 2.257$kJ/kg

ora ho tutti i dati per usare la formula di scoppio → $\dfrac{hl_1 - hl_2}{\dfrac{r_1 + r_2}{2}}$

$$\frac{781 - 418}{\dfrac{1.999 + 2.257}{2}} = \frac{363}{2.128} = 0{,}17 \text{ [kgvap/kgliq]}$$

ed infine moltiplichiamo questo dato per il volume di acqua contenuto in caldaia (presa ad esempio) e moltiplicato nuovamente per 1.725 volte ed otterremo il volume di vapore che verrà sprigionato:

0,17[kgvap/kgliq] · 10.000 · 1.725 = 2.932.500 litri = 2.932,5 m³ di vapore

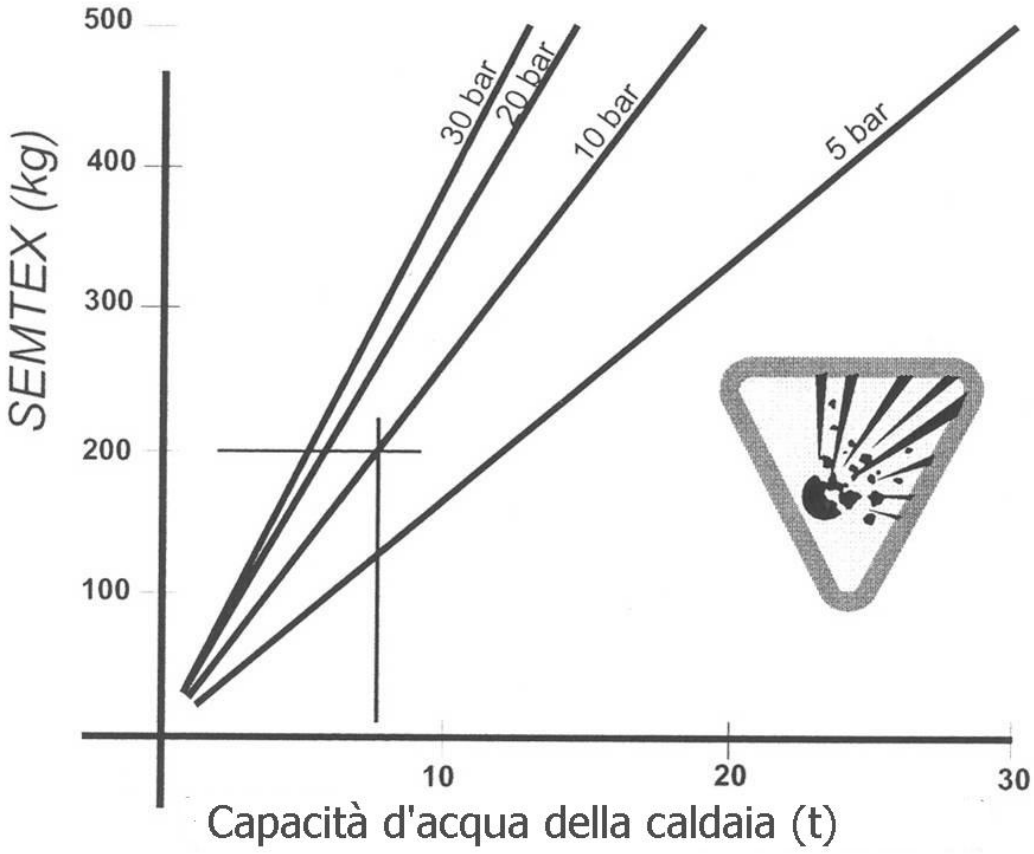
ESPLOSIONI DI GENERATORI

A cura di
Beniamino Muscatello

Il passato ci racconta che purtroppo la storia dei generatori di vapore è costellata di incidenti, anche gravissimi. Cerchiamo di fare tesoro degli insegnamenti che possono derivare da questi spesso tragici eventi.

Una caldaia a vapore ha il potenziale di una bomba!

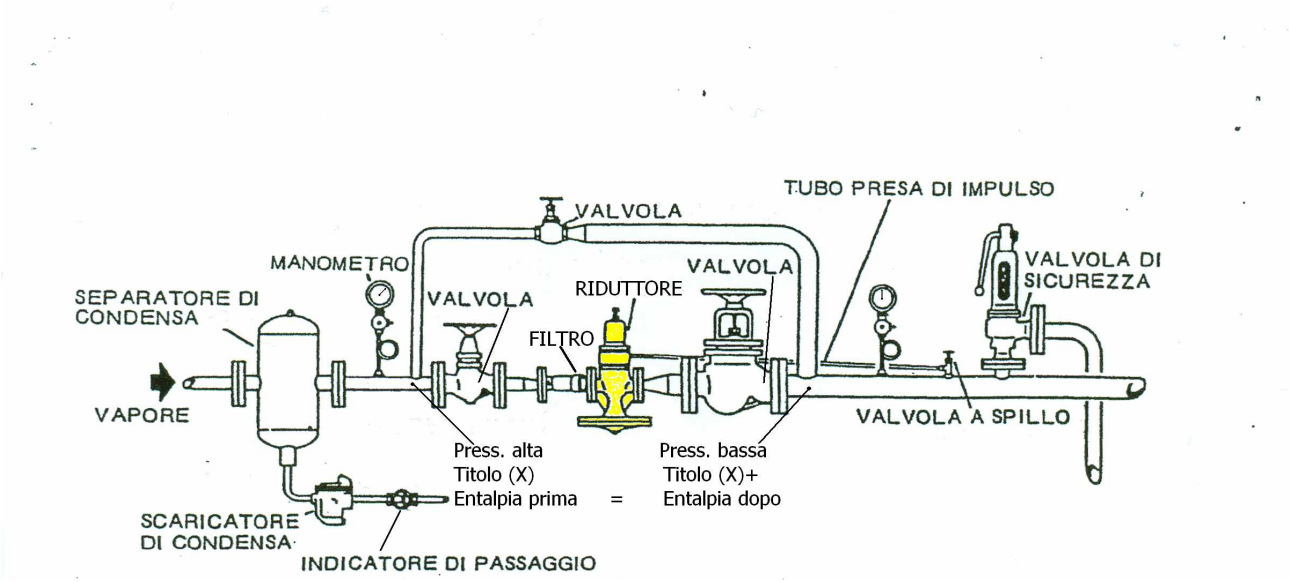
Sull'asse orizzontale il contenuto d'acqua.
Le linee inclinate nel diagramma indicano le varie pressioni di esercizio.
Sull'asse verticale il corrispondente quantitativo di esplosivo.
Nell'esempio un normale generatore di vapore con un contenuto d'acqua di 8 t, con una pressione di esercizio di 10 bar, corrisponde a 200 kg di esplosivo…….una bomba d'aereo della seconda guerra mondiale!



ACCESSORI DI REGOLAZIONE

Riduttori-regolatori di pressione

Se la differenza di pressione fra produzione ed utenza è maggiore di 2 bar siamo obbligati a montare un *riduttore di pressione*.



Schema tipico di gruppo di riduzione di pressione

Riduttore
Press. alta →→→Press. bassa
Titolo (x) →→→ Titolo (x)+
Entalpia prima = Entalpia dopo

Le linee di distribuzione del vapore servono a trasportare vapore alle macchine utilizzatrici e sono ben coibentate per ridurre le perdite di calore.

Le tubazione partono da un *collettore* alimentato dalla caldaia, esse si diramano alle macchine utilizzatrici e hanno un'inclinazione del 1‰ per favorire il deflusso delle condense, in fondo sono dotate di *scaricatori di condensa*.

Prima delle macchine utilizzatrici, sulle linee del vapore vengono montati dei *riduttori di pressione*, i quali possono essere auto azionati (l'apparecchio si autoregola). Il loro compito è quello di ridurre la pressione e come effetto positivo ad avere un aumento del *titolo* del vapore stesso.

- NOTA: Il vapore nascente è la ritrasformazione delle condense in vapore dovuta alla riduzione di pressione.

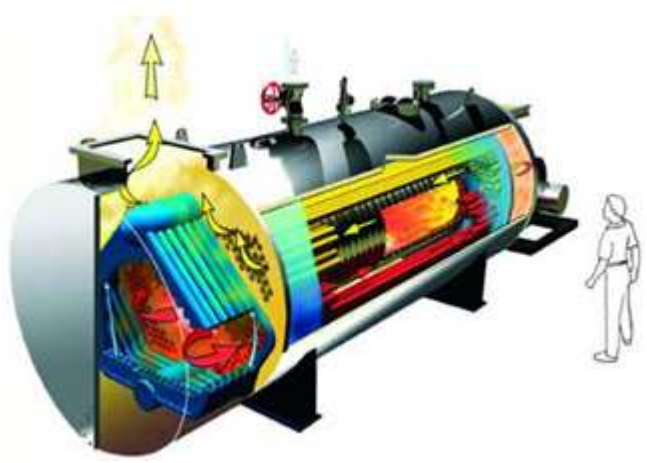
SCAMBIATORI DI CALORE

- **Economizzatori**
- **Preriscaldatori**
- **Surriscaldatori e risurriscaldatori**
- …..*le caldaie stesse*

Lo scambiatore di calore è un dispositivo che consente il trasferimento di calore (energia) da un fluido ad un altro senza che i due fluidi entrino in contatto. Determinante per il funzionamento di uno scambiatore è la differenza di temperatura tra i due fluidi (Δt) e la superficie di scambio disponibile.

-***Economizzatori***, sono apparecchi montati tra la caldaia e camino che servono a utilizzare parte del calore posseduto dal fumo, prima che esso si disperda nell'atmosfera. Tale calore viene ceduto all'acqua di alimento della caldaia migliorando così il rendimento dell'impianto.
Possono essere del tipo a:
-*Economizzatore a tubi lisci* detto Green (è uno dei più vecchi e in disuso)
-*Economizzatore a tubi alettati* sono molto più usati e resistenti costruiti in ghisa o acciaio.

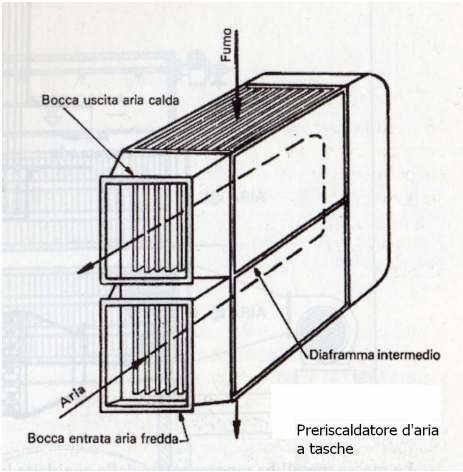
Nota: all'aumento di 1°C dell'acqua corrisponde un abbassamento indicativamente di 3°C della temperatura dei fumi.

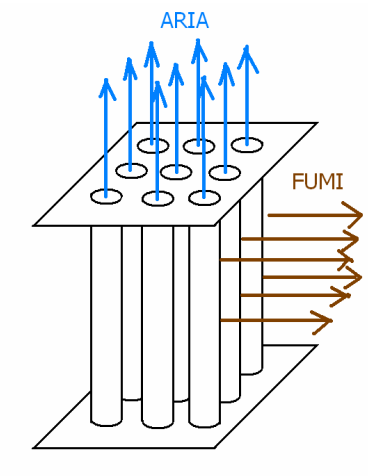


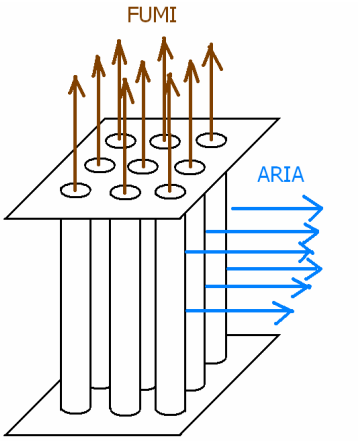
Preriscaldatori d'aria

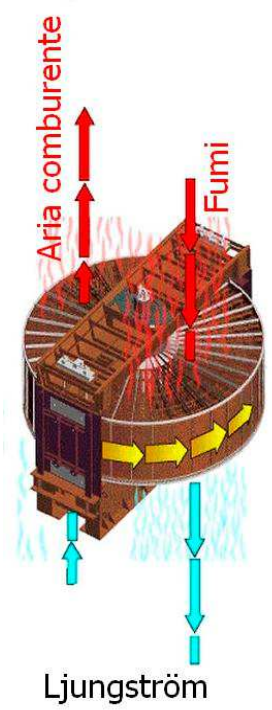
Il preriscaldatore d'aria serve appunto a riscaldare l'aria comburente, sfruttando assieme all'eventuale economizzatore il calore ancora posseduto dai fumi all'uscita dalla caldaia, viene così migliorata la combustione elevando la temperatura della fiamma e diminuendo quindi la possibilità di incombusti.
-Si distinguono in tipi *statici* o *rotanti*.

-**statici → a tasche**
↓
→ **tubolari → a tubi da fumo**
→ **a tubi d'aria**
-**rotanti → Liungström**









Nota: all'aumento di 1°C dell'aria corrisponde un abbassamento di 1°C della temperatura dei fumi.

Surriscaldatori e risurriscaldatori

I surriscaldatori servono a surriscaldare il vapore, cioè a trasformarlo da vapore saturo a vapore surriscaldato.

Sono le uniche parti →vapore-fumo e vapore-fiamma del generatore quindi vengono costruiti con acciai speciali per le elevate temperature.

Sono di due tipi:

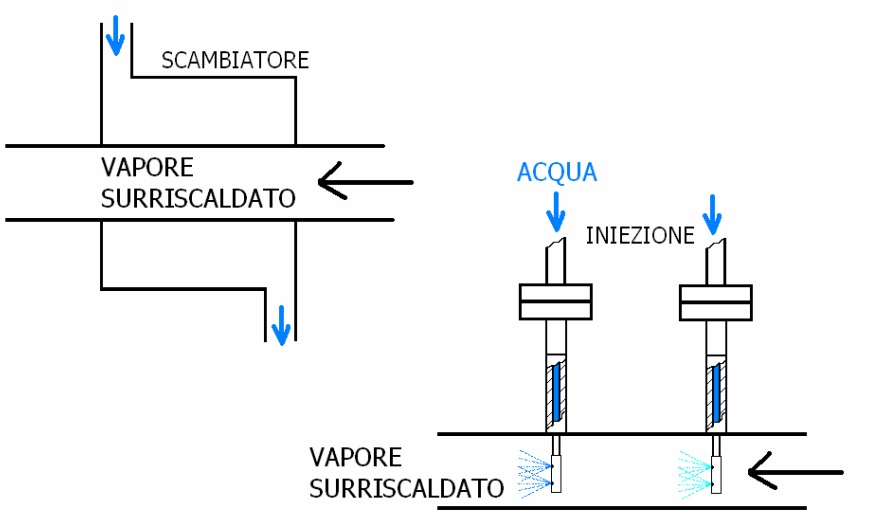
-*irraggiamento* → (quando vedono la fiamma) particolarmente indicati quando il vapore viene impiegato come forza motrice come nel caso delle turbine.

-*convezione* → (sono nel giro fumi) la rete di distribuzione è relativamente lunga ed il vapore saturo è soggetto a parziale condensazione surriscaldandolo di poche decine di gradi migliorando il titolo in questo caso i surriscaldatori prendono il nome di *essiccatori.*

I risurriscaldatori sono costituiti come i surriscaldatori e si differenziano da questi per il diametro dei tubi (pressioni inferiori) e per la qualità del materiale

Attemperatore (desurriscaldatore)

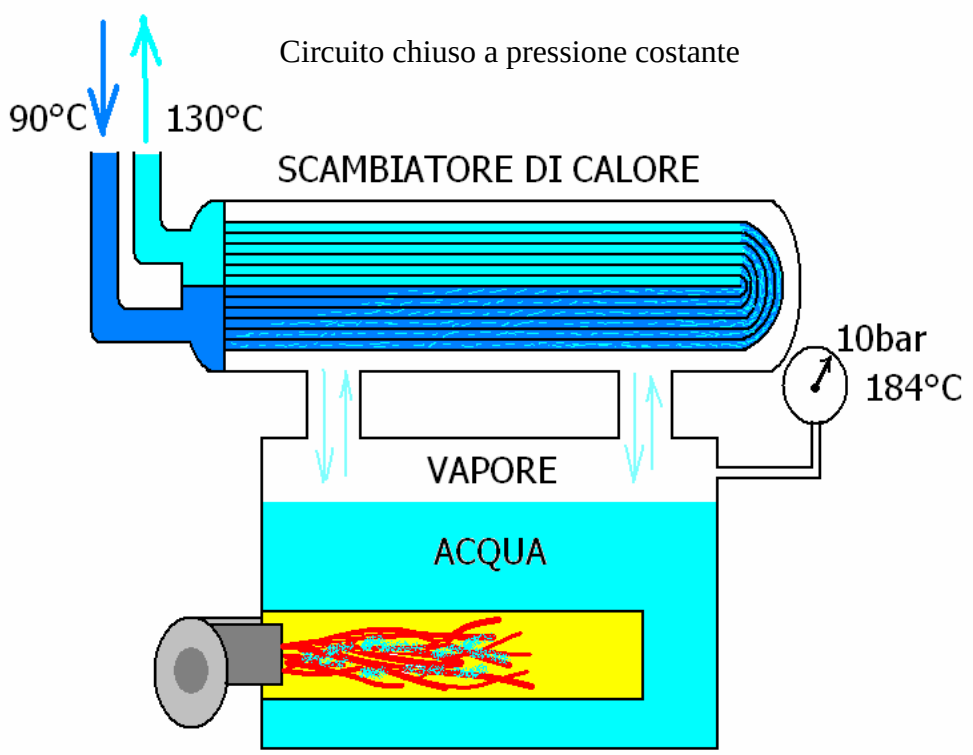
E' molto importante contenere le variazioni di temperatura del vapore surriscaldato entro limiti molto ristretti, sia nei riguardi della turbina, sia per la durata dei tubi stessi. E' necessario perciò regolare la temperatura di surriscaldamento, intervenendo direttamente sul vapore stesso e ciò è possibile in vari modi:

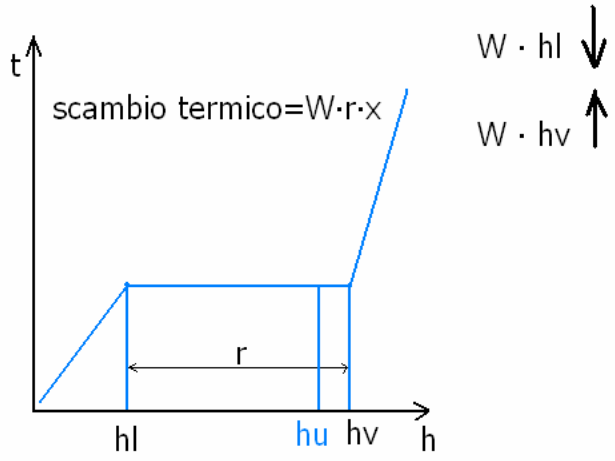


-sottraendo calore al vapore surriscaldato facendolo attraversare uno scambiatore di calore oppure iniettando acqua nel vapore (acqua trattata) in un punto opportunamente scelto.

Ciclo acqua-vapore-acqua in un circuito isolato a pressione costante

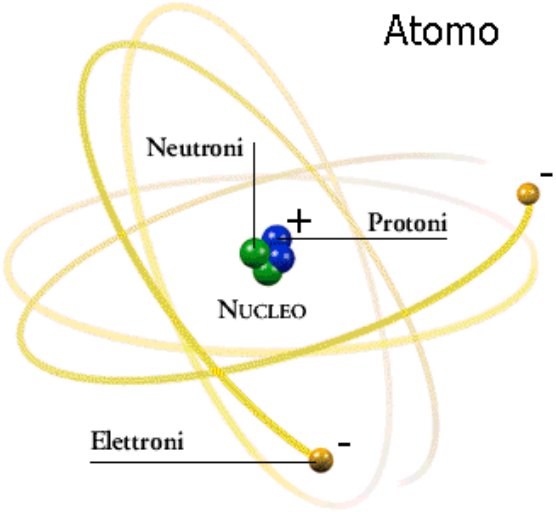
E' un impianto a condensazione costituito da un normale generatore di vapore a cui è sovrapposto uno scambiatore di calore. Il vapore si condensa nel corpo dello scambiatore, ritornando per gravità nel generatore.
-L'acqua passa nei tubi del fascio tubiero, dove si scalda a spese del calore di condensazione.
Questo sistema è generalmente adottato per il riscaldamento di complessi industriali e residenziali.





L'ACQUA NEI GENERATORI DI VAPORE

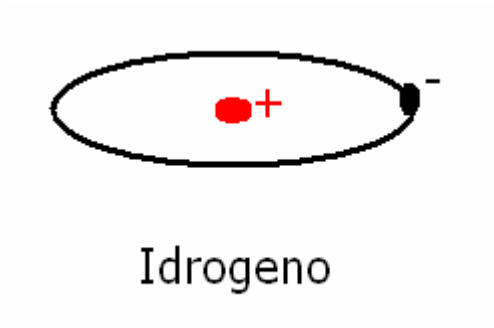
Richiami di chimica



Le sostanze elementari (*elementi*) note sono 102 e in chimica vengono indicate con un simbolo che è formato dalle prime lettere del corrispondente nome latino; ad esempio il rame viene indicato come Cu (Cuprum), il ferro Fe, l'idrogeno come H ecc.

