

**APPUNTI DI**  
**REGOLAZIONE E CONTROLLO**  
**DEI GENERATORI DI VAPORE**

Prof. G.Langella

# INDICE

## CAPITOLO PRIMO INTRODUZIONE

## CAPITOLO SECONDO PRINCIPI E TEORIA DELLA REGOLAZIONE E DEL CONTROLLO

- 2.1 – Definizioni
  - 2.1.1. - Regolazione e/o controllo in circuito aperto
  - 2.1.2. – Regolazione e/o controllo in circuito chiuso
- 2.2 – Classificazione dei regolatori
  - 2.2.1. – Regolatori a due posizioni
  - 2.2.2. – Regolatori a posizioni multiple
  - 2.2.3. – Regolatori modulati a due posizioni
  - 2.2.4. – Regolatori flottanti
  - 2.2.5. – Regolatori proporzionali (P)
  - 2.2.6. - Regolatori integrali (I)
  - 2.2.7. – Regolatori proporzionali integrali (PI)
  - 2.2.8 – Regolatori proporzionali integrali derivativi (PID)

## CAPITOLO TERZO REGOLAZIONE E CONTROLLO DI UN GENERATORE DI VAPORE

- 3.1 - Introduzione
- 3.2 – Sistema di controllo per la regolazione di un generatore
  - 3.2.1. – Variazioni di carico
  - 3.2.2. – Efficienza di funzionamento
  - 3.2.3. – Vita del macchinario
  - 3.2.4. – Sicurezza di esercizio dell'impianto
  - 3.2.5. - Disturbi
- 3.3. – Caratteristiche di gestione
- 3.4. – Specifiche di regolazione
  - 3.4.1. – Regolazione della potenza generata
  - 3.4.2. - Regolazione di portata del vapore
  - 3.4.3. – Regolazione di pressione e temperatura d'uscita del vapore
  - 3.4.4. – Regolazione della pressione in camera di combustione

## CAPITOLO PRIMO INTRODUZIONE

Nell'ambito della produzione del calore la regolazione automatica dell'impianto termico gioca senza dubbio un ruolo di fondamentale importanza, tanto che attualmente sarebbe impossibile immaginare, anche per un operatore esperto, una gestione efficiente e sicura di una centrale termica senza l'ausilio delle tecnologie più moderne che l'automazione mette a disposizione. In particolare la regolazione di un generatore di vapore rappresenta uno degli aspetti essenziali e indiscutibilmente più complessi nel settore più generale della regolazione di un impianto termico.

Difatti, il progetto di un regolatore tramite metodi matematici è realizzabile solo se la dinamica del sistema che si vuole controllare è abbastanza semplice e nota. Però quando si considera un generatore di vapore subito ci si rende conto di trovarsi di fronte ad un processo estremamente difficile da modellare, sia per l'enorme numero di variabili masse in gioco, sia perché in esso sono presenti non-linearità abbastanza pronunciate di cui si deve tener conto se si vuole tentare di costruire un modello seppur approssimato di esso.

E' opportuno osservare che il costo dell'impianto influenza enormemente le scelte riguardanti il tipo di controllo da effettuare. Nel caso si abbiano impianti di notevole costo e complessità è importante avere un controllo raffinato. E' necessario avere un modello del processo il più possibile accurato, di modo che un esperto di controlli riesca a progettare un controllore efficiente.