-La parola "**atomo**" significa non divisibile (Democrito); è la più piccola porzione di materia che conserva le caratteristiche di un determinato elemento

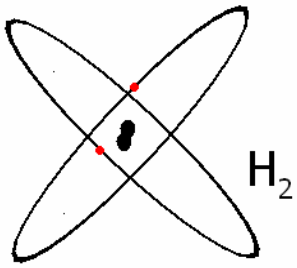
- Protoni: particelle dotate di carica positiva (+)
- Neutroni: particelle elettricamente neutre (prive di carica)
- Elettroni: particelle dotate di carica negativa (-)



ELEMENTO → ATOMO

MOLECOLA → SOSTANZA insieme di atomi uguali o diversi tra loro

La conoscenza della struttura molecolare è importante per lo studio delle reazioni chimiche e a tal fine, accanto al simbolo viene indicato in basso a destra, il numero degli atomi che formano la molecola; si scriverà così [H_2], per indicare che la molecola dell' idrogeno è composta da due atomi.



Nella pratica è difficilissimo trovare sostanze elementari allo stato puro, più facilmente sono mescolate o combinate con altre sostanze. Come si vedrà meglio in seguito, le sostanze elementari si uniscono fra loro formando delle sostanze composte, dalle caratteristiche completamente diverse da quelle di origine.
I composti vengono espressi indicando, secondo precise regole, i simboli dei vari elementi e riportando, per ciascuno, il numero di atomi presenti.

Esempio:

[H_2O]→ si vuole indicare che l'acqua è costituita da [H] idrogeno e [O] ossigeno e inoltre, che in una molecola di acqua vi sono due atomi di idrogeno e uno di ossigeno.

I COMPOSTI – Ossidi e anidridi

Le sostanze elementari si combinano fra loro chimicamente per dare delle sostanze composte la combinazione più significativa è quella delle varie sostanze elementari con l'ossigeno
- metalli + ossigeno = ossidi

esempi :
$Fe_2 O_3$ → ossido di ferro
$Na_2 O$ → ossido di sodio

- non metalli + ossigeno = anidridi
esempi:
CO_2 → anidride carbonica
SO_2 → anidride solforosa

La reazione di una sostanza con l'ossigeno si chiama ***ossidazione***, ed avviene in genere con sviluppo di calore.

Basi e acidi

Due sostanze composte possono reagire fra di loro, dando luogo a sostanze diverse; in particolare è importante vedere come si comportano con l'acqua gli ossidi e le anidridi:
- ossidi + acqua = basi *(o idrossidi o idrati)*

esempio:
$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ Ossido di calcio + acqua → idrato di calcio (calce spenta)
$Na_2O + H_2O \rightarrow 2NaOH$ Ossido di sodio + acqua → idrato di sodio (soda caustica)

- anidridi + acqua = acidi

esempio:
$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$ Anidride solforosa + acqua → acido solforoso
$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ Anidride solforica + acqua → acido solforico

Sali

Gli acidi a loro volta, reagiscono con gli idrati, dando luogo a nuove sostanze che si chiamano **sali.** In queste reazioni si ha anche formazione di acqua.
- idrato + acido = **sale** + acqua

Ricapitolando:

metallo + ossigeno = ossido
ossido + acqua = idrato

non metallo + ossigeno = anidride
anidride + acqua = acido

} idrato + acido = sale + acqua

Soluzioni

Una sostanza composta deriva dall'unione intima, a livello molecolare di sostanze diverse.
Due sostanze possono unirsi fra loro in modo semplice, meno completa, mescolandosi in "soluzione".
Separazione dei componenti → per via chimica (sostanze composte a livello molecolare)
→ per via fisica (sostanze in soluzione cioè mescolate)

In una soluzione si distingue la sostanza che scioglie → ***solvente***, dalla sostanza disciolta → ***soluto***.
Per esempio acqua*(solvente)* e sale*(soluto)*,non separabili con mezzi meccanici.

Una soluzione può essere:
- Insatura, quando il solvente(acqua) contiene meno soluto di quanto potrebbe.
- Satura, l'acqua contiene tutto il soluto che può.
- Soprassatura*, il solvente contiene più soluto di quanto potrebbe.

* L'agitazione del liquido permette ad una soluzione di essere temporaneamente soprassatura. Questa situazione non è stabile, ed il soluto in più poi precipita depositandosi. Inoltre, i limiti di solubilità variano con la temperatura, per es. all'aumentare della temperatura possono aumentare o diminuire, dipende dalle sostanze.
L'acqua contiene anche dei gas disciolti, la capacità di sciogliere i gas è massima a temperature basse e nulla a 100°C.

Gli ioni

Ione è un atomo o una molecola che ha uno o più elettroni in più o in meno rispetto alla condizione di neutralità elettrica.
In alcune soluzioni, e in particolare nelle soluzioni acquose, il soluto non resta sotto forma di molecola, ma si scinde in ioni positivi (cationi) e negativi (anioni).
Esempi (molecole dissociate)
$NaCl = Na^+$ (catione) + Cl^- (anione)
$H_2O = H^+$ (catione) + OH^- (anione)
$NaOH = Na^+$ (catione) + OH^- (anione)

I solventi capaci di esaltare questo fenomeno si dicono polari, l'acqua è un ottimo solvente polare.
La sostanza dissociata si chiama *elettrolita*. Vi sono *elettroliti forti*, che si dissociano completamente ed *elettroliti deboli*, che si dissociano parzialmente.

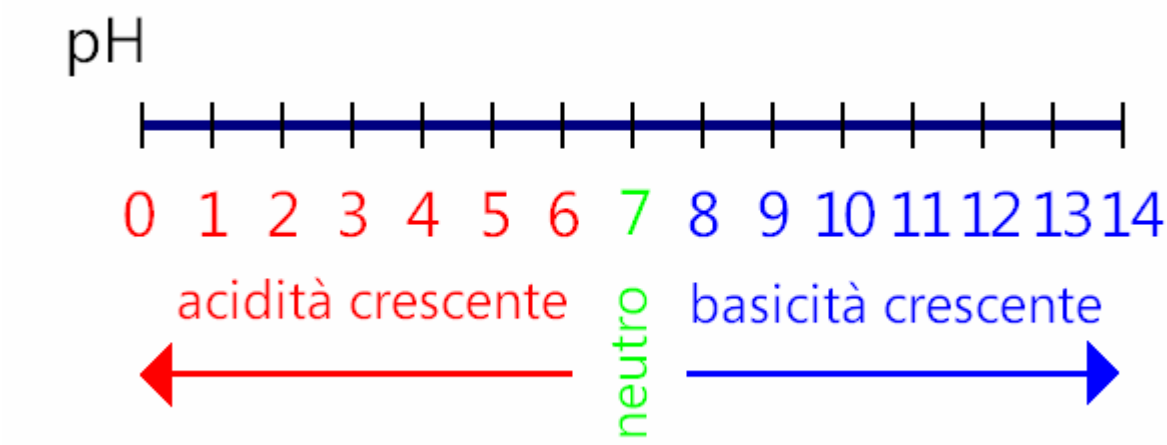
Il pH

L'acqua pura è un elettrolita debole, che si dissocia secondo la reazione:

$$H_2O = H^+ + OH^-$$

Il **pH** è l'indice di concentrazione degli ioni di H^+ e OH^- dissociati, presenti in una soluzione (o semplicemente quali e di quanto prevalgono).
pH 7 = soluzione neutra ioni H^+ e OH^- in uguale numero.
Abbiamo visto che l'acqua è un *forte solvente polare*.

H_2O = H^+ cationi (caratteristica acida di una soluzione) e OH^- anioni (caratteristica basica di una soluzione)



I due estremi sono entrambi corrosivi, ma mentre una corrosione acida provoca dei buchi sparsi sulle tubature, quella basica corrode su tutta la superficie delle tubature, è più difficile da individuare, ma la si può notare sui cordoni delle saldature poiché sono più resistenti.
La scala del pH è una scala logaritmica, quindi la variazione di un numero significa una variazione del valore di 10 volte, di due numeri di 100 volte, di tre numeri di 1.000 volte e così via.

Aggiungendo all'acqua…
…acidi, aumenta la concentrazione degli ioni H^+, quindi il pH scende.
…basi, aumenta la concentrazioni degli ioni OH^-, quindi il pH sale.

Aggiungendo all'acqua Sali, il pH…: ….sale
….resta uguale
….scende
…dipende se è più forte il radicale acido o quello basico del sale.

Esempi di differenza del pH:

Acqua pura a:

Temperatura °C	0°C	18°C	100°C	200°C
pH	**7,45**	**7**	**6,07**	**5,7**

Se noi abbassiamo la temperatura il pH aumenta, se la aumentiamo il pH diminuisce.

Alimentare una caldaia con acqua pura, neutra è pericoloso, perché entrando in caldaia, l'aumento di temperatura porta l'acqua tendenzialmente verso l'acido, rendendo l'acqua corrosiva. Nei GV, si mantiene un pH moderatamente alcalino (basico superiore al 7, tra il 9 e 11).

Sali disciolti

L'acqua piovana è pura (H_2O), ma cadendo, si mescola con la CO_2 presente nell'aria, diventando così:

$H_2O + CO_2 = H_2CO_3$ = acido carbonico

Attraversa il terreno e trova:

$CaCO_3$ carbonato di calcio (calcare) + H_2CO_3 =

= $Ca(HCO_3)_2$ bicarbonato di calcio (sale acido)

In caldaia questi elementi, subiscono la reazione inversa.
Da qui classifichiamo:

Sali incrostanti

- $CaCO_3$ carbonato di calcio
- $MgCO_3$ carbonato di magnesio
- $Ca(HCO_3)_2$ bicarbonato di calcio
- $Mg(HCO_3)_2$ bicarbonato di magnesio
- $CaSO_4$ solfato di calcio
- $MgSO_4$ solfato di magnesio
- $CaCl_2$ cloruro di calcio
- $MgCl_2$ cloruro di magnesio

- silicati e silice

Questi sali sono disciolti, ma in caldaia, per effetto della temperatura, si depositano sui tubi e sul focolare, formando incrostazioni, che provocano il surriscaldamento localizzato delle lamiere, con il rischio di rotture. Oltre alle incrostazioni, queste reazioni chimiche, producono degli acidi, che corrodono le tubazioni.

Le reazioni d'incrostazione

- Il bicarbonato di calcio si scinde divenendo:

$Ca(HCO_3)_2$ entro i 100°C = $CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$

Tutti i *bicarbonato* precipitano entro i 100°C, liberando CO_2 sotto forma di *gas* che non fa danni fino a quando non entra nella rete condense, poiché condensando diventa *acido carbonico*, il quale corrode le tubazioni, portando attraverso il recupero condense, *l'ossido di ferro* (ruggine) in caldaia.

- *Il solfato di calcio*

$CaSO_4 + H_2O$ a più di 100°C =

= $Ca(OH)_2\downarrow$ idrato di calcio + H_2SO_4 acido solforico

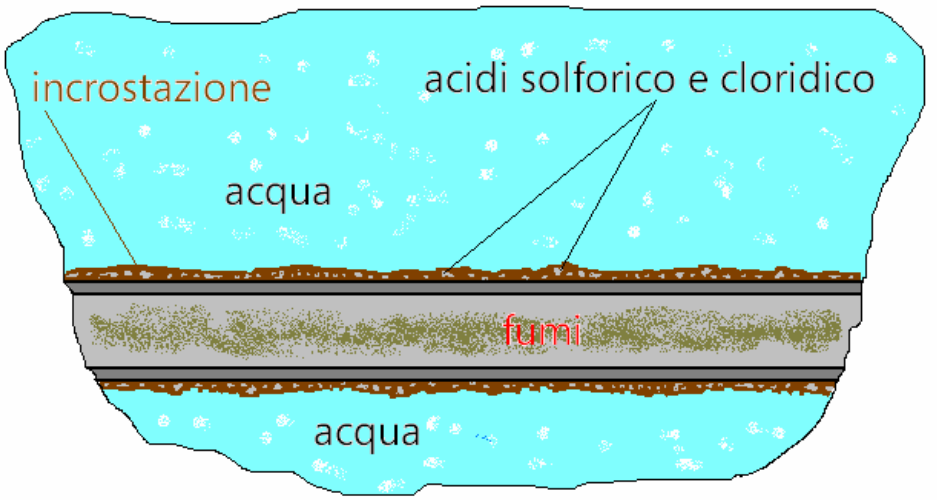
- *Il cloruro di calcio*

$CaCl_2 + H_2O$ entro i 160 – 180°C =

$= Ca(OH)_2\downarrow + Hcl$ acido cloridico

La stessa cosa vale per il magnesio

Gli acidi rimangono incastrati sotto l'incrostazione, dando inizio alle corrosioni



Da ciò si deduce che in una caldaia a vapore avremo tutti e tre i tipi d' incrostazione.
I *silicati e la silice*, in presenza di magnesio, diventano dei cementanti, cioè rendono più dure le incrostazioni, le quali sono molto difficili da eliminare, ci vuole un trattamento chimico di 6- 12 mesi per renderle *amorfe*, dopodiché si può eseguire un lavaggio chimico.

I *silicati e la silice* però in caldaia cristallizzano diventando abrasive e volatili, quindi mescolandosi con il vapore danno problemi a valvole e tubazioni e *alle turbine*.

Definizione di durezza dell'acqua

I sali incrostanti presenti nell'acqua costituiscono la caratteristica che viene definita *durezza* dell'acqua (sali e ossidi di calcio e magnesio).
Si definisce *dolce* un'acqua con pochi di questi sali e *dura* un'acqua con molti di questi sali.
La durezza si divide in due tipi:
durezza temporanea o carbonatica dovuta ai bicarbonati di calcio e magnesio →
sali che si depositano formando incrostazioni entro i 100°C contengono il gruppo CO_3 in forma di
- carbonato: contiene un gruppo CO_3
- bicarbonato: contiene il gruppo HCO_3

$CaCO_3$	carbonato di calcio
$MgCO_3$	carbonato di magnesio
$Ca(HCO_3)_2$	bicarbonato di calcio
$Mg(HCO_3)_2$	bicarbonato di magnesio

durezza permanente o non carbonatica (cloruri e solfati) di calcio e magnesio →
sali che si depositano formando incrostazioni al di sopra dei 100°C

$CaSO_4$ solfato di calcio
$MgSO_4$ solfato di magnesio
$CaCl_2$ cloruro di calcio
$MgCl_2$ cloruro di magnesio
Silicati

durezza totale è la somma delle due durezze, cioè il totale dei sali di Ca e Mg disciolti: carbonati, bicarbonato, cloruri e solfati

Le unità di misura più usate per la durezza:
- p.p.m. o mg/l di CaCO3
- grado francese °Fr (1 °Fr = 10 ppm di $CaCO_3$) → fattore di conversione (1°Fr = 0,56°d)
esistono anche:
- grado tedesco °d (1°d = 17,85 ppm di $CaCO_3$) → fattore di conversione (1°d = 1,79°Fr)
- mval/l (meno usati)

Il più usato è il grado francese (°Fr)

TABELLA Equivalenze tra i gradi di durezza				
	Francese (°Fr)	Tedesco (°d)	mval/l	ppm $CaCO_3$
grado francese	1	0,56	0,2	10
grado tedesco	1,79	1	0,36	17,85
mval/l	0,1	2,8	1	50
ppm $CaCO_3$	0,1	0,056	0,02	1

Effetti sugli impianti delle sostanze contenute nell'acqua

Gli effetti che l'acqua non adeguatamente trattata può causare alle membrature con le quali essa viene a contatto sono:
incrostazioni, corrosioni e fragilità caustica.

Le incrostazioni in caldaia provocano:
- Abbassamento del rendimento
- Aumento della temperatura dei fumi
- Surriscaldamento delle membrature
- Eventuali corrosioni
Perché durezza?
- anomalie nel trattamento delle acque
- inquinamento delle condense

Le corrosioni derivano da due gas: ossigeno (corrosioni in caldaia) e anidride carbonica (corrosioni in tutta la rete vapore e soprattutto condense).
Si evitano con i seguenti sistemi:
- degasazione termica (termofisica) eliminazione dei gas
- sostanze chimiche (catturanti o flocculanti) neutralizzazione chimica
- creazione di film (magnetite) si impedisce il contatto tra il gas e il metallo della caldaia.

La fragilità caustica delle membrature è causata da *alcalinità* eccessiva, superiore ai valori consigliati in base alla pressione di esercizio
Cause di una elevata alcalinità:
- anomalie del trattamento dell'acqua
- anomalie nel condizionamento chimico
- inquinamento delle condense
- regime di spurgo non corretto

L' IMPORTANZA DELLO SPURGO: LA CALDAIA E' UN CONCENTRATORE!

Ossigeno
Corrosioni dovute a insufficiente degasazione o insufficiente condizionamento chimico.

TDS Totale Sali Disciolti
Conducibilità, trattamento difettoso e spurgo insufficiente

Alcalinità e TDS con parametri fuori controllo?
Spurgo e se non basta svuotamento e ripartenza con acqua ok.

Riassumendo:
L'acqua, contiene i sali di durezza e i gas.
- *corrosiva* → fattori determinanti: pH, O_2 e CO_2 disciolti.
- *incrostante* → fattori determinanti: sali Ca e Mg ed in certe situazioni la silice

Inoltre i sali → schiumeggiamenti, ebollizione tumultuosa, trascinamenti e scadimento del titolo e l'infragilimento caustico delle membrature.

TRATTAMENTI DELL'ACQUA

- Fino a 30 bar (tubi da fumo) addolcimento ed osmosi.
- Oltre i 30 bar (tubi d'acqua…..turbine…..centrali termoelettriche) demineralizzazione.

Filtrazione meccanica, quindi:
- pretrattamenti, prima che l'acqua entri in caldaia (impianti di trattamento delle acque).
- trattamenti interni, in caldaia (condizionamento chimico)

Pretrattamenti relativamente ai gas:
Degasazione termica → a pressione atmosferica o in pressione (98°-130°C)

Addolcimento → sostituzione dei sali di calcio e magnesio incrostanti presenti nell'acqua con sali di sodio non incrostanti.

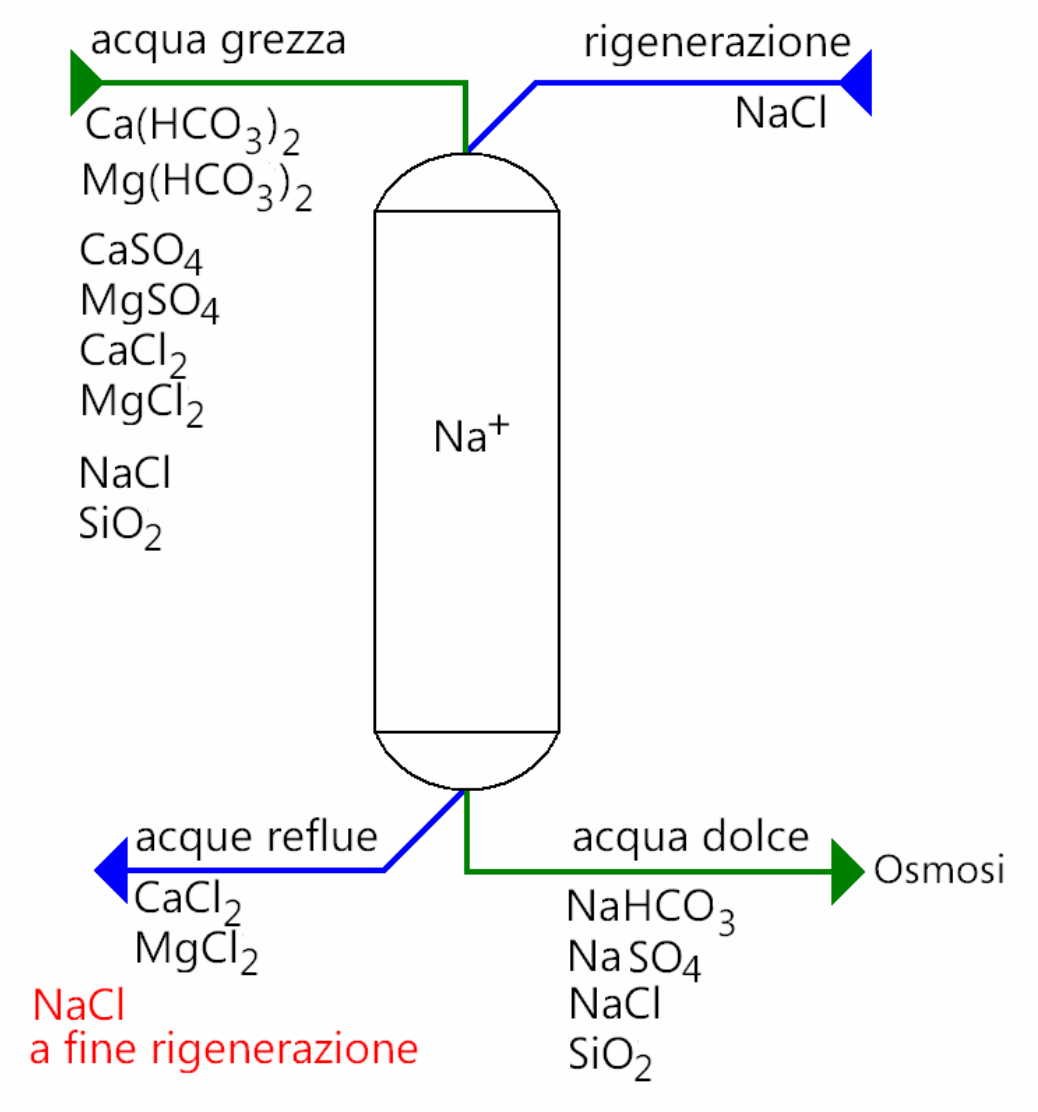
Demineralizzazione → eliminazione di tutti i sali presenti nell'acqua, tramite due scambi ionici successivi con (*piccoli impianti anche senza*) interposta torre di decarbonatazione (eliminazione per strippamento della CO_2).

Schema classico:
1. *Colonna cationica forte in ciclo acido*, toglie i cationi e crea acidi (*trasforma i sali in acidi*).
2. *Torre di decarbonatazione*.
3.*Colonna anionica forte in ciclo di soda caustica*, toglie tutti gli anioni (*cloruri, solfati e silicati*) trasforma gli acidi in acqua. → si può prevedere anche un "*letto misto*" in coda.

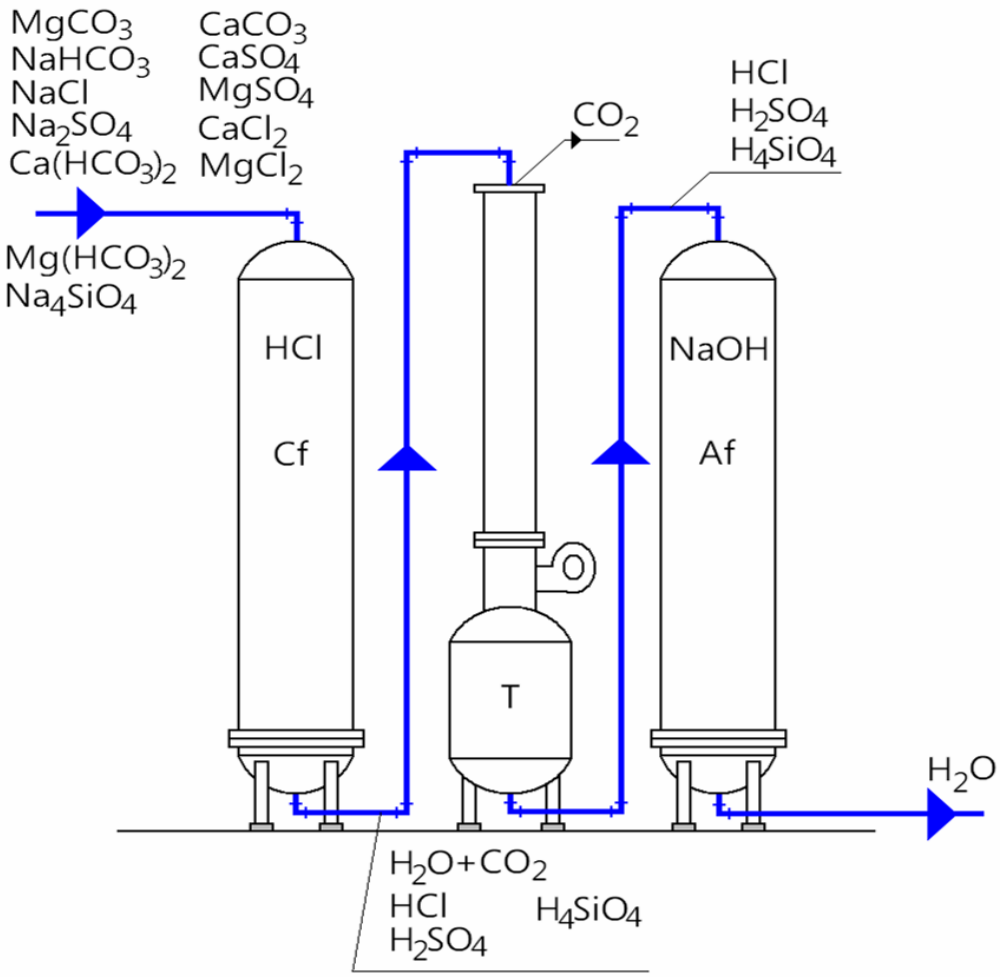
Osmosi inversa → passaggio attraverso la membrana di acqua ma non di sali. Necessita di pressioni rilevanti.
Con un impianto di trattamento ad osmosi, si elimina circa il 95% dei sali presenti nell'acqua.

Trattamenti interni
- correzione del pH
- eliminazione dell'ossigeno
- stabilizzazione dell'ossigeno
- creazione di film protettivo di magnetite

Per il dosaggio preciso dei condizionanti, si utilizzano solitamente pompe per portate piccole e precise a *membrana o peristaltiche*.



Impianto di addolcimento



Impianto di demineralizzazione

Na^{+} → Sodio

Ca^{++} → Calcio
Mg^{++} → Magnesio

HCO_3^{-} → Bicarbonato

CO_3^{--} → Carbonato
SO_4^{--} → Solfato
Cl^{-} → Cloruro

Possibili combinazioni:

$MgCl_2$ → Cloruro di Magnesio
$MgSO_4$ → Solfato di Magnesio
$MgCO_3$ → Carbonato di Magnesio
$Mg(HCO_3)_2$ → Bicarbonato di Magnesio

$CaCl_2$ → Cloruro di calcio
$CaSO_4$ → Solfato di Calcio
$CaCO_3$ → Carbonato di calcio
$Ca(HCO_3)_2$ → Bicarbonato di calcio

$NaCl$ → Cloruro di Sodio
Na_2SO_4 → Solfato di Sodio
Na_2CO_3 → Carbonato di Sodio
$NaHCO_3$ → Bicarbonato di

SCARICATORI DI CONDENSA

E' importantissimo che l'aria, sempre presente nell'impianto fermo e in minor misura trascinata dal vapore venga eliminata, la sua presenza abbassa lo scambio termico ed esalterebbe la corrosione dei metalli e aumenterebbe notevolmente i tempi di messa a regime, a tal scopo vengono usate delle valvole rompivuoto o eliminatori d'aria.

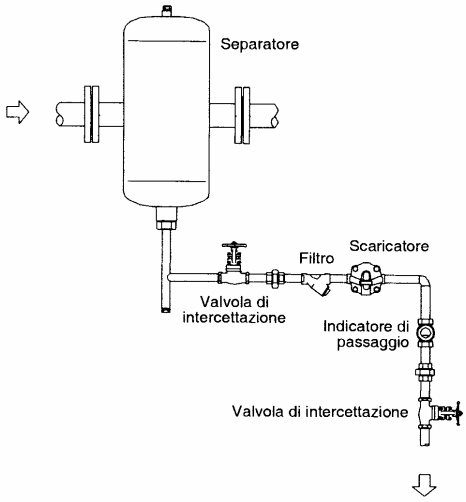


Fig. 1 - Soluzione consigliata per le basso-medie pressioni

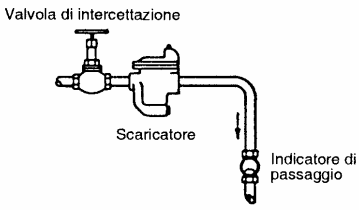


Fig. 2 - Soluzione consigliata per le medie pressioni

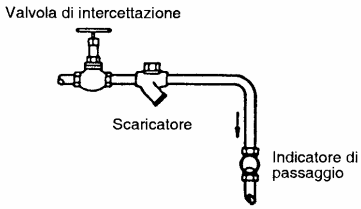


Fig. 3 - Soluzione consigliata per le medie e alto pressioni

Cosa si trova nella linee di vapore?

contenuto	forma	temperatura
vapore	aeriforme	caldo
condensa	liquido	+/- caldo
aria	aeriforme	fredda

La qualità del vapore (privo d'aria e quanto più secco possibile) è di estrema importanza per la massima resa negli apparecchi utilizzatori.
Nelle utenze si verifica il passaggio inverso a quello avvenuto nel generatore, è fondamentale che lo scambio termico avvenga nel minor tempo possibile, evitando che tra il vapore e la parete metallica di separazione con il materiale da riscaldare si frapponga condensa o uno strato d'aria.
Ecco la necessità di disporre di efficaci scaricatori di condensa ed eliminatori d'aria.

Lo scaricatore di condensa è una valvola automatica che elimina la condensa e trattiene il vapore, ne esistono di diversi tipi e ciascuno dei quali ha precise caratteristiche con pregi e limitazioni da adottare in base alle proprie esigenze.
Scaricatori di condensa:

- **Meccanici** ► *a galleggiante*
  ► *a secchiello rovesciato*
- **Termostatici** ► *bimetallici*
  ► *a pressioni equilibrate*
  ► *a tensione di vapore*
- **Termodinamici** ► *a labirinto*

- Meccanico a galleggiante: → scarico condensa continuo; adatto per processi con regolazione automatica.
- Meccanico a secchiello rovesciato → scarico a raffiche, non adatto per processi con regolazione automatica, resistente alle condense, corrosione e colpi d'ariete.
- Termostatico bimetallico → scarico a raffiche; inerzia termica, buono scaricatore d'aria, adatto per scarico condensa da tubazioni in genere.
- Termostatico a pressioni equilibrate (tensione di vapore) → scarico a raffiche; inerzia termica, teme i colpi d'ariete e le condense corrosive, ottimo scaricatore d'aria.
- **Termodinamico** a labirinto → adatto per scarico di tubazioni e collettori ad alta pressione e per processi con regolazioni non automatica.

Scaricatore meccanico a secchiello rovesciato

Scaricatore termostatico a tensione di vapore

Scaricatore termodinamico a disco

Qualunque sia il tipo di scaricatore impiegato, una sua corretta installazione prevede l'impiego di una o due valvole di intercettazione, di un indicatore di passaggio per controllare il buon funzionamento, di una valvola by-pass qualora non sia accettabile neppure una breve sosta e qualora lo scaricatore ne sia sprovvisto, di un filtro da installare immediatamente a monte.

REGOLATORI DI LIVELLO

Regolatori di livello - Livellostati

I regolatori li livello sono delle apparecchiature automatiche aventi lo scopo di mantenere il livello dell'acqua nel generatore o costante o compreso entro un definito intervallo. I regolatori di livello (*livellostati*) posoono essere:

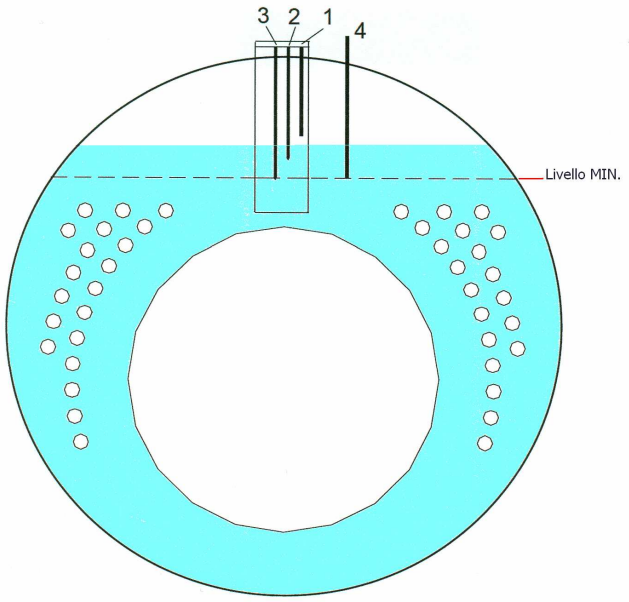
- **Continui** → MODULANTI
- **Discontinui** → ON-OFF

-*I regolatori di livello continui*, man mano che procede l'evaporazione dell'acqua nel generatore, ne fanno entrare di nuova in modo da mantenere quasi costante il livello; in un generatore provvisto di tale tipo di regolazione le pompe di alimentazione sono sempre in funzione e il regolatore di livello comanda una valvola (*modulante*) posta sulla tubazione di mandata delle pompe, chiudendola o aprendola più o meno secondo la richiesta di vapore.(es. COPES)

-*I regolatori di livello discontinui*, invece, comandano l'avviamento delle pompe di alimentazione, quando il livello nel generatore raggiunge un minimo prefissato e l'arresto quando il livello raggiunge il livello massimo prefissato.(es. magnetrol – sonde – galeggiante)

Regolatore di livello di sicurezza (o di blocco)

Si intendono con questo nome i livellostati (del tutto analoghi a quelli di tipo discontinuo) che hanno la funzione di interrompere l'alimentazione del combustibile al bruciatore, al raggiungimento del livello minimo.
Il ripristino manuale è possibile, solo dopo la eliminazione delle cause del blocco.



Nella figura accanto regolatore automatico di livello di tipo (discontinuo) a conducibilità elettrica con relè elettronici posti nel quadro elettrico, il funzionamento prevede l'avviamento e l'arresto della pompa alimento e due sicurezze per basso livello.

Sonde:

1. Arresto pompa
2. Partenza pompa
3. 1a sicurezza blocco bruciatore ed allarme
4. 2a sicurezza blocco bruciatore ed allarme

MEZZI DI ALIMENTO

Vecchio Regolamento:
-L'art.21 del R.D. 12 maggio 1927, n.824 prescrive che: ogni generatore deve disporre minimo di due mezzi (pompe) di alimentazione e questi due mezzi devono essere azionati da fonti di energia diversi. Ogni pompa (o mezzo) deve avere prevalenza adeguata e portata prescritta, ognuno deve fornire almeno il doppio dell' acqua necessaria.

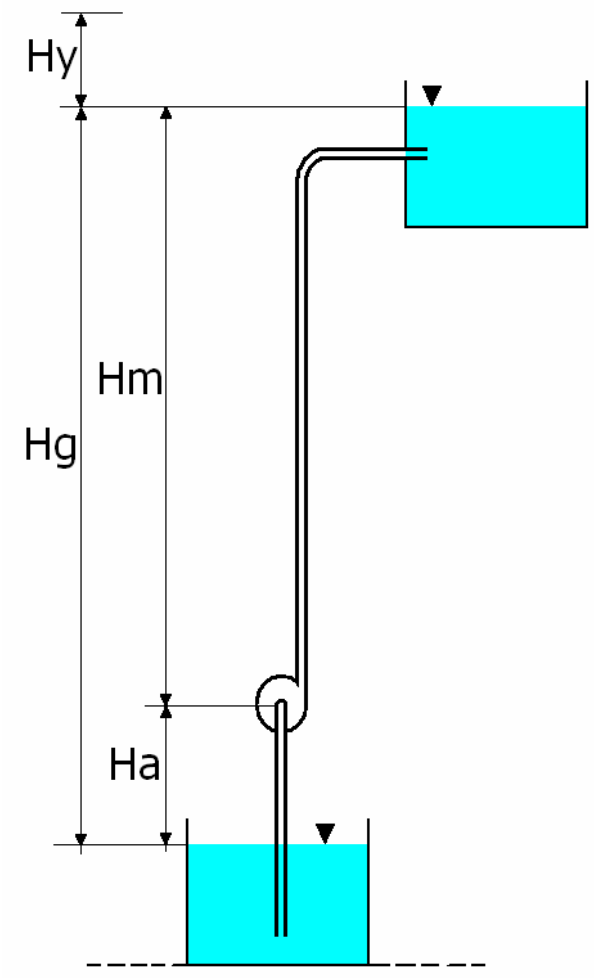
Esempio:

POMPA ALIMETAZ.1
Corrente →Fornitore Enel

POMPA ALIMETAZ.2
Corrente →Fornitore (altro)
Gruppo elettrogeno
Vapore

-Portata: si definisce *portata* la quantità di fluido (in volume, massa o peso) che fluisce nell'unità di tempo dalla sezione terminale dell'apparecchio di alimentazione; si esprime in m^3/s, m^3/h, l/s, t/h.

-Prevalenza: è l'incremento di energia acquisita da 1kg di fluido fra l'entrata e l'uscita della pompa: è l'energia ceduta al fluido mentre questo attraversa la pompa.



Hg = altezza geodetica (diff. quota di prelievo)
Ha = altezza pompa
Hm = altezza di mandata (o monometrica)
Hy = perdite di carico (idrauliche)

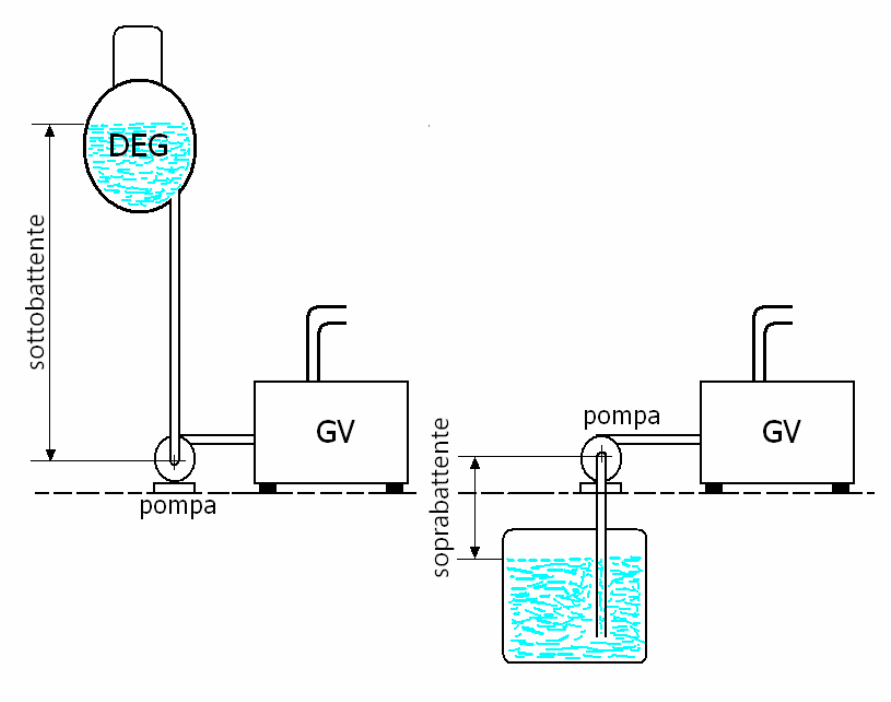
H = prevalenza della pompa
Hpb = prevalenza pressione di bollo

H = Hm + Ha + Hy → Hg + Hy

Nel caso caldaia vale il discorso:

H = Hg + Hy + Hpb

Le prevalenze si esprimono in [m] →m.c.a.
1 bar = 10,2 mca



POMPE

-Pompe centrifughe (sono le più utilizzate)
-Iniettore (GV tubi da fumo)
-Cavallino (GV tubi d'acqua)
-Turbo pompa (grandi tubi d'acqua e grandi pressioni)

Dimensionamento dei mezzi di alimentazione

[VR] Vecchio Regolamento: **Q = 2 · W** → (doppio della producibilità)

Q = 2 · W →[kg/h]

H = Hpb + Hg + Hy →mca dove Hpb (in bar moltiplicati per 10,2 mca)
Hg (effettiva differenza di altezza se negativo considero =0)
Hy (se dato non fornito si ipotizza tra 3 e 10 m)

Per i generatori di vapore aventi producibilità specifica [Ws] superiore a 20kg/m²h il dimensionamento degli apparecchi di alimentazione viene fatto secondo quanto prescritto dal [NR] Nuovo Regolamento vedi: (TABELLA) che è in funzione della producibilità massima

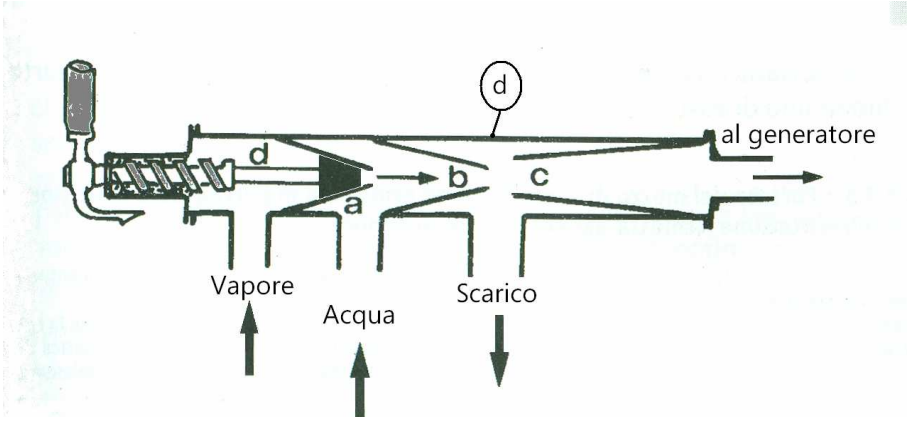
[NR] Nuovo Regolamento: **$Q_{richiesta}$ = W** **$Q_{prescritta}$ = W · %(a tabella)**

Qr = W →[kg/h] Qp = W · %tabella →[kg/h]

H(di Qrichiesta) = Hpb + 5%Hpb +Hg +Hy

H(di Qprescritta) = Hpb + Hg + Hy

INIETTORE



Gli iniettori usano come fonte di energia lo stesso vapore prodotto dal generatore. Essi trasformano l'energia cinetica (dovuta alla velocità), posseduta dal vapore fluente, in energia di pressione capace di immettere acqua nel generatore
Condizione fondamentale per il buon funzionamento è la condensazione completa del vapore. Ne segue che la temperatura dell'acqua di alimentazione non può superare un valore limite determinato dal tipo di iniettore, dalla pressione del vapore e dalla posizione dell'iniettore rispetto alla vasca di alimentazione. Con acqua in aspirazione, gli iniettori funzionano solo se il dislivello non è superiore ai 3÷4 m, e se l'acqua non supera i 40°C. Gli iniettori funzionano meglio se l'acqua cade su di essi , cioè se la vasca di alimentazione è posta più in alto rispetto all'iniettore.