Nel caso, invece, si abbia a che fare con impianti di piccole-medie dimensioni, è poco conveniente ricorrere a tecniche di controllo raffinate. Inoltre la realtà mostra che, in tali casi, l'operatore addetto alla definizione della legge di controllo per il sistema a controreazione non è esperto di controlli automatici quindi può trovarsi in difficoltà nella definizione della messa a punto di un sistema di controllo. Per questi tipi di esigenze, l'automazione mette a disposizione delle apparecchiature note come **controllori standard**. Essi permettono, qualora non si abbia a disposizione il modello del processo oppure se l'operatore è un persona non "addetta ai lavori" nel campo della progettazione dei sistemi di controllo di poter eseguire una regolazione del processo selezionando alcune azioni standard di controllo. In questo caso il regolatore non si progetta ma si predispose: cioè la scelta dei parametri del regolatore non è fatta in base a considerazioni di tipo progettuale - analitico (in cui identificato il processo, si sceglie tra i vari tipi di azione la più opportuna per rispondere ad un certo insieme di specifiche cui deve soddisfare il sistema controreazionato) ma si tenta, identificando in qualche modo le proprietà del processo da controllare di ricavare delle regole semplici e generali per effettuare la predisposizione e cioè la scelta dei parametri del regolatore.

L'implementazione dei regolatori standard ha subito, comunque, nel corso degli anni, una notevole evoluzione grazie anche all'avvento dell'elettronica e dell'informatica che hanno permesso una realizzazione di sistemi di regolazione che fanno della flessibilità di utilizzo e della potenza computazionale i loro punti di forza. Si è pervenuti, così, ad impianti di regolazione basati su sistemi hardware e software in grado di poter gestire differenti tipologie di generatori, con costi minimi per le eventuali modifiche da apportare, e tempi di messa a punto abbastanza brevi.

## CAPITOLO SECONDO

# PRINCIPI E TEORIA DELLA REGOLAZIONE E DEL CONTROLLO

### 2.1 – DEFINIZIONI

Un processo si dice **regolato**, quando esiste un sistema che agisce su qualche organo, al fine di mantenere costante la grandezza in esame.

Un processo si dice **controllato**, quando esiste un sistema che agisce su qualche organo, al fine di far variare la grandezza in esame secondo una legge prefissata.

L'insieme delle apparecchiature in grado di funzionare nel modo descritto, prende il nome di **sistema di regolazione**, o **sistema di controllo**.

Con riferimento alle modalità di funzionamento, i sistemi di regolazione e di controllo possono essere classificati in:

- ❑ sistemi in circuito aperto
- ❑ sistemi in circuiti chiuso

#### 2.1.1 – REGOLAZIONE O CONTROLLO IN CIRCUITO APERTO

Per **regolazione o controllo in circuito aperto** si intende un semplice comando, al quale non viene fatta seguire un'azione di verifica del risultato ottenuto.

Ciò significa che in un sistema di questo tipo, ad ogni valore del segnale d'ingresso si suppone corrisponda un certo valore della variabile d'uscita, ovvero della grandezza regolata (o controllata).

Il controllore è comandato solo dai valori delle grandezze d'ingresso senza prendere in considerazione il valore della grandezza d'uscita.

E' evidente che per ottenere buoni risultati, devono restare costanti tutti i parametri di funzionamento (assenza di **disturbi**), poiché il sistema non è in grado di rilevare, e quindi di correggere automaticamente, eventuali differenze tra il valore reale della variabile di uscita e quello desiderato.



Fig.2.1.1-Principio generale della regolazione in circuito aperto.

Tale sistema è quindi utilizzato per sistemi di basse prestazioni, o quando c'è comunque un operatore che controlla visivamente il risultato ottenuto (come avviene ad esempio nei telecomandi).

Certamente i generatori di vapore non sono controllati con sistemi di questo tipo.

## 2.1.2 – REGOLAZIONE E/O CONTROLLO IN CIRCUITO CHIUSO

La *regolazione o controllo in circuito chiuso* (detto anche *controllo a controreazione*) consiste nel fare agire un regolatore in funzione della grandezza che esso controlla.

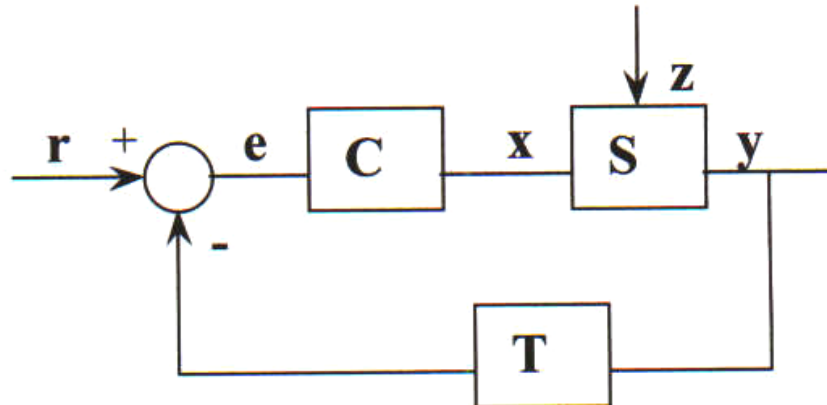


Fig.2.1.2.- schema di un sistema a controreazione.

Un sistema di questo tipo si basa sul principio secondo il quale (vedere fig.2.1.2.) dato il sistema **S** sottoposto a disturbi diversi **z**, si hanno delle variazioni della grandezza in uscita **y** (variabile da regolare). Tale grandezza, trasformata in segnale di retroazione mediante il *trasduttore T* e confrontata con un segnale di riferimento prefissato **r** (detto valore di SET POINT), determina un segnale di errore **e** che rappresenta una misura dello scostamento dal valore prefissato. Il controllore **C** trasforma poi il segnale **e** in una variazione di **x**, detto segnale di pilotaggio, che agisce in modo opportuno sul sistema **S** in modo che la grandezza **y** si riporti al valore di riferimento.

Un circuito può essere più o meno difficile da regolare a seconda di:

- *costante di tempo equivalente*, funzione del sistema da controllare
- *costante di ritardo equivalente*; questo valore è destabilizzante poiché, dopo che il regolatore ha svolto un'azione, esso non può osservarne gli effetti prima che sia trascorso il tempo di ritardo.

La difficoltà di regolazione di un sistema, in funzione del suo comportamento dinamico, può essere quantificata dal rapporto tra il suo tempo di ritardo e la sua costante di tempo:

$$\lambda = \frac{\text{tempo\_di\_ritardo\_equivalente}}{\text{costante\_di\_tempo\_equivalente}}$$

Il rapporto così definito viene chiamato grado di difficoltà di regolazione. Più il suo valore è piccolo, più facile è la regolazione; in particolare:

- $1 < 0.1$  è considerato facile
- $0.1 < 1 < 0.3$  è considerato di media difficoltà
- $1 > 0.3$  è considerato difficile

E' quindi importante minimizzare i ritardi (ad esempio posizionando i sensori il più vicino possibile al luogo su cui agisce il regolatore) per ottenere una migliore qualità di regolazione.

In generale i sistemi più facili da trattare sono quelli lenti, mentre quelli più difficili sono quelli rapidi.

Esistono diversi tipi di sistemi di regolazione (in circuiti chiusi), che consentono di soddisfare le svariate problematiche di controllo e regolazione.

## 2.2 – CLASSIFICAZIONE DEI REGOLATORI

I regolatori sono classificati in base alla modalità operativa, essa rappresenta il metodo secondo il quale il regolatore effettua il calcolo di una correzione dovuta ad un dato scostamento.

Se ne possono distinguere due gruppi principali:

- **Regolatori non progressivi.** Essi non possono imporre altro che due o più posizioni fisse all'organo di regolazione. I principali sono:

1. Regolatori a due posizioni: tutto o niente.
2. Regolatori a posizioni multiple.
3. Regolatori modulati tutto o niente.