Numero dell'iniettore **(d)**→ E' il diametro minimo del cono divergente (c) espresso in millimetri.
La portata [Q] di un iniettore, per pressioni superiori a 8 bar è data dalla formula:

$$\mathbf{Q = d \cdot d \cdot 100}$$

Ad esempio un iniettore avente numero 12 ha una portata di:

$Q = 12 \cdot 12 \cdot 100 = 14.400$ l/h → kg/h

Se per esempio avessi un generatore con W = 8 t/h ed il regolamento dice che $Q = 2 \cdot W$

W = 8 t/h → 8.000 kg/h $2 \cdot 8.000 = 16.000$ kg/h

quindi Q dell'iniettore è insufficiente perché 14.400 kg/h < 16.000 kg/h

se:

$Q = d \cdot d \cdot 100$ →→→→→ $\mathbf{d = \sqrt{Q/100}}$

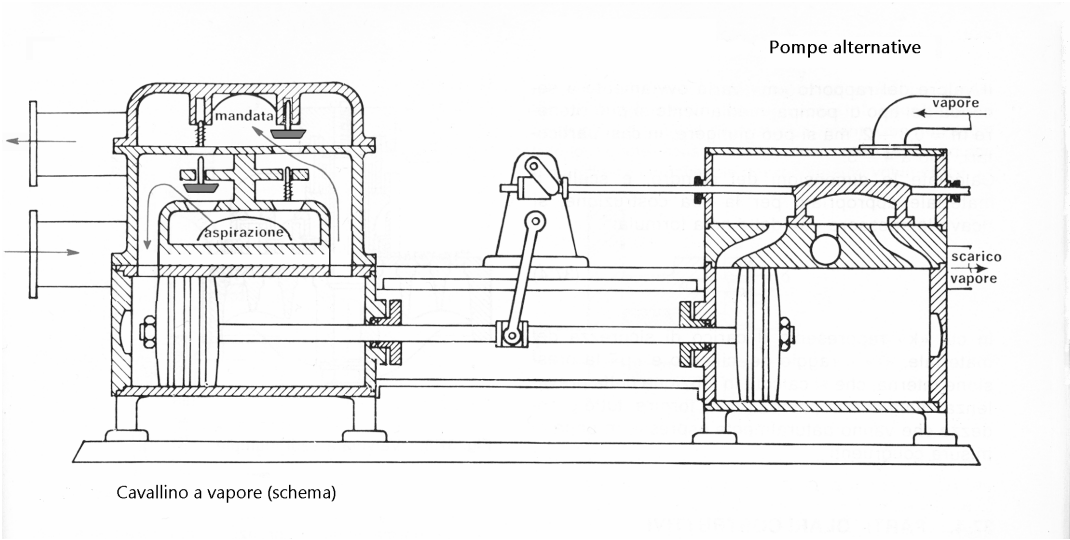
Allora (d) deve essere: $d = \sqrt{16000/100} = 12{,}6$ →→→→ quindi un iniettore con numero 13

Messa in funzione dell' iniettore

1. Spegnere la pompa e chiudere la valvola (a valle sul tubo di alimento).
2. Aprire la valvola di acqua alimento iniettore.
3. Aprire leggermente il tappo di regolazione dell'iniettore.
4. Aprire completamente la presa vapore dell'iniettore.
5. Aprire la valvola mandata dell'iniettore.
6. Regolare la quantità di vapore con il tappo fino all'innesco.

CAVALLINO A VAPORE *(Pompa alternativa)*

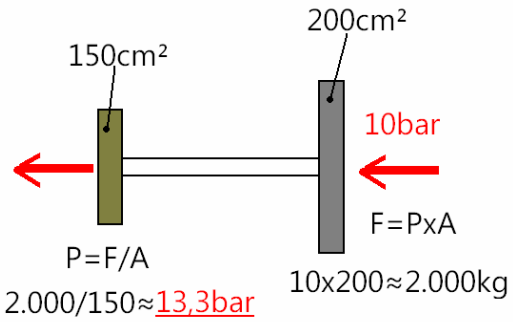
E' una pompa alternativa a doppio effetto.



Si usano generalmente sulle caldaie a tubi d'acqua.
Le pompe alternative sono caratterizzate da una portata fluttuante, poiché spingono il liquido nella tubazione di mandata soltanto durante la fase di compressione; possono conferire al liquido prevalenze altissime, non raggiungibili con altri tipi di pompe, ma data la presenza di vari organi dotati di moto alterno sono alquanto lente. La portata è in genere bassa ed è appunto per aumentare la portata e renderla più costante possibile che vengono costruite pompe a più stantuffi (ad esempio le duplex a due stantuffi o triplex a tre stantuffi). Quando la pompa a stantuffo viene azionata direttamente da una motrice alternativa a vapore viene chiamata comunemente *pompa a vapore* o *cavallino*.(figura sopra)

Domande possibili all'esame:

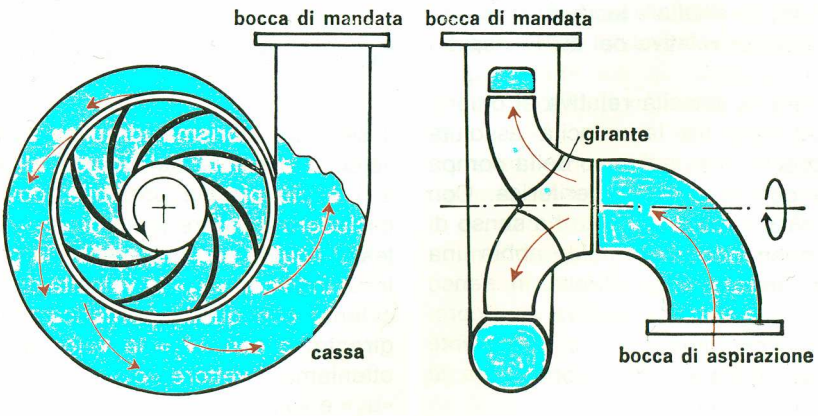
1. (Guardando la pompa a cavallino) Qual è il lato vapore? Risposta: Il lato vapore è dove si vede lo scarico delle condense ed inoltre il leverismo in alto che comanda il cassetto di distribuzione della motrice.
2. Principio di funzionamento? Risposta: Il pistone della motrice ha sempre un diametro maggiore di quello del pistone della pompa in modo da imprimere al liquido una pressione superiore a quella del vapore e permettergli di entrare nel generatore.



Nota per contro si ha un notevole consumo di vapore si può arrivare anche al 3% della potenza del generatore.
E' bene installare sulla tubazione di mandata tra la pompa a stantuffo e il gruppo alimentazione una valvola di sicurezza.

POMPE CENTRIFUGHE

Le pompe centrifughe sono le più diffuse per l'alimentazione dei generatori di vapore (ed in generale), sia per la loro semplicità di costruzione e di funzionamento, sia per la possibilità di accoppiamento diretto a motori elettrici e a turbine a vapore.

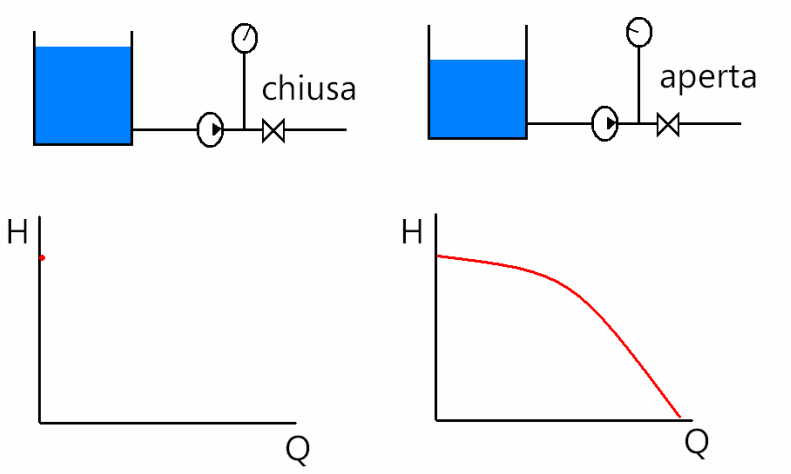


Schema di una pompa centrifuga

La pompa centrifuga è costituita da una *girante palettata* che ruota attorno a un asse dentro una *carcassa a forma di chiocciola*. La girante con la sua elevata velocità di rotazione, spinge il liquido (compreso tra le palette) verso la periferia, per effetto della forza centrifuga che si sviluppa nella rotazione, tale spostamento provoca al centro di essa una depressione che richiama altro liquido dalla tubazione di aspirazione in esso collegata. La carcassa a forma di chiocciola che circonda la girante, convoglia il liquido alla tubazione di mandata, trasformando l'energia di velocità in energia di pressione; gli organi sono dotati di movimento rotatorio e quindi non esistono le limitazioni proprie delle macchine alternative.La pompa centrifuga è caratterizzata da alta portata ed elevato regime di rotazione ma valori di prevalenza modesti. Quando si richiede un'alta prevalenza si ricorre, oltre che all'aumento di numeri di giri, alle cosiddette pompe multistadio

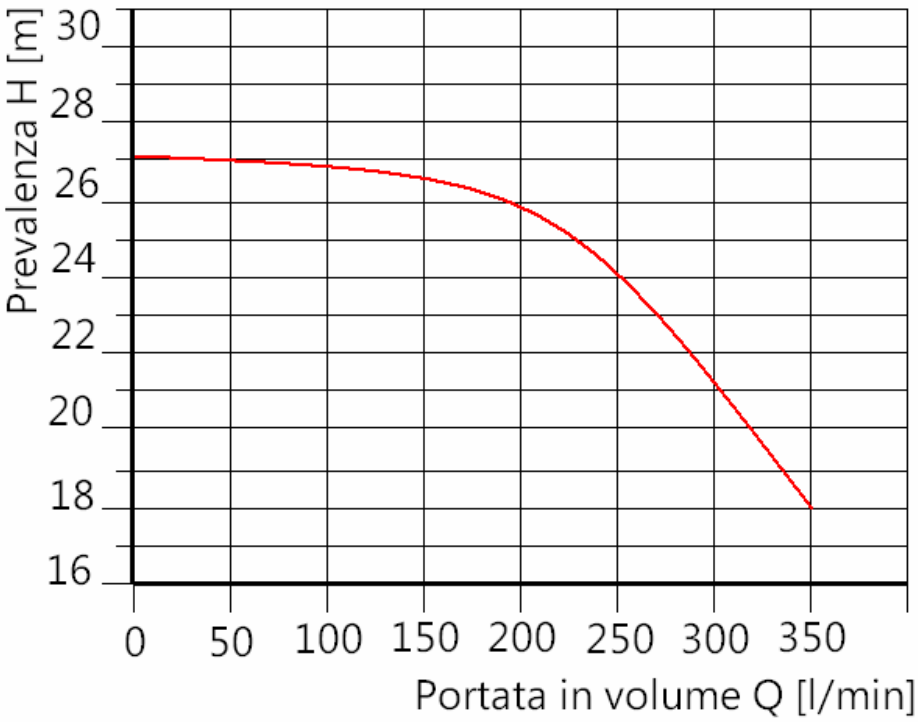
L'acqua uscendo dalla prima girante attraverso un opportuno raccordo, entra nella seconda girante e così via, fino all'ultima girante. La prevalenza impressa all'acqua della prima girante meno le perdite, viene addizionata a quella che gli verrà impressa dalla seconda girante e così per tutte le altre.(foto sopra un tipo di pompa multistadio)

In una pompa centrifuga la portata **Q** e la prevalenza **H** sono in relazione tra di loro nel senso che al variare di una di esse varia anche l'altra. La variazione della prevalenza in funzione della portata, a un dato numero di giri, viene indicata in un diagramma con una curva che prende il nome di: *curva caratteristica*. (vedi esempio sotto)



Curva caratteristica di una pompa centrifuga

Dall'esame del diagramma (vedi sotto) si deduce che all'aumentare della portata diminuisce la prevalenza.



Nota: ogni pompa centrifuga ha la sua curva caratteristica propria e da questa dobbiamo essere in grado di stabilire la pompa adatta alle nostre esigenze rispettando la normativa vigente.

Esempi di dimensionamento mezzi di alimento

TABELLA di portata prescritta del mezzo di alimentazione principale in percentuale della portata di acqua di alimentazione richiesta dal generatore di vapore

Produzione massima del GV	**Percentuale della portata di acqua di alimentazione**	
	Senza regolazione automatica*	Con regolazione automatica**
Fino a 1 t/h	200%	200%
Oltre 1 t/h fino a 5 t/h	160%	130%
Oltre 5 t/h fino a 50 t/h	125%	115%
Oltre 50 t/h fino a 100 t/h	115%	105%

* (es. iniettore)
** (es. pompa centrifuga)

Esempio

W = 3 t/h
S = 130 m²
Pb = 12 bar
Hg = 5 m
Hy = 10 m

[VR]

W = 3 t/h = 3.000 kg/h
Ws = W/S = 3.000 / 130 ≈ 23 kgvap/m²h
Q = W · 2 = 3.000 · 2 = 6.000 kg/h

1 bar = 10,2 mca
Pb = mca → 12 · 10,2 ≈ 122,5
H = Hpb +Hg + Hy = 122,5 + 5 + 10 = 137,5 mca

Nel caso l'iniettore dovrebbe avere N = d

Q = d · d · 100 d = √ Q / 100 = √ 6.000 / 100 = √ 60 ≈ 7,74 → d = 8

[NR]

Q = Qr = 3.000 kg/h
Qp = Qr · 130 / 100 = 3.000 · 1,3 = 3.900 kg/h (con reg. aut.)
Qp = Qr · 160 / 100 = 3.000 · 1,6 = 4.800 kg/h (non reg. aut.)

H alla Qr = Hpb + 5%Hpb + Hg + Hy = 122,5 + 6,12 + 5 + 10 ≈ 143,6 mca
H alla Qp = Hpb + Hg + Hy = 122,5 + 5 + 10 = 137,5 mca

COLPO D'ARIETE

Il colpo d'ariete è un'onda di pressione dovuta alla velocità ed alla massa di un fluido in transito in una tubazione;
Energia cinetica → ($Ec = 1/2 \cdot m \cdot v^2$)

varia a seconda del tipo di fluido:

- Fluido elastico (gas – aria – vapore)
- Fluido incomprimibile e non elastico (acqua – olio – liquidi in genere)

Il colpo d'ariete si origina a causa delle variazioni di portata e quindi della velocità.
-E' l'esempio di quando si chiude rapidamente una valvola su una linea in cui passa del liquido, la colonna liquida si deve arrestare in un tempo molto breve ed esercita una forza notevole sulla valvola questo è il *"colpo d'ariete"*. L'effetto può essere molto distruttivo e comportare la rottura della valvola o della linea.
Il metodo più efficace per evitare il *colpo d'ariete* è di limitare la velocità di chiusura della valvola.

Nel nostro caso è indispensabile evitare che si formino accumuli di condense lungo le linee di distribuzione per cui verifiche sugli scaricatori di condensa mantenendoli sempre efficienti.

Eserczio

W = 20 t/h
S = 400 m²
Pb = 19 bar
Pes = 15 bar
tH_2O_{alim} = 98°C
X = 0,97
Hg = 4 m
Hy = 12 m

Calcolare:
Ws;
Potenza utile Pu;
mezzi di alimento iniettore con [VR] e [NR] quindi Qr - Qp - Hr – Hp;
mezzi di alimento pompa centrifuga con [VR] e [NR] quindi Qr - Qp - Hr – Hp;
Fondoscala manometro min e max

Svolgimento:
trasformo le t/h in kg/h → W = 20 t/h = 2.000 kg/h
calcolo Ws = W / S = 20.000 / 400 = 50 kgvap/m²h

Calcolo ha = 98 · 4,186 = 410 kJ/kg
Pass = Pes + 1 bar = 15 + 1 = 16 bar
Dalle tabelle ricavo hl e hv → hl = 858,6 kJ/kg hv = 2.791,7 kJ/kg t = 201,4°C
Calcolo r = hv – hl = 2.791,7 – 858,6 ≈ 1.933 kJ/kg
Calcolo hu:
hu = (1-x) · hl + x · hv → (1-0,97) · 858,6 + 0,97 · 2.791,7 = 2.733,7 kJ/kg
hu = hl + r · x = 858,6 + 1.933 · 0,97 ≈ 2.733,6 kJ/kg
adesso calcolo la Pu = W · hu – ha / 3.600 = 20.000 · 2.734 – 410 / 3.600 = 12.911 kW = 12,9 MW

Fondoscala manometro → min = Pb · 1,25 = 19 · 1,25 = 23,75 bar max = Pb · 2 = 19 · 2 = 38 bar

Mezzi alimento con [VR]

Q = W· 2 = 20.000 · 2 = 40.000 l/h

Trasformo i bar in mca → 1bar = 10,2mca quindi Pb · 10,2 = 19 · 10,2 = 193,8 mca
H = Hpb + Hg + Hy = 193,8 + 4 + 12 = 209,8 mca

Trovo N dell' iniettore N = d se Q = d · d · 100 avremo che d = √ Q / 100
d = √ 40.000 /100 = 20

Mezzi alimento con [NR]

Qr = Q
Qp = Qr · 125 / 100 = 20.000 · 1,25 = 25.000 l/h (senza regolaz)
Qp = Qr · 115 / 100 = 20.000 · 1,15 = 23.000 l/h (con regolaz)

H alla Qr = Hpb + 5%Hpb + Hg + Hy = 193,8 + 9,69 + 4 + 12 ≈ 219,5 mca
H alla Qp = Hpb +Hg + Hy = 193,8 + 4 + 12 = 209,8 mca

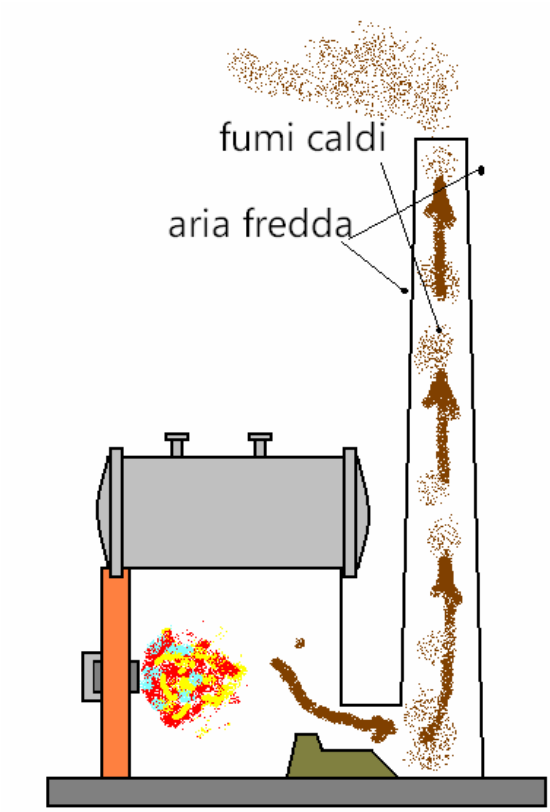
Trovo N dell’ iniettore $N = d$ se $Q = d \cdot d \cdot 100$ avremo che $d = \sqrt{Q / 100}$

Nel caso di Qp dove $Qp = Qr \cdot 1{,}25$ per cui:

$d = \sqrt{25.000 / 100} \approx 15{,}81$ per cui deve essere $d = 16$>

TIRAGGIO E CAMINI

Nello studio della combustione si è compresa la necessità di fornire al combustibile un adeguato quantitativo d'aria. L'aria entra nella camera di combustione, richiamata dalla depressione che vi si forma. Per ottenere questa depressione è necessario che i prodotti della combustione uscenti dalla caldaia vengano scaricati all'atmosfera ad una quota superiore a quella della caldaia tramite un condotto chiamato *camino*. La differenza di pressione fra i gas in uscita e l'aria in ingresso si definisce *tiraggio*, ciò garantisce il movimento della massa gassosa costituita, all'ingresso del focolare dall'aria comburente e all'interno e all'uscita del generatore dai fumi.