- **Regolatori progressivi.** Essi impongono all'organo di regolazione una posizione qualunque del suo campo di funzionamento. I principali sono:

1. Regolatori flottanti
2. Regolatori proporzionali (P)
3. Regolatori integrali (I)
4. Regolatori proporzionali integrali (PI)
5. Regolatori proporzionali integrali derivativi (PID)

### 2.2.1. – REGOLATORI A DUE POSIZIONI

Si tratta di un sistema di regolazione in cui l'elemento di controllo finale viene rapidamente mosso, secondo il segno dello scostamento (differenza tra la taratura e il valore reale), da una posizione all'altra. Poiché queste posizioni sono le estreme dell'elemento di controllo, questo sistema prende il nome di *"tutto o niente"*.

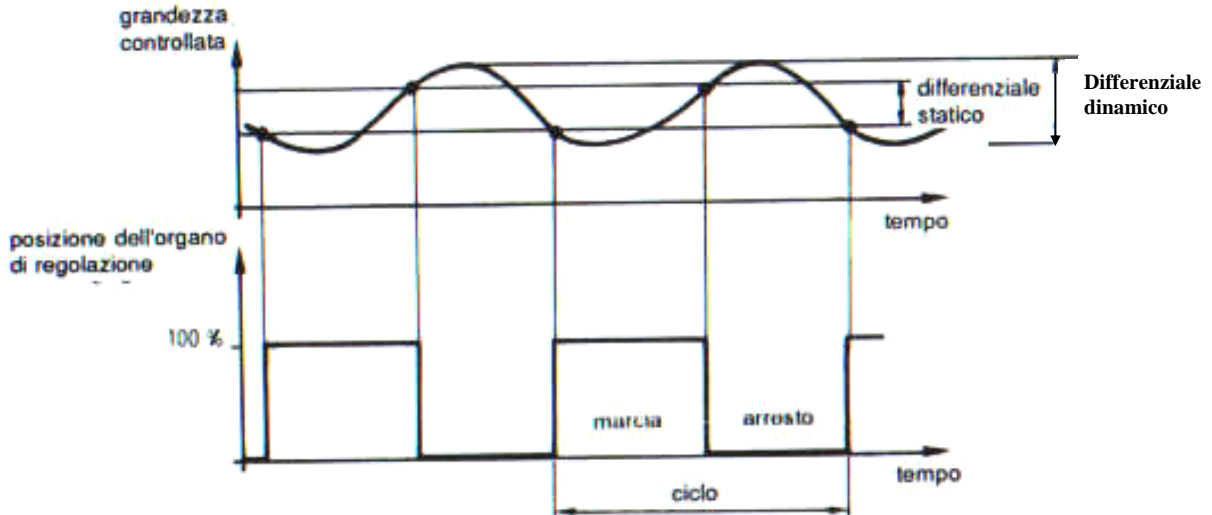


Fig.2.2.1.-Funzionamento di un regolatore a due posizioni

Il valore dell'ampiezza delle oscillazioni della grandezza controllata, è detta *differenziale dinamico*, tale valore è maggiore del *differenziale statico* di una quantità che dipende dall'inerzia del circuito.

Quando il differenziale statico è stretto, le oscillazioni presentano un'ampiezza più ridotta, tuttavia valori troppo ridotti del differenziale portano ad oscillazioni troppo frequenti dell'organo di regolazione che rischiano di ridurne la vita operativa. E' per questo che i regolatori a due posizioni vengono usati in applicazioni semplici, come dispositivi di allarme e di sicurezza.

### 2.2.2. – REGOLATORI A POSIZIONI MULTIPLE

In alcuni casi l'organo di regolazione può essere frazionato in più elementi, richiedendo quindi regolatori a posizioni multiple, in tal caso si hanno più gradini (del tipo tutto o niente) che lavorano in sequenza. Così facendo la precisione aumenta perché le potenzialità in gioco sul singolo gradino sono inferiori, cosa questa che consente di ridurre il differenziale statico e dinamico (legato quest'ultimo all'inerzia del sistema).

### 2.2.3. – REGOLATORI MODULATI A DUE POSIZIONI

In un normale regolatore a due posizioni, il tempo nel quale l'organo di regolazione resta nella stessa posizione (una delle due possibili), dipende dal tempo impiegato dalla grandezza controllata per variare il suo valore di un ammontare pari al differenziale statico.

Il principio del due posizioni modulato, è di far sì che un ritmo più rapido del ciclo di marcia-arresto assicuri una migliore stabilità alla grandezza controllata. Lo stesso regolatore determina la durata del ciclo e, all'interno del ciclo, modifica la durata del tempo di marcia in funzione dello scostamento in modo da far sì che la potenzialità media sia secondo richiesta (infatti maggiore è lo scostamento, maggiore sarà la richiesta di intervento del sistema e quindi maggiore sarà la fase di marcia).

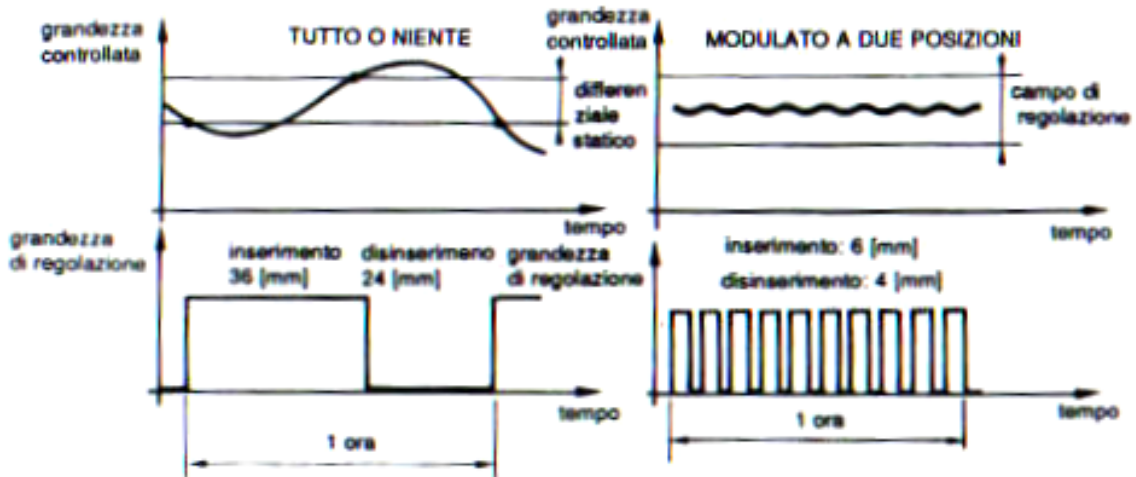


Fig.2.2.3.-Paragone tra un regolatore tutto o niente ed uno modulato con carico del 60%.

In altre parole l'energia erogata al sistema è proporzionale allo scostamento. Questo tipo di controllo viene perciò classificato come proporzionale o cronoproporzionale.

## 2.2.4. – REGOLATORI FLOTTANTI

Questi regolatori appartengono alla classe dei *progressivi*; consentono 3 posizioni dell'organo di regolazione:

- Movimento verso la chiusura
- Arresto o riposo
- Movimento verso l'apertura

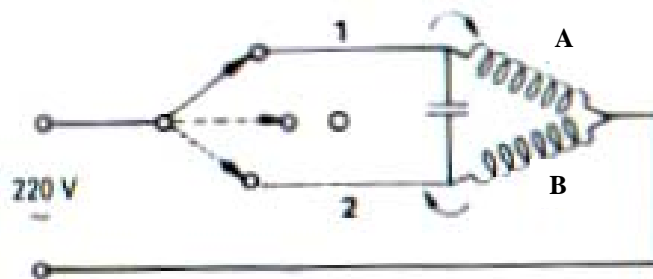


Fig.2.2.4.-Esempio di regolazione flottante.