Tiraggio naturale

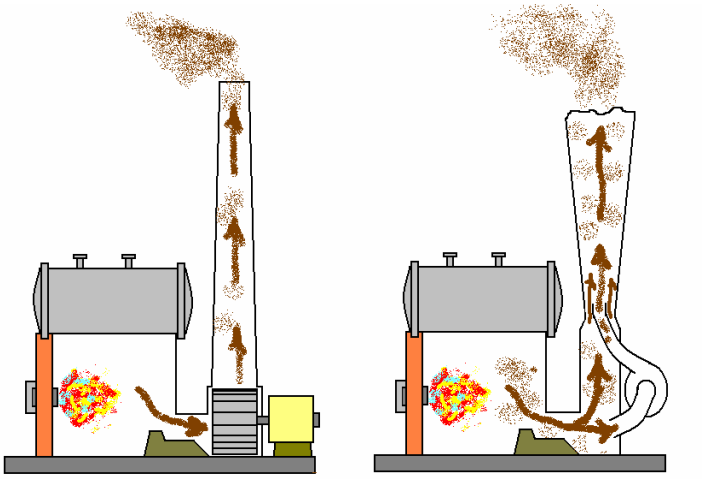
Fattori influenti:

- Altezza camino
- Sezione camino
- Temperatura fumi
- Temperatura aria
- Isolamento del camino

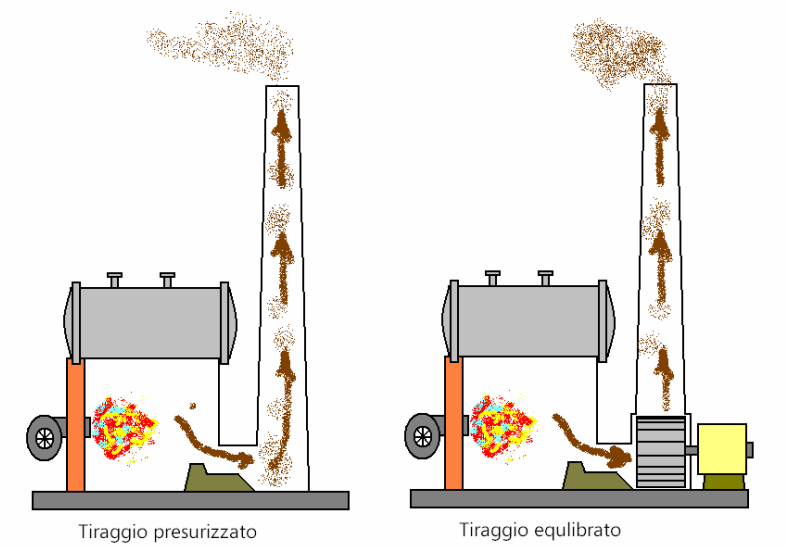
Tiraggio naturale: tale tiraggio è tanto più grande, quanto più alto è il camino e quanto è maggiore la differenza di temperatura tra i fumi e l'aria. Mediamente può valutarsi in 0,05 mbar (0,5 mm.c.a. millimetri colonna acqua) di depressione per ogni metro d'altezza del camino; Non è possibile ottenere depressioni superiori a 5÷10 mbar (100 mm.c.a.).
Infatti aumentando l'altezza del camino, si incrementa la differenza tra colonna calda e colonna fredda, ma cresce anche la resistenza al moto del gas, per cui c'è un limite alla convenienza nell'aumento dell'altezza.
-Da quanto esposto si deduce facilmente che per le caldaie industriali, nelle quali i gas sono a temperature alquanto basse che sono corredate di molti apparecchi scambiatori di calore i quali provocano notevoli perdite di carico è assolutamente impossibile ottenere l'ingresso dell'aria comburente e l'evacuazione dei fumi ricorrendo al solo effetto *naturale*. E' quindi necessario ricorrere all'ausilio di mezzi meccanici, vale a dire *ventilatori*.

Tiraggio forzato, esso può essere diviso in quattro tipi:

- Tiraggio aspirato
- Tiraggio indotto
- Tiraggio equilibrato (o compensato)
- Tiraggio pressurizzato (o soffiato)



Tiraggio aspirato: si realizza mediante un ventilatore posto alla base del camino, che aspira i fumi della caldaia e li aspira quindi nel camino.
Tiraggio indotto: si ha installando tra la caldaia e il camino un ventilatore che aspira una parte del fumo e lo spinge nel camino stesso mediante una specie di iniettore. Il fumo soffiato nel camino stesso spinge la colonna dei gas caldi e contemporaneamente provoca un'aspirazione in camera di combustione. Questo sistema può anche essere usato per aumentare il tiraggio di un camino esistente.(max 5÷10 mm.c.a.)



Tiraggio equilibrato: si ha quando il tiraggio è in parte soffiato ed in parte aspirato
Tiraggio pressurizzato: si ha quando il ventilatore (o ventilatori nelle grandi unità) premente conferisce all'aria comburente, aspirata dall'esterno la prevalenza necessari per vincere tutte le perdite di carico del circuito aria-fumi.

Determinazione della sezione camino

$$S = \frac{Q \cdot K}{\sqrt{H}}$$

S = sezione camino (cm²)
H = altezza camino
Q = Potenza focolare in kcal/h
K = coefficiente →vale 0,3 combustibile solido
→vale 0,024 combustibile liquido o gas
→vale 0,011 caldaie pressurizzate

860 kcal/h = 1 kW

ACCESSORI DI SICUREZZA – VALVOLE DI SICUREZZA

Ogni generatore di vapore deve avere minimo due **valvole di sicurezza** adatte a scaricare contemporaneamente almeno la producibilità massima del GV al carico massimo continuo e devono aprirsi ad una pressione (P pressione di taratura) *uguale* o *inferiore* alla pressione di bollo (Pb) dell'apparecchio.

Le *valvole di sicurezza* si denominano anche accessori di *sicurezza positiva*, in quanto per il loro funzionamento non è prevista energia esterna essendo tale funzionamento azionato dal valore della pressione interna.

-**Pressione di taratura**: pressione alla quale la valvola scarica in modo continuo il fluido (vapore).
-**Sovrapressione di apertura totale**: incremento di pressione rispetto alla pressione di taratura (max10%) per ottenere la massima alzata dell'otturatore, cioè la massima portata di scarico della valvola.
-**Scarto di chiusura**: diminuzione della pressione rispetto alla pressione di taratura per ottenere la richiusura della valvola.
Una valvola di sicurezza dal punto di vista funzionale costituisce un punto di contatto fra l'interno e l'esterno della caldaia cioè i due ambienti a pressioni molto diverse.
Le valvole vengono mantenute normalmente chiuse per permettere il normale funzionamento in pressione della caldaia e si aprono al raggiungimento della *pressione massima* ammissibile (*pressione di bollo*) per impedire che la pressione salga oltre il limite previsto.

Nota importante: →→ **LA VALVOLA DI SICUREZZA SCARICA VAPORE PER IMPEDIRE IL SUPERAMENTO DELLA PRESSIONE MASSIMA**

Le valvole di sicurezza devono essere installate sul lato vapore con attacco il più corto possibile.
-No valvole di intercettazione e il diametro del tronchetto non può essere inferiore al diametro dell'orifizio della valvola.
-Lo scarico del vapore può essere libero solo per basse pressioni (max 1 bar)
-Lo scarico del vapore per pressioni superiori a 1 bar devono essere convogliate in alto(P > 1bar)
-Lo scarico del vapore per producibilità maggiore alle 2 t/h deve essere convogliate all'esterno (Q scarico > 2 t/h)

Dimensionamento delle valvole di sicurezza con il Vecchio Regolamento [VR]

- **Deve avere un diametro minimo di 25 mm**
- **La forza vapore ($F_v = P \cdot A_{ott}$) sull'otturatore massimo 800 kg**
- **Formula di calcolo area otturatore** $A_{tot\ ott} = \dfrac{S \cdot 11}{P + 0,6} = cm^2$

S = Superficie di riscaldamento (m^2)
P = Pressione taratura massima (P_b in kg / cm^2)
At = Area totale della VdS (cm^2)

E' consentita la riduzione di tale sezione al 40% del valore dato dalla formula, quando le due valvole siano del tipo a grande alzata e ad alzata totale.

$$A_{tot\ ott} = \frac{S \cdot 11}{P + 0,6} \cdot 0,4$$

$A_{1,2} = \frac{A_{tot}}{2}$

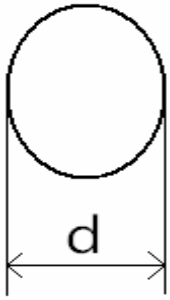
1. Verifico se il diametro dalla formula → $d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$

se d > 25 mm → OK

2. Verifico la Forza vapore $F_v = P_b \cdot A1,2$

se F_v < 800 kg → OK

RIPASSI



$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ $\quad d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$

esempio → A = 20 cm² $\quad d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 20}{3,14}} = \sqrt{\frac{80}{3,14}} \approx \sqrt{25,47} \approx 5,04$ cm

$P = \frac{F}{A}$ → $F = P \cdot A$

1 bar = 100.000 Pa = 100.000 N/m²
1 bar = 10 N/cm²

esempio → P = 15 bar → 150 N/cm²

F = P · A = 150 N/cm² · 20 cm² 3.000 N

Esercizio

$P_b = 12\ kg / cm^2$
$S = 150\ m^2$

Calcolare diametro delle valvole sia ordinarie che a grande alzata

Calcolo per valvole ordinarie:

$$A_{tot} = \frac{S \cdot 11}{P + 0,6} = \frac{150 \cdot 11}{12 + 0,6} = \frac{1.650}{12,6} \approx 131\ cm^2$$

$$A_{1,2} = \frac{A_{tot}}{2} = 65,5\ cm^2$$

Verifico il diametro → $d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 65,5}{3,14}} \approx 9,13\ cm \approx 91,3\ mm$

$d = 91,3\ mm > d = 25\ mm$ → OK

Verifico la Fv

$F_v = P_b \cdot A_{1,2} = 12\ kg / cm^2 \cdot 65,5\ cm^2 \approx 786\ kg$

$Fv = 786\ kg < 800\ kg$ → OK

Calcolo per le valvole a grande alzata:

$$A_{tot} = \frac{S \cdot 11}{P + 0,6} \cdot 0,4 = \frac{150 \cdot 11}{12 + 0,6} \cdot 0,4 = 52,4\ cm^2$$

$$A_{1,2} = \frac{A_{tot}}{2} = \frac{52,4}{2} = 26,2\ cm^2$$

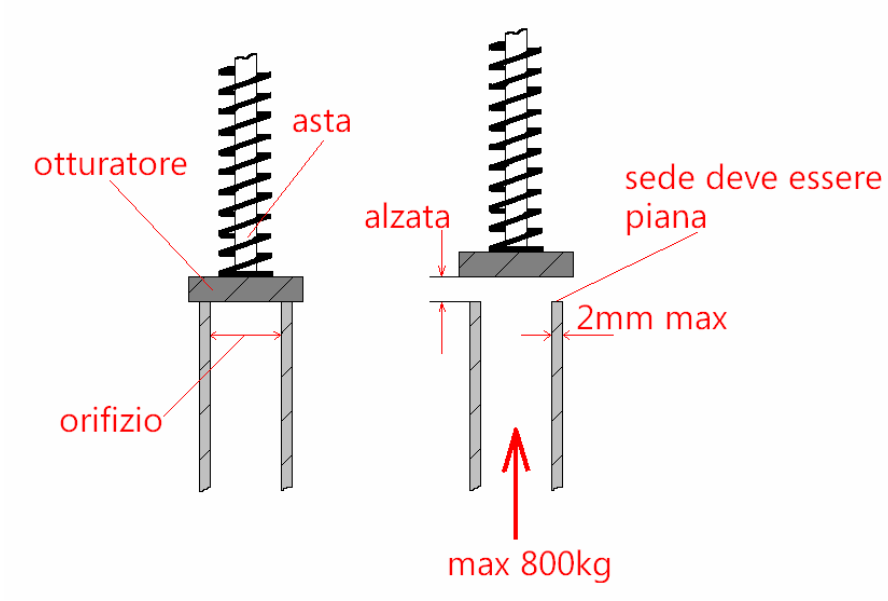
Verifico il diametro → $d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 26,2}{3,14}} \approx 5,77\ cm \approx 57,7\ mm$

$d = 57,7\ mm > d = 25\ mm$ → OK

Verifico la Fv

$Fv = Pb \cdot A1,2 = 12\ kg / cm^2 \cdot 26,2\ cm^2 \approx 314,4\ kg$

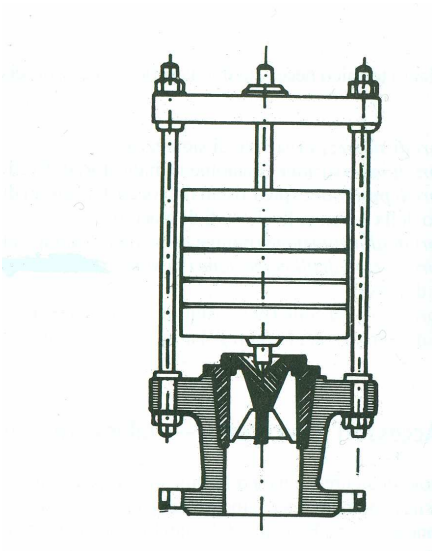
$Fv = 314,4\ kg < 800\ kg$ → OK



Classificazione delle valvole di sicurezza

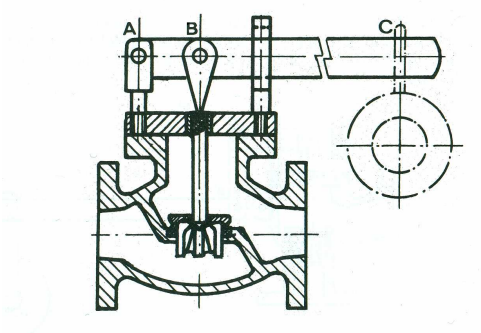
Le valvole di sicurezza, secondo il sistema con cui viene realizzato il carico sull'otturatore, si distinguono in:

- valvole di sicurezza a peso diretto



In questo tipo di valvola il carico sull'otturatore è costituito da un peso gravante direttamente su di esso. La valvola si apre e scarica il vapore quando la forza esercitata dal vapore sull'otturatore supera la forza esercitata dal peso.

- valvole di sicurezza a peso e leva

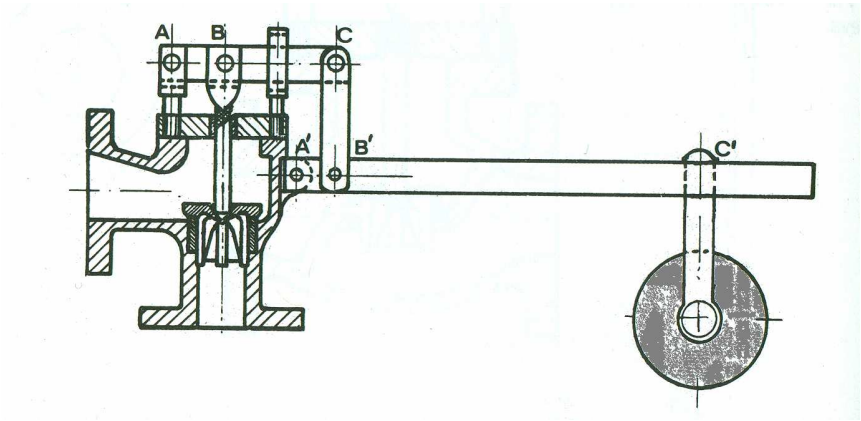


In questo tipo di valvola di sicurezza viene sfruttato il principio della leva, all'estremità di un'asta, viene messo un peso che deve controbilanciare la spinta del vapore sull'orifizio

Esempio AB =10 BC = 100 AB / BC = 1/10

se FV = 150kg → $\frac{150 \cdot 10}{100}$ = 15kg

- valvole di sicurezza a peso e doppia leva



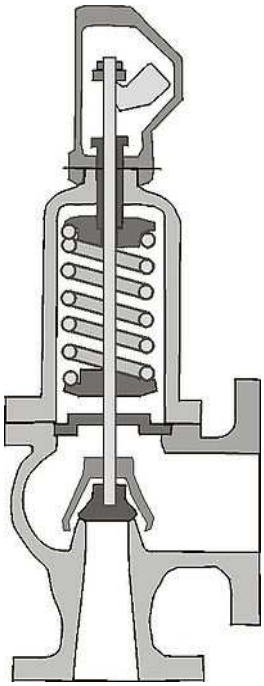
AB / AC = 1/3

A'B' / A'C' = 1/10

Su questo tipo di valvola il carico sull'otturatore viene applicato mediante una doppia leva. la doppia leva permette di ridurre ulteriormente il valore del peso, in quanto il principio delle leve viene applicato due volte

- valvole di sicurezza a molla diretta

In questo tipo di valvola il carico sull'otturatore è costituito dalla forza esercitata da una molla compressa tra una superficie fissa e l'otturatore. Le VdS a molla, pur essendo di impiego più recente, stanno avendo larga diffusione in considerazione dei notevoli pregi che presentano rispetto alle tradizionali VdS a peso e leva.



A parità di dimensioni dell'orifizio, sono in grado di scaricare una quantità maggiore di vapore; presentano una maggiore accuratezza nella costruzione in modo da garantire un più sicuro funzionamento e quindi una migliore affidabilità.

Definizioni caratteristiche per le valvole di sicurezza

- **DN** → *Diametro nominale*: è un'indicazione convenzionale (tubi, flange, valvole, raccordi ecc.) Esso rappresenta approssimativamente il diametro in millimetri dell'ingresso valvola. Nelle VdS si fa distinzione fra il DN della flangia in ingresso e il DN della flangia di uscita.
- **PN** → *Pressione nominale*: è un'indicazione convenzionale relativa alla pressione massima di esercizio espressa **ate** o in **bar** (alla temperatura di 20°C). Per temperature superiori, i valori di pressione massima devono essere opportunamente ridotti secondo tabelle. Nelle VdS si distinguono un PN di entrata e un PN di uscita.
- Orifizio: è la parte di una VdS percorsa dal fluido che precede, nel senso del flusso, *la sede*. E' importante il diametro minimo dell'orifizio,convenzionalmente indicato con D.
- *Sede*: è la parte di una VdS, fissa rispetto al corpo della stessa contro cui si esercita la spinta dell'otturatore. La sede può essere piana o conica con semiangolo di apertura compreso fra 45° e 90°.
- *Otturatore*: è la parte di una VdS, mobile rispetto al corpo della stessa, che impedisce la fuoriuscita del fluido quando è premuto contro la sede della valvola stessa.
- *Alzata*: è la corsa assiale dell'otturatore dalla posizione di chiusura alla posizione di completa apertura.

- *Pressione di taratura*: è la pressione alla quale la VdS comincia a scaricare il fluido in modo continuo (vapore).
- *Sovrapressione*: è l'incremento di pressione (max 10%) al di sopra della pressione di taratura necessario per consentire lo scarico della piena portata e quindi massima alzata dell'otturatore.
- *Scarto di chiusura*: è l'abbassamento di pressione, sotto il valore di taratura, necessario ad ottenere la richiusura della VdS.
- Leva di sollevamento: è una leva applicata in genere sulle VdS a molla e serve per controllare l'efficienza della valvola quando si è raggiunta una pressione prossima a quella di taratura (circa3/4).

La prova della valvola deve essere eseguita nell'ultimo quarto(es: se la pressione di bollo è 12 bar, la prova si esegue tra i 9 e i 10 bar) tirando leggermente la leva e lasciandola andare immediatamente, prima però si accenna solo il tiraggio della leva, per verificare che non ci si trova al limite della pressione di taratura.