Dalla figura in alto, si vede che se è eccitato l'avvolgimento **A**, si chiude il contatto **1** e si avrà una certa rotazione; se viene eccitato l'avvolgimento **B**, si chiude il contatto **2** con la conseguente rotazione inverso dell'organo di regolazione.

### 2.2.5. – REGOLATORI PROPORZIONALI (P)

Usando questo sistema si stabilisce una relazione continua e lineare tra il valore dello scostamento e la posizione dell'organo di regolazione all'interno di un campo che prende il nome di **banda proporzionale** (che viene espressa tipicamente in percentuale).

In altre parole l'organo di regolazione si sposta dello stesso valore per ciascuna unità di variazione della grandezza controllata.

Ripetendo in maniera più diretta, la **banda proporzionale** è la variazione della grandezza regolata necessaria per far compiere l'escursione completa della corsa dell'organo di regolazione.

L'obiettivo di un controllo, in generale, è quello di comandare l'organo di controllo secondo una particolare funzione:

$$\Delta y = f(\Delta x, t)$$

dove, **Dy** si definisce **azione regolante**, **Dx** è lo **scostamento** della grandezza regolata, **t** è il tempo.

Nel caso di regolazione proporzionale, l'azione regolante sarà pari a :

$$\Delta y = -k_p \cdot \Delta x$$

dove  $k_p$  rappresenta la **costante di regolazione proporzionale**, il segno “-“ dipende dal fatto che l'azione regolatrice ha verso contrario rispetto a quello di variazione della grandezza regolata.

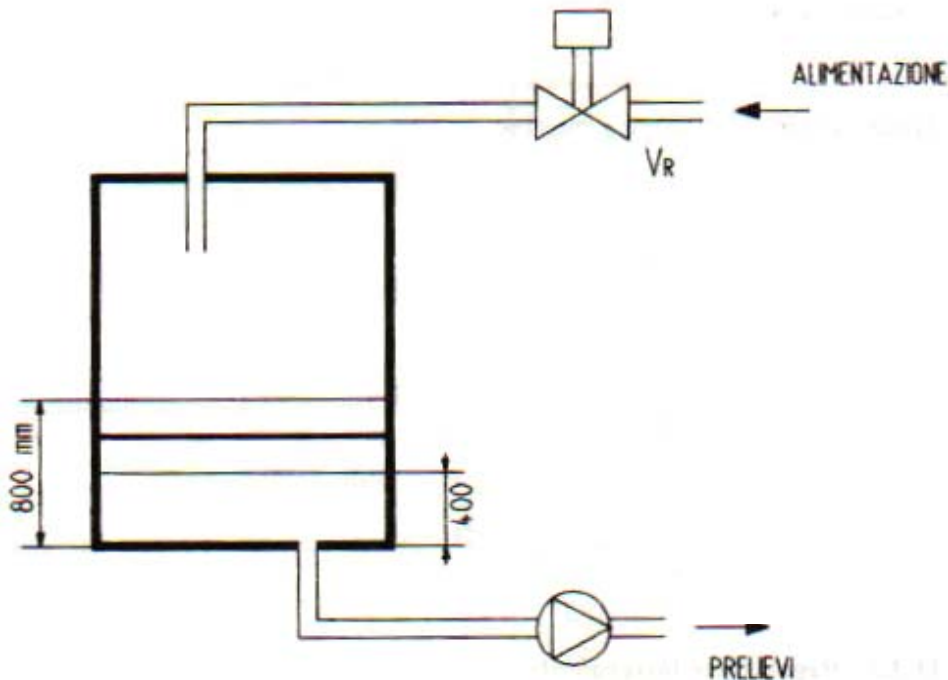
Dividendo i membri della relazione scritta sopra, si ha:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = -k_p \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Il rapporto  $Dx/Dt$  rappresenta la **velocità di variazione dello scostamento**;  $Dy/Dt$  è invece la **velocità dell'azione regolante**, per esempio la velocità di apertura di una valvola.