Classificazione delle valvole (riepilogo)

1. Secondo il carico sull'otturatore

- a peso diretto
- a peso e leva
- a peso e doppia leva
- a molla diretta

2. Secondo l'alzata dell'otturatore

- ordinarie
- a grande alzata
- ad alzata totale
- a boccaglio

Formula base per le VdS ordinarie [VR]

$$A_{tot} = \frac{S \cdot 11}{P + 0{,}6} = cm^2$$

Formula per VdS a grande alzata [VR]

$$A_{tot} = \frac{S \cdot 11 \cdot 0{,}4}{P + 0{,}6} = cm^2$$

Area di una valvola

$$A_{1,2} = \frac{A_{tot}}{2} = cm^2$$

d > 25 mm

Fv < 800 kg

VALVOLE DI SICUREZZA NUOVO REGOLAMENTO [NR]

Per il nuovo regolamento, il diametro interno dell'orifizio non deve essere inferiore a 15 mm;
la forza vapore (Fv) no deve superare 8.000 N

d > 15 mm

Fv < 8.000 N

L'area totale viene calcolata nel seguente modo:

$$A_{tot} = \frac{q}{(0{,}9 \cdot K) \cdot (113{,}8 \cdot C)} \cdot \sqrt{\frac{V_1}{P_1}} = cm^2$$

q = W = producibilita massima in kg/h
0,9 = fattore di sicurezza
K = coefficiente di eflusso (prova di laboratorio)
113,8 = coefficiente fisso se P_1 espresso in bar
112,7 = coefficiente fisso se P_1 espresso in kg/cm²
C = coefficiente di espansione (tabella)
V_1 = volume specifico del vapore a P_1 (tabella)
P_1 = pressione assoluta di scarico = Pb+1 + % di sovrapressionePb

esempio di P_1
P_b = 10bar
P_1 = P_b + 10%sovrapress + 1
P_1 = 10 + 1 + 1

Vecchio regolamento [VR]

- **Ordinarie**
- **A grande alzata**
- **Ad alzata totale**
- **A boccaglio**

Nuovo regolamento [NR]

- **Ordinarie (non qualificate) K→ 0,05**
- **Qualificate K→ come da certificato**

-Le valvole ***ordinarie*** sono quelle, che non sono state sottoposte ai test di *qualifica*, esse sono senza fattore K o meglio il fattore K è definito per il calcolo uguale a 0,05.
-Per calcolare la VdS, dobbiamo verificare il fattore di efflusso K sul certificato di collaudo che la accompagna, il fattore K è considerato un valore puro perché *definito sperimentalmente*.
-*Le VdS qualificate* possono superare la Pb con un sovrapressione max del 10%
-*Le VdS ordinarie* non possono anche con la sovrapressione, possono arrivare al massimo alla Pb

NOTA→La valvola deve poter scaricare tutta la potenzialità della caldaia

esempio di calcolo:
(valvola qualificata)

W = 5,6 t/h
Pb = 18 bar
VdS mod.MR K = 0,92
sovrapressione = 5%

svolgimento:

calcolo P_1 = 18 + 5%Pb + 1 = 18 + 0,9 + 1 = 19,9 bar
V_1 = 0,101 m³/kg (da tabella)
C = 0,635 (da tabella)
trasformo le t/h in kg/h → 5,6 t/h = 5.600 kg/h

$$A_{tot} = \frac{q}{(0{,}9 \cdot K) \cdot (113{,}8 \cdot C)} \cdot \sqrt{\frac{V_1}{P_1}}$$

$$= \frac{5.600}{(0{,}9 \cdot 0{,}92) \cdot (113{,}8 \cdot 0{,}635)} \cdot \sqrt{\frac{0{,}101}{19{,}9}}$$

$$= \frac{5.600}{0{,}828 \cdot 72{,}263} \cdot \sqrt{0{,}005}$$

$$= \frac{5.600}{59{,}83} \cdot 0{,}07$$

$$= 93{,}598 \cdot 0{,}07 \approx 6{,}6 \text{ cm}^2$$

calcolo $A_{1,2} = \frac{A_{tot}}{2}$

$$\frac{6{,}6}{2} = 3{,}3 \text{ cm}^2$$

verifico il diametro d → $d = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{3{,}3 \cdot 4}{3{,}14}} = \sqrt{\frac{13{,}2}{3{,}14}} = \sqrt{4{,}20} \approx 2{,}05\text{cm} = 20{,}5 \text{ mm}$

d = 20,5 mm > d = 15 mm → OK

Calcolo la forza vapore Fv → Fv = P · A

P = 18 bar = 180 N/cm² → Fv = 180 N/cm² · 3,3 cm² = 594 N

594 N < 8.000 N → OK

esempio di calcolo:
(valvola ordinaria stessi parametri)

W = 5,6 t/h
Pb = 18 bar
VdS ordinaria K = 0,005

Svolgimento:

P_1 = Pb +1 = 18 +1 = 19 bar
V_1 = 0,110 m³/kg (da tabella)
C = 0,635 (da tabella)

trasformo le t/h in kg/h → 5,6 t/h = 5.600 kg/h

$$A_{tot} = \frac{q}{(0{,}9 \cdot K) \cdot (113{,}8 \cdot C)} \cdot \sqrt{\frac{V_1}{P_1}}$$

$$= \frac{5.600}{(0{,}9 \cdot 0{,}05) \cdot (113{,}8 \cdot 0{,}635)} \cdot \sqrt{\frac{0{,}105}{19}}$$

$$= \frac{5.600}{0{,}045 \cdot 72{,}263} \cdot \sqrt{0{,}0055}$$

$$= \frac{5.600}{3{,}26} \cdot 0{,}074$$

$$= 1.717 \cdot 0{,}074 \approx 127{,}6 \text{ cm}^2$$

calcolo $A_{1,2} = \frac{A_{tot}}{2} = \frac{127{,}6}{2} = 63{,}8 \text{cm}^2$

verifico il diametro d → $d = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{63{,}8 \cdot 4}{3{,}14}} = \sqrt{\frac{255{,}2}{3{,}14}} = \sqrt{81{,}27} \approx 9{,}01\text{cm} = 90{,}1 \text{ mm}$

d = 90,1 mm > d = 15 mm → OK

Calcolo la forza vapore Fv → $Fv = P \cdot A_{1,2}$

P = 18 bar = 180 N/cm² → Fv = 180 N/cm² · 63,8 cm² = 11.484 N

11.484N > 8.000 N → NO

Ricalcolo $A_{1,2,3} = \frac{A_{tot}}{3} = \frac{127{,}6}{3} \approx 42{,}5 \text{ cm}^2$

verifico il diametro d → $d = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{42{,}5 \cdot 4}{3{,}14}} = \sqrt{\frac{170{,}1}{3{,}14}} = \sqrt{54{,}2} \approx 7{,}36\text{cm} = 73{,}6 \text{ mm}$

d = 73,6 mm > d = 15 mm → OK

Ricalcolo la forza vapore Fv → $Fv = P \cdot A_{1,2,3}$

$P = 18$ bar $= 180$ N/cm² → $Fv = 180$ N/cm² $\cdot$ 42,5 cm² = 7.650 N

7.650 N < 8.000 N → OK

LA COMBUSTIONE

- **Chimica della combustione**
- **Tecnica (macchine – bruciatori)**
- **Analisi fumi / inquinamento / rendimento**

Le *formule chimiche* elencano di quali molecole è formata una data sostanza.

Esempio:

C = carbonio = monoatomico (1 solo elemento)
H_2O = acqua = sostanza composta da 2 elementi (H e O), la molecola è composta da 2 atomi 1d'idrogeno e 1 d'ossigeno.

Ogni sostanza ha per definizione un certo peso, nel caso degli atomi, viene preso come punto di riferimento, la *dodicesima parte dell'atomo di carbonio* che ha un peso atomico di 12.

Il *peso molecolare*, viene calcolato prendendo in considerazione tutti i pesi atomici delle varie molecole che compongono una data sostanza.

Ogni molecola interessata alla reazione chimica deve rimanere nel composto finale.

Esempio:

$C + O_2 = CO_2 \rightarrow$ anidride carbonica

Però in alcuni casi, la reazione necessita di un *bilanciamento*, dato che alcune sostanze non hanno un atomo singolo ma sono accoppiati.

Esempio:

$H_2 + O_2 = H_2O \rightarrow$ acqua

L'ossigeno non si trova libero a livello atomico (O) ma solo accoppiato (O_2) quindi per bilanciare la reazione occorre:

$2 \cdot H_2 + O_2 = 2 \cdot H_2O$

Con quattro molecole di idrogeno e una d'ossigeno si ottengono due molecole di acqua

Per la combustione consideriamo solo i seguenti elementi:

Elemento	Simbolo	Massa atomica	Molecola	Peso molecolare
IDROGENO	**H**	**1**	**H_2**	**2**
CARBONIO	**C**	**12**	**C**	**12**
OSSIGENO	**O**	**16**	**O_2**	**32**
AZOTO	**N**	**14**	**N_2**	**28**
ZOLFO	**S**	**32**	**S**	**32**

La **combustione** è una *reazione chimica di ossidazione* che avviene in modo violento e con forte sviluppo di calore, i reagenti sono il *combustibile* e il *comburente* (aria).

- Reazione chimica

Reagenti → Prodotti

$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$

Bilanciamento stechiometrico

$2 \cdot H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Combustibile + comburente = prodotti di combustione (fumi) + calore (ENERGIA)

Il *comburente* è una miscela di gas (aria) composta da ossigeno(O_2), azoto(N_2) e gas rari(non vengono considerati.

COMBUSTIBILE
↓
- **La parte utile** di questa miscela è il Carbonio (C) e Idrogeno (H)
- **La parte inerte** non partecipa alla combustione (impurità – terra prima e ceneri dopo)
- **La parte dannosa** Zolfo (S) (apporto calorifico molto basso)

COMBURENTE (ARIA)
↓
è così composta:

- In volume Ossigeno (O_2) = 20,9 % - Azoto (N_2) = 79,1 %
- In peso Ossigeno (O_2) = 23 % - Azoto (N_2) = 77 %

1 m³ di aria pesa 1,293 kg

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE → FUMI + ENERGIA

REAZIONI DI COMBUSTIONE E STECHIOMETRICHE

Ogni reazione chimica produce una sostanza diversa da quella originaria, più una certa quantità di calore *(Energia)*

Carbonio C

$C + O_2 = CO_2$ + ENERGIA (Q)

12 + 32 = 44 = peso molecolare del CO2 + ENERGIA (Q)

Per calcolare il calore (Energia) e la quantità di sostanza prodotta, si prende un peso uguale a quello che esprime la massa molecolare, quindi il peso molecolare del carbonio = 12 e quello dell'ossigeno = 32, si prendono 12 kg di carbonio e 32 kg di ossigeno che danno:

12 kg + 32 kg = 44 kg

Volendo sapere, quanto ossigeno mi serve per una reazione completa e quanto calore mi fornisce, si divide per il peso atomico del primo elemento:

$\frac{12\ kg}{12} + \frac{32\ kg}{12} = \frac{44\ kg}{12}$ = 1 + 2,66 = 3,66 + 8.130 kcal o 34.000 kJ (potere calorifico del Carbonio)

quanta aria in peso:

$\frac{2{,}66\ kg\ (O_2)}{0{,}23}$ = 11,56 kg di aria

quanta aria in volume: → Sapendo che 1 m³ di aria equivale a 1,293 kg di aria in peso

$\frac{11{,}56\ \cancel{kg}}{1{,}293\ \cancel{kg}/m^3} = 8{,}94\ m^3$

Idrogeno H

$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$

Bilanciamento stechiometrico

$2 \cdot H_2 + O_2 = 2 \cdot H_2O$ + ENERGIA

$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$

$2 \cdot 2 + 32 = 2 \cdot (2+16) = 36$ + ENERGIA

$\frac{4}{4} + \frac{32}{4} = \frac{36}{4}$ + ENERGIA

1kg H_2 + 8kgO_2 = 9kg H_2O +
- 34.500 kcal o 144.417 kJ → potere calorifico superiore
- 29.100 kcal o 121.812 kJ → potere calorifico inferiore

A disposizione abbiamo però solo il *potere calorifico inferiore*, perché l'acqua prodotta da questa reazione è allo stato di vapore e quindi si prende parte del calore prodotto.

quanta aria in peso:

$\frac{8\ kg\ (O_2)}{0,23}$ = 34,78 kg di aria

quanta aria in volume:

$\frac{34,78\ \cancel{kg}}{1,293\ \cancel{kg}/m^3}$ = 26,9 m³

Zolfo S

$S + O_2 \rightarrow SO_2$ + ENERGIA

32 + 32 = 64 + ENERGIA

$\frac{32}{32} + \frac{32}{32} = \frac{64}{32}$ (anidride solforosa)

↓

1kgS + 1kgH_2O = 2kg SO_2 + 2.600 kcal o 10.884 kJ (potere calorifico Zolfo)

quanta aria in peso:

$\frac{1\ kg\ (O_2)}{0,23}$ = 4,34 kg di aria

quanta aria in volume:

$\frac{4,34\ \cancel{kg}}{1,293\ \cancel{kg}/m^3}$ = 3,36 m³

Problema quando:

$SO_2 + H_2O$ diventa $\rightarrow H_2SO_4$ ACIDO SOLFORICO

Reazione incompleta del Carbonio C

Se nella nostra reazione abbiamo scarsità di ossigeno, bruciamo male perdendo fino ai 2/3 del potere calorifico del Carbonio (perdita per calore latente)

$C + O_2 \rightarrow CO$

$2 \cdot C + O_2 \rightarrow 2CO + ENERGIA$

$2 \cdot 12 + 32 \rightarrow 2 \cdot (12+16)$

$\frac{24}{24} + \frac{32}{24} = \frac{56}{24}$

(potere calorifico del Carbonio bruciato come Monossido)

↓ ↓

$1kgC + 1{,}33kgO_2 = 2{,}33kg\ CO + 2.449$ kcal o 10.252 kJ

quanta aria in peso:

$\frac{1{,}33\ kg\ (O_2)}{0{,}23} = 5{,}79$ kg di aria

quanta aria in volume:

$\frac{5{,}79\ \cancel{kg}}{1{,}293\ \cancel{kg}/m^3} = 4{,}48\ m^3$

Nota:
- CO_2 Anidride Carbonica (Biossido di carbonio)
- CO Monossido di Carbonio

Reagenti		Prodotti della combustione	Aria in kg	Aria teorica in m³	Potere calorifico in kcal	Potere calorifico in kJ
1 kg C	O_2	CO_2	2,66	8,94	8.130	34.040
1 kg H	O_2	H_2O	8	26,9	34.500 pcs*	144.417 Hs
					29.100 pci*	121.812 Hi
1 kg S	O_2	SO_2	1	3,36	2.600	10.883
Con combustione incompleta del Carbonio						
1 kg C	O_2	CO	1,33	4,48	2.449	10.251

Nota:
pcs* → *potere calorifico superiore* (si può scrivere anche Hs)
pci* → *potere calorifico inferiore* (si può scrivere anche Hi)

La loro differenza è la perdita di calore a causa del vapore prodotto dalla combustione, che per convenzione equivale a 600 kcal per ogni kg di vapore.
per recuperare questo calore si dovrebbe raffreddare tutto il vapore.

Esempio per l'idrogeno H_2:

p.c.sup. → 34.500 kcal -
p.c.inf. → 29.100 kcal =
5.400 kcal

Dato che la reazione di 1 kg di H_2 produce 9 kg di H_2O

9 kg H_2O · 600 kcal/kg → 5.400 kcal → oppure → 9 kg H_2O · 2.512 kJ/kg → 22.605 kJ

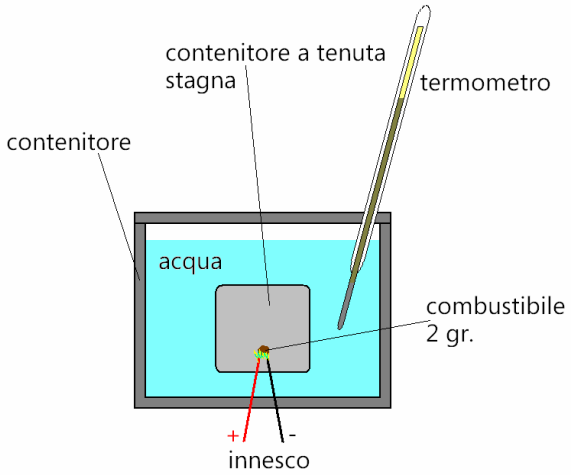
Definizioni:
Potere calorifico superiore: Quantità di calore totale sviluppata dalla combustione completa di 1 kg o (Sm^3 - Standard metro cubo) di un dato combustibile misurata dopo aver riportato i prodotti della combustione alla temperatura di partenza.

Potere calorifico inferiore: E' il potere calorifico superiore diminuito del calore latente di vaporizzazione del vapor d'acqua sviluppatosi nella combustione.

Determinazione del potere calorifico superiore

- Metodo sperimentale
- Metodo analitico

Metodo sperimentale - Bomba di Mahler
Il potere calorifico di un combustibile si può calcolare con la *bomba di Mahler*, in un contenitore con un certo volume d'acqua ad una certa temperatura (t) s'immerge un contenitore a tenuta stagna contenente *due grammi di combustibile* e mediante un arco elettrico si provoca l'innesco e verificando la differenza di temperatura (Δt) si calcola il potere calorifico superiore.



Esempio:
m = 10 kg acqua
t_1 = 20°C
t_2 = 22°C

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \rightarrow kJ = \frac{\cancel{kg} \cdot kJ \cdot \cancel{°C}}{\cancel{kg}\,\cancel{°C}} \rightarrow 10 \cdot 4{,}186 \cdot 2 = 83{,}72 \text{ kJ}$$

Moltiplico i 2 grammi per 500 per ottenere un valore riferito ad 1 kg
→ pcs = 83,72 · 500 = 41.860 kJ/kg

Metodo analitico o stechiometrico

Analisi del combustibile

C %	H %	S %	U %	I %
CARBONIO	**IDROGENO**	**ZOLFO**	**UMIDITA'**	**IMPURITA'**

pcs = C% · 34.040kJ + H% · 144.417kJ + S% · 11.000kJ

pci = pcs – [(9 · 2.512kJ) + (U% · 2.512kJ)]

COMBUSTIONE TEORICA COMPLETA

Combustibile	+	Aria	=	Prodotto della combustione	+	Energia
C	+	O_2	=	CO_2	+	Energia
H_2	+	O_2	=	H_2O	+	Energia
S	+	O_2	=	SO_2	+	Energia
N_2	→→→→→→			N_2		

COMBUSTIONE REALE CON ARIA TEORICA

Combustibile	+	Aria	=	Prodotto della combustione	+	Energia
C	+	O_2	=	CO_2 , CO , C	+	Energia
H_2	+	O_2	=	H_2O	+	Energia
S	+	O_2	=	SO_2	+	Energia
N_2	→→→→→→			N_2		
				O_2		

COMBUSTIONE REALE CON ARIA EFFETTIVA

Combustibile	+	Aria	=	Prodotto della combustione	+	Energia
C	+	O_2	=	CO_2 ,[CO , C in tracce]	+	Energia
H_2	+	O_2	=	H_2O	+	Energia
S	+	O_2	=	SO_2	+	Energia
N_2	→→→→→→			N_2		
				O_2		

ANALISI DEI FUMI

- Fumi umidi (comprendono H_2O)
- Fumi secchi o anidri (senza H_2O)

Analisi si fa sempre su fumi anidri

CO_2 % → volumetrico deve essere il più alto possibile (verso CO_2 max) indica buona combustione

O2 % → volumetrico più basso possibile (mai = 0) → 3 % indice eccesso d'aria
→ meno del 3 % con sistemi elettronici analizzatori che comunicano con i bruciatori

CO p.p.m. → più basso possibile (max 1.000 ppm) indice di combustione incompleta

CO → per combustibili liquidi, max consentito = 150 ÷ 200 p.p.m.
CO → per combustibili gassosi (metano) max presenti = 50 p.p.m.
CO → per combustibili gassosi (metano) max consentiti = 1.000 p.p.m.

p.p.m. ↓

1 m^3 = 1.000.000 cm^3
1 cm^3 = 1 p.p.m.

1% = 10.000 p.p.m.
0,1% = 1.000 p.p.m.
0,01% = 100 p.p.m.
0,001% = 10 p.p.m.
0,0001 % = 1 p.p.m.

Si ha quindi che:
200 p.p.m. = 0,02%
50 p.p.m. = 0,005%
1.000 p.p.m. = 0,1%

Analisi si fanno con metodo:

- Chimico → con apparecchio tipo Orsat (in disuso).
- Fisico → con analizzatore elettronico (a celle)
- O_2
- CO
- CO_2
- NO_x

Equazione di combustione (metodo matematico)

L'equazione di combustione è la somma dei rapporti tra il CO2, il CO e l'O2 effettivamente rilevati ed i rispettivi valori massimi.

$$\frac{CO_2\,\%}{CO_2max} + \frac{\cancel{CO\,\%}}{\cancel{CO_{max}}} + \frac{O_2\,\%}{O_2max\ (20{,}9)} = 1$$

La somma dei rapporti deve dare sempre 1, se è inferiore significa che si ha produzione di CO, se è superiore, si è verificato un errore di lettura dei valori

$$\frac{CO_2\,\%}{CO_2max} + \frac{O_2\,\%}{O_2max\ (20{,}9)} = 1$$

esempio: $CO_2 = \left(1 - \frac{O_2}{20{,}9}\right) \cdot CO_2max$

Esempio:

O_2 = 6,3% → calcolo la CO_2 → $CO_2 = \left(1 - \frac{O_2}{20{,}9}\right) \cdot CO_2max = \left(1 - \frac{6{,}3}{20{,}9}\right) \cdot 15{,}1 = 10{,}54$

quindi CO_2 = 10,5

Eccesso d'aria E %

Alcuni esempi:

	Tubi d'acqua	Tubi da fumo
Gasolio	5 %	20 % (25 %)
Olio combustibile	15 %	30 %
Metano	5 %	15 %

Utilizzando solamente l'aria teorica per la combustione, una parte dell'aria, passa ai lati del dardo formato dalla fiamma del bruciatore, senza miscelarsi con il combustibile, dando luogo cosi ad una combustione non completa e alla produzione *d'ossido di carbonio* e *carbonio*, per evitare questo fenomeno, è necessario dare aria in più. Quest'aria in più che forniamo viene chiamata *eccesso d'aria*, esso deve essere dato nella giusta dose, altrimenti in ogni caso si ha una combustione incompleta, se è insufficiente, ha lo stesso effetto dell'aria teorica, se esageriamo, invece, schiaccia la fiamma, rallentando la velocità di combustione e aumenta la produzione di fuliggine.
Aumenta però anche la quantità di fumi prodotti, e di conseguenza la loro temperatura, poiché un volume eccessivo, non permette uno scambio ideale tra i giri fumo e l'acqua.

Coefficiente di eccesso d'aria (e)

$$e = \frac{CO_2 max}{CO_2 \%}$$

e = 1,00 aria teorica

CO_2 max

Metano	→ 11,65 %	11,7 %
Gasolio	→ 15,1 %	
Olio comb.	→ 15,6 % (BTZ)	15,8 % (ATZ)

esempio del metano:

$$e = \frac{CO_2 max}{CO_2 \%}$$

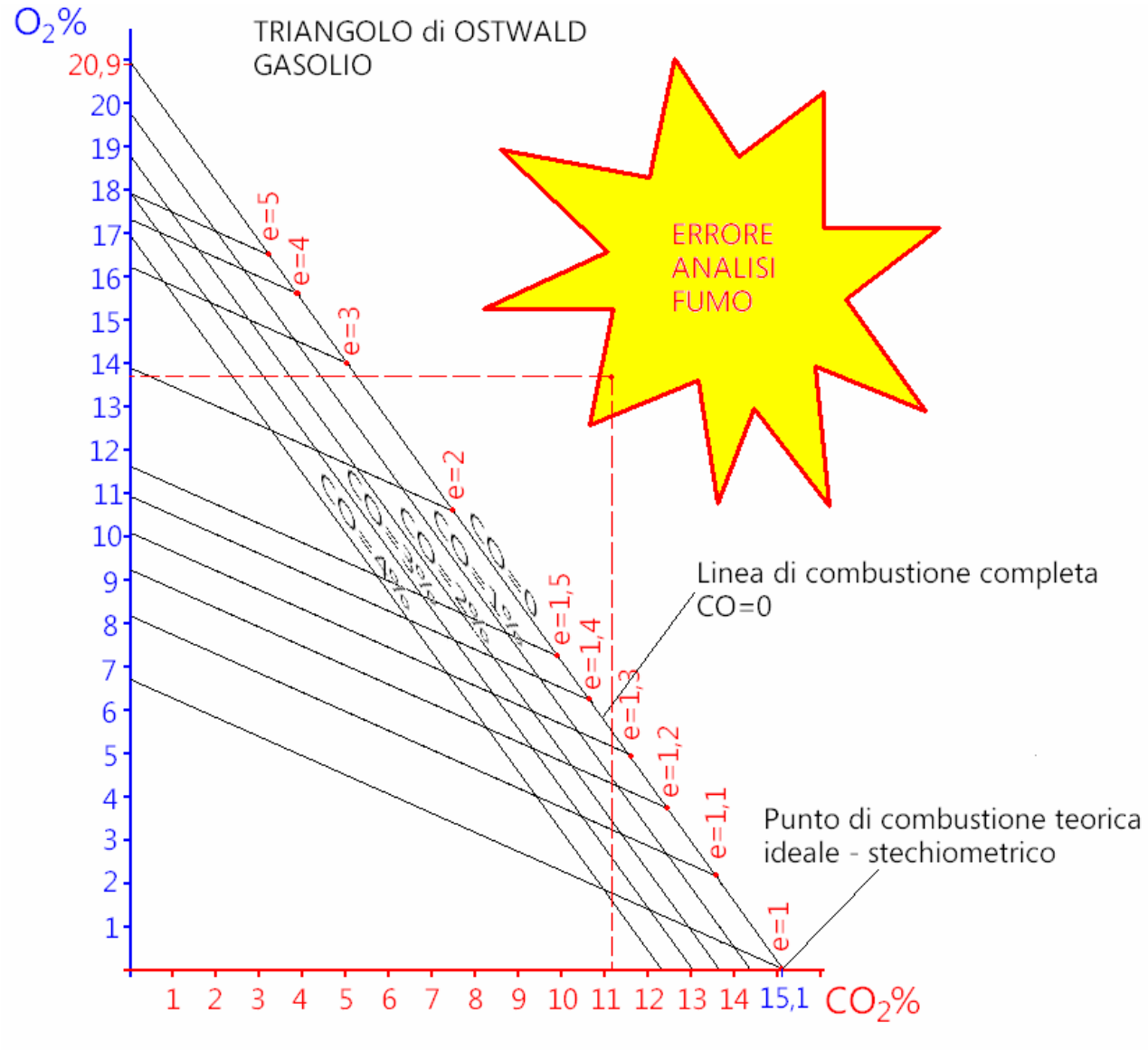
$CO_2\% = 9,6\ \%$ (rilevazione) $\qquad e = \frac{11,7}{9,6} = 1,21$

Il calcolo da un numero sempre maggiore di 1

$E\ \% = (e - 1) \cdot 100 = (1,21 - 1) \cdot 100 = 0,21 \cdot 100 = 21\ \%$

Triangolo di Ostwald (metodo grafico)

Con il diagramma di Ostwald, possiamo velocemente verificare la qualità della combustione, necessitiamo però di due valori, il CO2 % e l'O2 %che li possiamo ricavare dall'analisi dei fumi.



Per ogni combustibile abbiamo un diagramma diverso

L'incontro dei due valori deve avvenire sulla riga del CO (linea di combustione completa).

RIEPILOGANDO

Lo stato dell'arte delle macchine della combustione (bruciatori) riduce il CO a poche p.p.m. (in genere da 0 a 300 circa) quindi il CO perde ogni rilevanza percentuale*.

Formula di combustione*:

$$\frac{CO_2\,\%}{CO_2 max} + \frac{O_2\,\%}{O_2 max} = 1$$

(20,9)

$$e = \frac{CO_2\ max}{CO_2\%}$$ → e = 1,00 aria teorica
e = 1,….aria effettiva

(*) senza CO → irrilevante

$E\% = (e-1) \cdot 100 =$

esempi:

Metano → $O_2 = 3\%$ $CO_2 = 10\%$

$e = \frac{CO_{2max}}{CO_2\%} = \frac{11,7}{10} = 1,17$ $E\% = (e-1) \cdot 100 = (1,17 - 1) \cdot 100 = 17\%$

Gasolio → $O_2 = 10\%$ $CO_2 = \ldots??\ldots$

dall'equazione di combustione ricavo CO_2

$\frac{CO_2\%}{CO_{2max}} + \frac{O_2\%}{O_{2max}} = 1 \rightarrow \frac{CO_2\%}{15,1\%} + \frac{10\%}{20,9\%} = 1 \rightarrow CO_2\% = 1 - \frac{10}{20,9} \cdot 15,1 = 7,8$

$e = \frac{CO_{2max}}{CO_2\%} = \frac{15,1}{7,8} = 1,93$ $E\% = (e-1) \cdot 100 = (1,93 - 1) \cdot 100 = 93\%$

FORMULA di HASSENSTEIN

Perdite nei fumi

- Latenti (incombusti) – Pc %* → (*) senza CO → irrilevante
- Sensibili (fumo caldo) – Ps %

- quanti fumi
- quanto caldo

$Pc = kc \cdot \frac{CO\%}{CO\% + CO_2\%}$

kc = coefficiente del combustibile

kc → combustibili solidi = 59
→ olio combustibile = 50,5
→ metano = 37,9

esempio:

Metano

$Pc = kc \cdot \frac{CO\%}{CO\% + CO_2\%} = 37,9 \cdot \frac{1}{1 + 9} = 37,9 \cdot \frac{1}{10} = 3,79\%$ → (*) irrilevante

Formula di Hassenstein

$$Ps = K_s \cdot \frac{t_f - t_a}{CO_2\%}$$

Ps = perdita calore sensibile in % del calore speso
t_a = temperatura ambiente in (°C)
t_f = temperatura dei fumi alla base del camino in (°C)
CO_2 = %
K_s = coefficiente variabile con il tipo di combustibile e con la percentuale di CO_2 → (tabella)

Esempio:

Metano
ta = 20°C
tf = 230°C
CO2 = 10%
K_s = 0,476 (da tabella)

$$Ps = Ks \cdot \frac{t_f - t_a}{CO_2\%} = 0{,}476 \cdot \frac{230 - 20}{10} = 0{,}476 \cdot \frac{21\cancel{0}}{1\cancel{0}} = 9{,}99\%$$

$\eta = 100 - Ps = 100 - 9{,}99 = 90{,}01$

Introduzione al rendimento di combustione:

$\eta = 100 - Ps - \cancel{Pc}$ * (*) irrilevante

$$\eta = 100 - Ps$$

Rendimento di combustione

Tabella della costante di Hassenstein, Ks in funzione del contenuto percentuale di CO_2 nei fumi

Costante di Hassenstein K_s					
CO_2%	**Gasolio**	**Nafta (O.C.)**	**Metano**	**Coke**	**Antracite**
4	0,523	0,543	0,418	0,749	0,683
5	0,530	0,550	0,427	0,749	0,684
6	0,536	0,556	0,437	0,750	0,685
7	0,543	0,563	0,447	0,750	0,686
8	0,550	0,570	0,457	0,751	0,687
9	0,557	0,576	0,466	0,751	0,688
10	0,564	0,583	0,476	0,752	0,689
11	0,571	0,590	0,486	0,752	0,690
12	0,578	0,596		0,753	0,691
13	0,585	0,603		0,753	0,692
14	0,592	0,610		0,754	0,693
15				0,754	0,694
16				0,755	0,695

Esempi:

Combustibile = gasolio
t_f = 176,5°C
t_a = 24,2°C
CO_2 = 7,55%

$$e = \frac{CO_2 max}{CO_2\%} = \frac{15,1}{7,55} = 2$$

Kc da tabella → 0,547

$$Ps = Ks \cdot \frac{t_f - t_a}{7,55} = 0.547 \cdot \frac{176,5 - 24,2}{7,55} = 0,547 \cdot \frac{152,3}{7,55} = 0,547 \cdot 20,17 = 11,03\%$$

$$\eta = 100 - Ps = 100 - 11,03 = 88,97\% \rightarrow 0,89$$

Combustibile = gasolio
t_f = 150°C
t_a = 24,2°C
CO_2 = 14%

$$e = \frac{CO_2 max}{CO_2\%} = \frac{15,1}{14} = 1,07$$

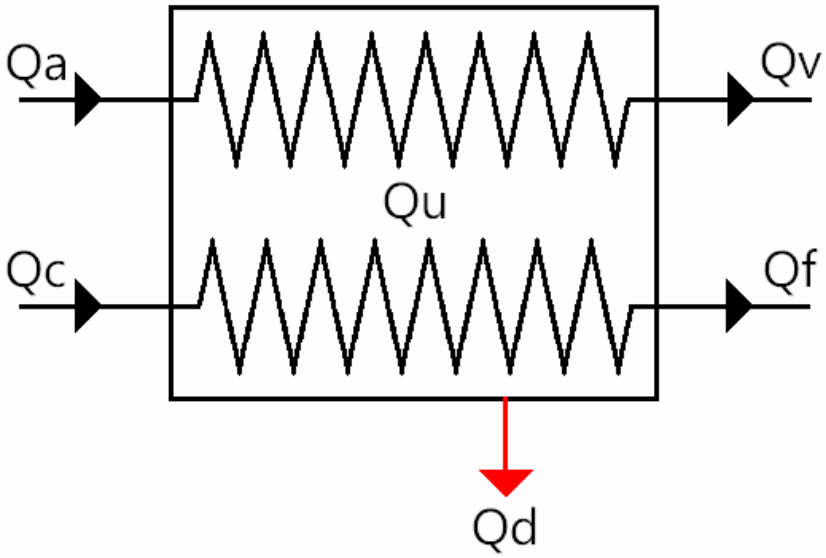
Ks da tabella → 0,592

$$Ps = Ks \cdot \frac{t_f - t_a}{14} = 0.592 \cdot \frac{150 - 24,2}{14} = 0,592 \cdot \frac{125,8}{14} = 0,592 \cdot 8,98 = 5,3\%$$

$$\eta = 100 - Ps = 100 - 5,3 = 94,7\% \rightarrow 0,947$$

BILANCIO TERMICO

Facciamo i conti in tasca al generatore, cioè verifichiamo quanta energia gli diamo e quanta ce ne restituisce.



Qa = calore contenuto nell'acqua di alimento
Qc = calore dato dal combustibile
Qv = calore contenuto nel vapore
Qf = calore contenuto nei fumi
Qd = calore disperso

Qu = calore utile → Qv - Qa

Innanzitutto vediamo come la somma della quantità di calore di combustione Qc e il calore contenuto nell' acqua di alimento Qa equivale alla somma del calore contenuto nel vapore Qv, del calore contenuto nei fumi Qf e del calore delle dispersioni varie del generatore stesso.

Quindi:

$$Qc + Qa = Qv + Qf + Qd$$

che:

$$Qc = (Qv - Qa) + Qf + Qd \quad \text{e siccome } Qu = Qv - Qa$$

$$Qc = Qu + Qf + Qd$$

$$Qa = \frac{ha \cdot W}{3.600} =$$

$$Qv = \frac{hu \cdot W}{3.600} \quad \text{oppure} \quad \frac{hs \cdot W}{3.600} = [kW]$$

$$Qc = \frac{pci \cdot \Gamma}{3.600} = [kJ/s] = [kW] \rightarrow\rightarrow\rightarrow \text{ perché } pci = \left[\frac{kJ}{\cancel{kg}}\right] \text{ e } \Gamma = \left[\frac{\cancel{kg}}{h}\right] = \left[\frac{kJ}{h}\right] = \left[\frac{kJ}{3.600}\right] = [kJ/s] = [kW]$$

$$Qf = Ps = K_s \cdot \frac{t_f - t_a}{CO_2\%} \rightarrow \text{ formula di Hassenstein}$$

$$\text{Rendimento} = \frac{UTILE}{SPESO} = \eta \qquad 0 < \eta < 1$$

$$\eta \cdot 100 = \eta(\%)$$

$$\text{RENDIMENTO} = \frac{Qv - Qa}{Qc}$$

e da questa otteniamo:

$$\eta = W \cdot \frac{(hu - ha)}{pci \cdot \Gamma} \rightarrow \text{ senza su surriscaldatore}$$

oppure

$$\eta = W \cdot \frac{(hs - ha)}{pci \cdot \Gamma} \rightarrow \text{ con su surriscaldatore}$$

$$\eta = W \cdot \frac{(hu - ha)}{pci \cdot \Gamma} \cdot 100 \text{ (per avere } \eta \text{ in \%)}$$

RENDIMENTO in forma:

1. Diretto $\rightarrow \eta = W \cdot \frac{(hu^* - ha)}{pci \cdot \Gamma}$

Il rendimento diretto si fa quando abbiamo il bilancio termico.
Il rendimento è dato dal rapporto tra l'energia ricavata diviso l'energia spesa,
ed è sempre inferiore a 1.

(*) hu oppure hs

2. Indiretto $\rightarrow \boldsymbol{\eta} = 100 - Ps - Qd$
(%) (%) (%)

Il rendimento indiretto si può calcolare, dando un valore indicativo alle Qd del 3%

Esempio:

$\eta = W \cdot \frac{(hu - ha)}{pci \cdot \eta}$ da questa formula possiamo ottenere questa → $\Gamma = W \cdot \frac{(hu - ha)}{pci \cdot \eta}$

i dati che mi servono:

W = 12 t/h
hu = → Pes; X; → 11 bar; 0,9
ha = → tH_2Oalim = 85°C
pci = tipo di combustibile (metano) = 8.550 kca/m³ = 8.550 · 4,186 = 35.790,3 kJ/m³
tf = 200°C
ta = 20°C
CO_2 = 11%
η = lo trovo dalla formula η = 100 – Ps –Qd
Ps = lo trovo dalla formula $Ps = Ks \cdot \frac{tf - ta}{CO_2\%}$
Ks = 0,486 da tabella
Qd = lo considero 3%

Svolgimento:

trasformo le t/h in kg/h quini 12 t/h = 12.000 kg/h

calcolo ha = tH_2Oalim · 4,186 = 85 · 4,186 = 355,81 kJ/kg

per calcolare hu devo ricavare da tabella hl e hv con la Pass = Pes + 1 bar = 11 + 1 = 12 bar
dalla tabella hl = 798,4 kJ/kg hv = 2.782,7 kJ/kg
adesso calcolo hu
hu = hl · (1-x) + hv · x = 798,4 · (1-0,9) + 2.782,7 · 0,9 = 79,84 + 2.504,43 = 2.584,27 kJ/kg

Calcolo Ps = $Ps = Ks \cdot \frac{tf - ta}{CO_2\%} = 0{,}486 \cdot \frac{200 - 20}{11} = 0{,}486 \cdot \frac{180}{11} = 0{,}486 \cdot 16{,}36 = 7{,}95\%$

quindi: η = 100 – Ps – Qd = 100 – 7,95 – 3 ≈ 89% che diventa 0,89

adesso applico ho tutti i dati per la formula:

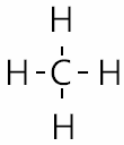
$\Gamma = W \cdot \frac{(hu - ha)}{pci \cdot \eta} = \frac{12.000\ \cancel{kg}/h \cdot (2.584{,}27 - 355{,}81)\ \cancel{kJ/kg}}{35.790\ \cancel{kJ}/Nm^3 \cdot 0{,}89} = 839{,}52\ Nm^3/h$

I COMBUSTIBILI

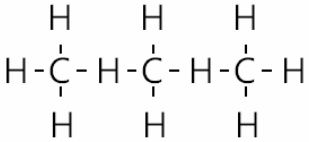
C
H Idrocarburi

Caratteristiche di alcuni
tipi di gas→→→→→→→→→→

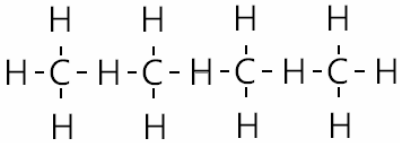
Metano CH_4



Propano C_3H_8



Butano C_4H_{10}



I combustibili sono:

GASSOSI→→→(G.P.L. Metano)
LIQUIDI→→→(Gasolio Kerosene)
SOLIDI→→→(Carbone Legna)

- *Gassosi*

CH_4 METANO
Gas naturale, più leggero dell'aria;
Il suo potere calorifico inferiore (p.c.i.) è 8.500 kcal/Nm³ → 35.581 kJ/Nm³ → 35,58 MJ/Nm³

- *Liquidi*

GASOLIO
Il suo potere calorifico inferiore (p.c.i.) è 10.200 kcal/kg → 42.697 kJ/kg
Viscosità 1,1°E
OLIO COMBUSTIBILE
Il suo potere calorifico inferiore (p.c.i.) è 9.600 - 9.800 kcal/kg → 40.186 – 41.023 kJ/kg
Viscosità da 3-5°E in su

Viscosità: esprime la "fatica" che fa un fluido a scorrere su se stesso e nelle tubazioni.
Unità di misura della viscosità (°E) gradi Engler ; viene anche indicato con una temperatura
es. 10°E a 40°C →°$E_{10/40}$
Nota: il gasolio ha una viscosità pari all'acqua (0,9-1,3) ne è vietato il preriscaldamento

Viscosimetro è uno uno strumento impiegato principalmente per determinare il grado di viscosità relativa (°E) degli oli e indica il rapporto tra il tempo di efflusso del fluido in esame e quello dell'acqua distillata a temperatura costante.
Per esempio: 200 ml di un olio in esame defluiscono a 40 °C in 600 secondi; 200 ml di acqua distillata alla stessa temperatura defluiscono in 60 secondi. La viscosità relativa a 40 °C espressa in gradi Engler sarà 600/60 = 10 e verrà scritta così 10°E a 40°C

- *Solidi*

- Carbone → Antracite e litantracite p.c.i. 7.500 – 8.000 kcal/kg
- Ligniti → p.c.i. 7.000 kcal/kg
- Torba → p.c.i. 4.000 kcal/kg
- Legno → p.c.i. 3.000 - 4.000 kcal/kg

Potere calorifico

S'intende *potere calorifico* la massima quantità di calore fornito da un chilo o Nm^3 di combustibile, bruciato in modo completo (kcal/kg – kcal/Nm^3 oppure kJ/kg – kJ/Nm^3).

Sapendo il *potere calorifico* del combustibile che ho a disposizione posso risalire alla quantità di calore utilizzabile.

Punto di infiammabilità: temperatura alla quale la quantità di vapori prodotti (vapore di combustibile) è sufficiente a formare con l'aria una miscela infiammabile (*fiammata*).

Punto d'accensione: temperatura alla quale la quantità vapori prodotti è tale a mantenere una *combustione continua.*

Temperatura d'innesco: temperatura alla quale deve essere portata una parte della miscela aria combustibile per iniziare la combustione.

Innesco della combustione: è uno strumento che fornisce l'inizio della reazione chimica di ossidazione; tecniche attualmente in uso scarica → elettrica di 8/15.000 Volt
→ fiamma pilota
→ stoppaggio (rarissimo ai giorni nostri)

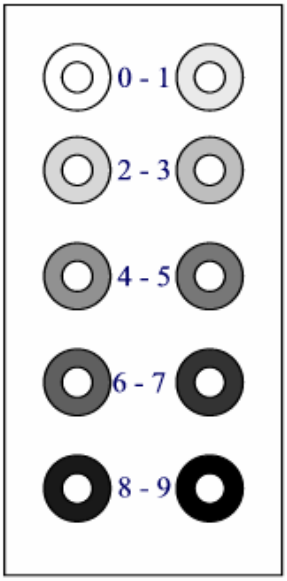
Autoaccensione: temperatura alla quale la miscela aria combustibile si autoinnesca.

Zona di esplosione: limite percentuale inferiore e superiore della miscela aria – vapori (o gas) di combustibile entro il quale si ha l'esplosione.

Opacità BACHARACH

La presenza di fuliggine nei fumi vuol dire avere una combustione non perfetta, quindi non è stato bruciato tutto il carbonio presente nel combustibile. Il grado di opacità *Bacharach* è il modo con il quale si verifica la quantità del carbonio che è rimasto incombusto.

La *scala Bacharach* è una scala cromatica che va da 0 (fumo trasparente) fino a 9 (fumo nero).



Il grado di opacità si esegue prendendo (con uno strumento a pompa) un campione di fumo della caldaia e facendolo passare attraverso un filtro, il quale trattiene le particelle di incombusti.
Il filtro poi viene postato dietro alla scala cromatica (vedi sopra) e messo a confronto.
Ci sono alcuni valori massimi ammessi, che sono:

- per gasolio 0 - 1

I BRUCIATORI

I bruciatori sono gli apparecchi di combustione per combustibili:

- **Solidi**
- **Liquidi**
- **Gassosi**

►Devono avere un certo *campo di regolazione*, cioè la possibilità di regolare la potenzialità in base alle esigenze, ed è definito come il rapporto tra il minimo e il massimo di portata del combustibile per una combustione completa.
►La *portata massima* è determinata dalla pressione del combustibile e dalla massima portata del ventilatore.
►La *portata minima* invece, è determinata dalla pressione minima del combustibile per ottenere una buona polverizzazione. La velocità della miscela di combustibile non deve essere inferiore alla velocità di ritorno di fiamma, in modo particolare per i gas.

►*Stabilità di fiamma* in fase di partenza, perché con partenza a freddo, il combustibile potrebbe non evaporare, e quindi bruciare male.

►*Volume di fiamma*, il quale deve essere proporzionato alla dimensione della camera di combustione.

►*Sicurezza e facilità di conduzione*, devono essere sicuri che in caso di anomalie, si blocchi il bruciatore, e facili da manovrare.

Tipi di regolazione

1. ON-OFF → tutto o niente

Sono bruciatori *acceso – spento*, quando è acceso danno quello per cui sono stati regolati, sono regolati da *pressostati* uno di minima e uno di massima, più uno di sicurezza.
Vengono usati per impianti di riscaldamento o caldaie di piccola potenza.

2. BI-STADIO → Alto – basso – niente

In questo tipo di bruciatori ci sono due testine polverizzatrici (in alcuni casi 3), a portata uguale (50/50), a *massima potenza* funzionano tutti e due gli ugelli, a metà carico ne funziona uno solo oppure niente.È usato per caldaie con potenzialità medie, con poche variazioni di pressione ed è comandato da pressostati.Il vantaggio è che si riesce a mantenere una temperatura quasi costante in camera di combustione.

3. MODULANTE

Questo tipo di bruciatore viene montato su impianti medio – grandi, la fiamma è proporzionata alla quantità di vapore richiesta, è regolato da un *pressostato differenziale*, il quale da degli impulsi ad un servomotore che comanda un'albero a camme, più uno di sicurezza.

Difficile è la regolazione del rapporto aria comburente – combustibile, essa si effettua comunque nel raggio di *maggior utilizzo* del bruciatore, successivamente viene eseguita la regolazione del minimo e il massimo.

Il *vantaggio* di questi bruciatori è che rimane pressoché costante la temperatura in camera di combustione, di conseguenza vi è un minor consumo di carburante, e la fiamma varia in base alla richiesta di vapore.

Principio di funzionamento
Nel bruciatore modulante la *regolazione* della portata viene fatta *strozzando* il ritorno del carburante, più si chiude la valvola sul ritorno, maggiore è la quantità di combustibile che passa attraverso la testina polverizzatrice.

BRUCIATORE A GASOLIO

Circuito aria → serranda, ventilatore, deflettore.
Circuito gasolio → filtro, pompa, eventuale regolazione pressione, elettrovalvola, ugello o coppa rotante.
Circuito elettrico → motore ventola, quadretto elettrico, fotoresistenza, trasformatore, cavo alta tensione elettrico.

Funzioni del bruciatore

Fase di lavaggio della camera di combustione

Il bruciatore *apre* completamente la *serranda* dell'aria, facendo entrare in camera di combustione una gran quantità d'aria, eliminando eventuali *residui* di *vapori di combustibile* che potrebbero provocare lo scoppio del focolare.
È *importante* che la durata del lavaggio non diminuisca mai e la serranda si apra completamente, seguendo correttamente il meccanismo esterno di apertura e chiusura. Il tempo di lavaggio, dipende dal volume della camera di combustione e dal tipo di combustibile (c.c. grande e gas, tempo elevato).

La polverizzazione
La miscelazione
L'accensione
Queste tre fasi partono contemporaneamente in camera di combustione, in caso contrario, significa che il lavaggio fatto in precedenza non è stato eseguito in modo corretto, con il rischio dello scoppio in camera di combustione.

→L'accensione può avvenire, o con una scarica elettrica da 8000 a 15000 volt tra due *elettrodi*, o tramite ad una fiamma pilota a G.P.L. o a metano.

Regolazione del rapporto aria comburente – combustibile

La regolazione deve essere fatta in modo tale che la fiamma del bruciatore rimanga stabile anche con il variare del carico.

Il controllo della fiamma

Il controllo della fiamma è svolto da una *fotocellula* sovreccitata dalla forte luminosità della fiamma, permettendo il buon funzionamento dell'apparecchio bruciatore.
Se viene a mancare questa luminosità, da non confondere con una luminosità qualsiasi, deve mandare in blocco il bruciatore.

Polverizzazione

A *spinta meccanica*, vi è una pompa che mette in pressione il combustibile, essa è comandata da *un'elettrovalvola* d'intercetto sul carburante, la quale è a sua volta comandata da una fotocellula detta *blocco fiamma*, che vede la presenza della fiamma, in caso contrario fa chiudere l'elettrovalvola.La *testina polverizzatrice* è formata principalmente da due parti avvitate l'una nell'altra, la parte interna è provvista di *scanalature* che sono *tangenti* al pezzo stesso, nella parte centrale di essa dove convergono le scanalature vi è una cavità detta *camera vortice*, la quale dà al combustibile un moto rotatorio. Grazie alla pressione, il combustibile viene spinto attraverso un foro calibrato detto ugello, che si trova sul pezzo esterno della testina, in corrispondenza della camera vortice.

Ogni testina polverizzatrice ha una forma diversa, in base alla portata, alla forma della fiamma, e al tipo di combustibile.

Se il bruciatore è regolato per *carichi alti*, ma si lavora a *carichi bassi,* la fiamma si può aprire troppo, *sbattendo* contro le pareti del focolare, per *ovviare* a quest'inconveniente, la testina polverizzatrice è inserita in un cono regolabile, che oltre a evitare che la fiamma si allarghi troppo, aiuta ad incanalare l'aria comburente verso la fiamma
Sulla *testina* vi è *stampigliata una sigla*, con la quale si può avere tutte le informazioni della testina osservando una tabella.

TABELLA PORTATA UGELLI PER GASOLIO*									
UGELLO G.P.H.	PRESSIONE POMPA IN BAR								
	8	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
0,50	1,70	1,80	1,90	1,99	2,08	2,17	2,25	2,33	2,40
1,00	3,40	3,61	3,80	3,99	4,16	4,33	4,50	4,65	4,81
2,00	6,80	7,21	7,60	7,97	8,33	8,67	8,99	9,31	9,61
3,00	10,20	10,82	11,40	11,96	12,49	13,00	13,49	13,96	14,42
4,00	13,60	14,42	15,20	15,94	16,65	17,33	17,99	18,62	19,23
5,00	17,00	18,03	19,00	19,93	20,82	21,67	22,48	23,27	24,04
6,00	20,40	21,63	22,80	23,92	24,98	26,00	26,98	27,93	28,84
G.P.H.	PORTATA ALL'USCITA DELL'UGELLO IN kg/h								

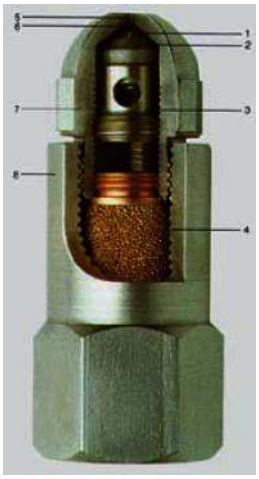
Estratto di tabella (G.P.H. è stampigliato sugli ugelli e indica *Galloni per ora*)

Esempio:
Conoscendo il potere calorifico inferiore del nostro combustibile nel nostro caso gasolio

p.c.i. gasolio = 10.200 kcal/kg
ugello G.P.H. = 4,00
pressione della pompa = 12 bar
portata = incrociando i dati sulla tabella troviamo il valore di 16,65 kg/h

10.200 kcal/~~kg~~ · 16,65 ~~kg~~/h = 169.830 kcal/h → e sapendo che 1 kW = 860 kcal/h ottengo che 169.830 kcal/h ≈ 197,5 kW

Nota: il dato ottenuto deve ssere uguale o inferiore alla potenza al focolare della caldaia



Tipi di polverizzazione

- VAPORE
- ACQUA
- ARIA
- ULTRASUONI
- A COPPA ROTANTE Il carburante entra in camera di combustione attraverso un cono che ruota su se stesso ad alta velocità, esso fa sì che il combustibile formi una pellicola sottile sul bordo del cono, e grazie all'aria primaria che viene soffiata in un cono fisso parallelo si polverizza.

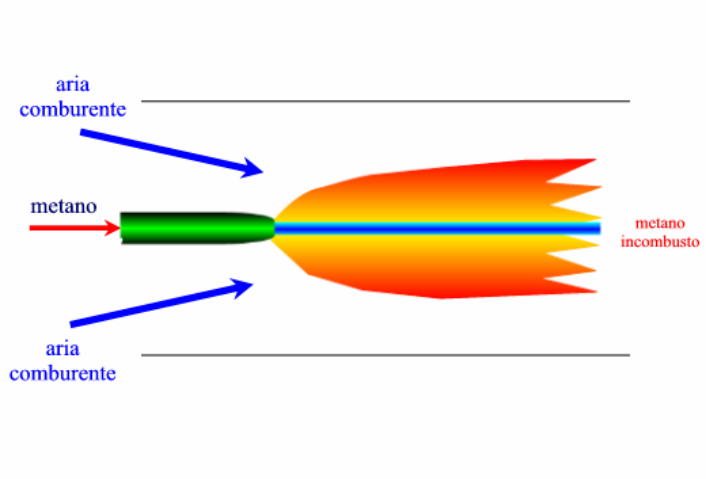
BRUCIATORI A GAS

Con questo tipo di bruciatori perdiamo sia il preriscaldo, sia la polverizzazione, essi sono classificati anche in funzione della miscelazione gas-aria e dell'immissione dell'aria.

Pressione gas
- Alta
- Bassa

Miscela dell'aria
- A premiscelazione
- A miscelazione all'ugello

Entrata dell'aria
- Ad aria aspirata
- Ad aria soffiata



Ve ne sono di due tipi:

1. Atmosferico: gas ad alta pressione e premiscelazione ad aria aspirata
2. A diffusione: a miscelazione all'ugello e aria soffiata

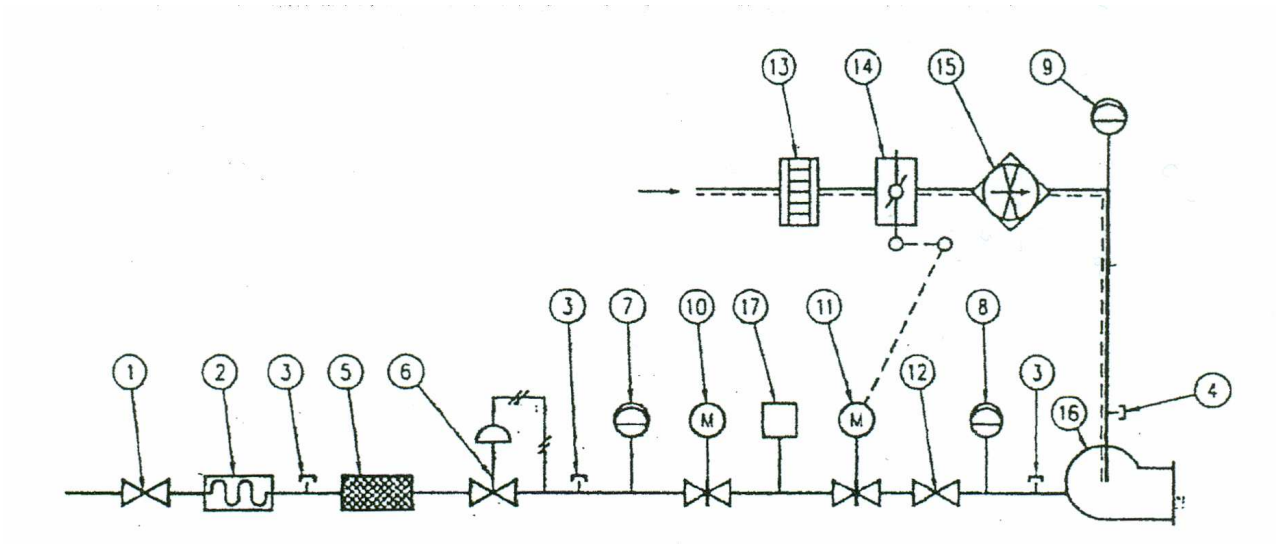
Tutti i tipi di bruciatori di tipo industriale sono del tipo a diffusione.
Il decreto 661/96 determina che tutti gli accessori della rampa del bruciatore a gas siano certificati CE, precisando così un livello minimo di sicurezza della linee bruciatori.

I bruciatori escono di fabbrica con tutti gli accessori collegati, esclusi la *valvola d'intercetto* e il *giunto antivibrante*.

Il gas metano è considerato un gas "duro", cioè fatica a bruciare, se non ha il giusto rapporto con l'ossigeno.

Se si agisce sul rapporto con l'aria comburente, per migliorare la combustione, è necessario ricordarsi di NON agire subito sull'aria, ma di ridurre prima il gas, dopodiché aumentare l'aria di molto, e successivamente regolare il gas.

Schema esemplificato di installazione di un bruciatore per bassa pressione



1. Rubinetto di intercettazione
2. Giunto antivibrante
3. Presa pressione gas per la misura della pressione
4. Presa pressione aria
5. Filtro gas
6. Regolatore pressione gas
7. Organo di controllo della minima pressione gas
8. Organo di controllo della massima pressione gas
9. Organo di sicurezza della minima pressione aria
10. Elettrovalvola di sicurezza classe A. - Tempo di chiusura $T_c \leq 1s$
11. Elettrovalvola di regolazione ad apertura lenta o a più stadi classe A con organo di regolazione della portata gas incorporato. Tempo di chiusura $T_c \leq 1s$. Potenza di avviamento compresa fra il 10% e il 40% della potenza termica nominale.
12. Eventuale dispositivo di regolazione manuale di portata gas.
13. Griglia o rete di protezione o altro dispositivo che non consenta il passaggio di una sfera di diametro maggiore di 12 mm.
14. Serranda di regolazione aria, in relazione funzionale con la elettrovalvola11.
15. Ventilatore aria.
16. Testa di combustione
17. Dispositivo di prevenzione delle fughe interne di gas.

COMBUSTIONE REALE

1. Esame visivo della fiamma

Si deve adattare la forma della fiamma a quella del focolare, cioè essa deve occupare il massimo volume della camera di combustione senza toccarne le pareti, deve essere in asse con il focolare in ambiente limpido. Si agisce per la regolazione sulla pressione di spinta della pompa, sulle dimensioni e grado di apertura dell'ugello e sulla turbolenza dell'aria comburente.

2. Colore della fiamma

- Liquidi

1. Eccesso d'aria ottimale, fiamma colore giallo – bianco abbagliante con temperatura elevata.
2. Eccesso d'aria elevato, fiamma colore giallo – rossastro, con temperature relativamente basse.
3. difetto d'aria (eccesso d'aria al di sotto dei livelli normali), fiamma colore rossastro tendente al rosso con temperature basse.

-Gas

1. Con bruciatore di tipo atmosferico una buona fiamma avrà un colore azzurro trasparente.
2. Con bruciatore a diffusione si avrà una fiamma azzurra con frange rossastre.

Correlazione tra eccesso d'aria e formazione d'incombusti solidi

1.Con eccesso d'aria si ha:

a. Alterazione dell'aspetto visivo degli incombusti al camino e aumento degli stessi in camera di combustione.
b. Riduzione della temperatura di fiamma e dell'attività di combustione nella zona iniziale della fiamma.
c. Le goccioline del combustibile liquido non bruciano completamente in camera di combustione, formando incombusti.
d. Riduzione della forma della fiamma.
e. Aumento delle perdite al camino.

A parità d'eccesso d'aria si può ridurre la formazione di incombusti, migliorando la polverizzazione del combustibile, e tramite l'ugello e il diffusore, si può modificare la forma della fiamma.

2.Difetto d'aria

a. Allungamento e allargamento della fiamma.
b. Formazione d'incombusti solidi all'uscita della Camera di combustione.
c. Formazione d'incombusti gassosi
d. Perdite latenti

NOTE:

Una cattiva polverizzazione può essere data da:

► Preriscaldo del combustibile troppo basso
► Ugello sporco o deformato
► Pressione di spinta troppo basso

Una cattiva miscelazione è data invece da:

► Deflettore d'aria sporco per gocciolamenti
► Cono bruciatore non in posizione ottimale

COMPITI DEL CONDUTTORE

Presa in consegna del generatore:

Prendere visione del libretto e dei verbali allegati, ed accertarsi che sia in regola con le verifiche.

Inizio turno:

Prendere le consegne dal turno precedente, ed accertarsi che sia tutto in ordine, il cambio turno deve avvenire in centrale termica

Avviamento:

Fase più delicata e più pericolosa per il generatore: Partenza a carico minimo (portata minima del bruciatore), e aumento della temperatura non troppo rapido, per evitare eccessive dilatazioni localizzate. In questa fase, si consiglia la partenza non in automatico, e sfiato dell'aria dalla camera vapore. Lo sfiato aria verrà chiuso dopo che sarà stato spurgato un bel po' di vapore.
A bassa pressione (all'inizio della pressurizzazione), controllare le apparecchiature di controllo, regolazione ed eventuali tenute da flangie e passo d'uomo.

A regime:

Apertura della valvola di mandata vapore, molto, molto lentamente (tubazioni fredde, forte condensazione, rapida dilatazione, colpi d'ariete).

CONTROLLI DA EFFETTUARE E PROVE DI PREVENZIONE

Strumento	*Frequenza*
V.d.S.	1 volta al mese (1-2 volte anno prove di taratura)
Indicatori di livello	1 volta per turno
Livellostati di regolazione	1 volta per turno
Livellostati di blocco	1 volta a settimana
Mezzi d'alimentazione	1 volta al mese (2° mezzo)
Fotocellule, fotoresistenze sonda ionizzatrice	1 volta a settimana
Elettrovalvole di blocco combustibile	Periodicamente
Lavaggio del bruciatore (in C.C.)	Periodicamente

INTERVENTI DI EMERGENZA

Abbassamento del livello minimo:

1. Si vede ancora acqua
   - Bloccare il bruciatore
   - Chiudere la presa vapore
   - Spegnere la pompa d'alimentazione

Verificare la causa e verificare il livello.

2. NON si vede più acqua
   - Bloccare il bruciatore
   - Chiudere la presa vapore
   - Spegnere la pompa d'alimentazione

Verificare la causa, aprire la caldaia e controllare presenza eventuale di deformazioni.

Nel dubbio sulla resistenza della struttura, è meglio avvertire l'I.S.P.E.S.L. e richiedere una verifica.