Quindi in un regolatore proporzionale la velocità dell'azione regolante è direttamente proporzionale alla velocità di variazione dello scostamento.

Per chiarire il concetto faccio riferimento ad un serbatoio, di cui si vuole regolare il livello del liquido contenuto, tra i due valori 400 e 800 mm.



Il campo di variabilità è  $800 - 400 = 400\text{mm}$ .

La regolazione viene effettuata per mezzo della valvola  $V_r$  ; il liquido viene prelevato secondo le necessità di servizio.

Per quanto detto prima,  $k_p$  è il rapporto tra l'azione regolante e lo scostamento; nel caso in esame definiamo pertanto il coefficiente  $k_p$  come il rapporto tra la sezione della valvola ed il livello del liquido rispetto a quello minimo.

Fissare per  $k_p$  ad esempio un valore di  $1/6$  significa che per un livello di  $380\text{mm}$  la sezione  $S$  della valvola deve variare di un  $\Delta S$  determinabile nel seguente modo:

$$\frac{1}{6} = \frac{\Delta S}{\Delta h}$$

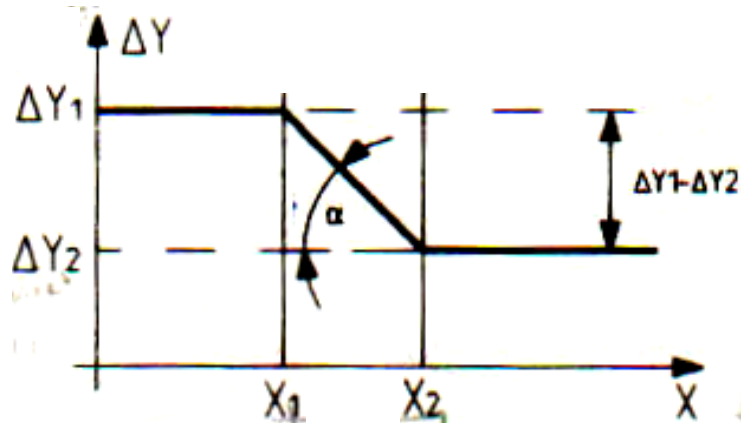
da cui  $\Delta S = -(1/6) \Delta h = -(1/6) (380-200) = -30 \text{ mm}^2$

Il segno “-” significa che la sezione della valvola diminuisce quando il livello aumenta e viceversa.

Le caratteristiche dei componenti sono tali che la valvola è tutta aperta quando lo scostamento è di  $100 \text{ mm}$  e tutta chiusa quando esso vale  $400 \text{ mm}$ ; la banda proporzionale è data da  $400 - 100 = 300 \text{ mm}$  ; essendo il campo di variabilità pari a  $400 \text{ mm}$ , la banda proporzionale in percentuale è  $300/400 * 100 = 75\%$ .

Ciò significa che l'intera escursione della valvola è compiuta per una variazione del  $75\%$  del campo di variazione del liquido.

Il diagramma della funzione regolatrice proporzionale in funzione della grandezza controllata è il seguente:



Dal diagramma, si può scrivere:

$$\Delta y_1 = -k_p \cdot x_1 \quad \Delta y_2 = -k_p \cdot x_2$$

Sottraendo membro a membro:

$$\Delta y_1 - \Delta y_2 = -k_p \cdot (x_1 - x_2)$$

e quindi:

$$-k_p = \frac{(\Delta y_1 - \Delta y_2)}{(x_1 - x_2)}$$

il rapporto al secondo membro rappresenta la tangente trigonometrica dall'angolo  $\alpha$ , pertanto:

$$-k_p = \operatorname{tg} \alpha$$

La pendenza del tratto inclinato del diagramma misura la *sensibilità* della regolazione proporzionale.

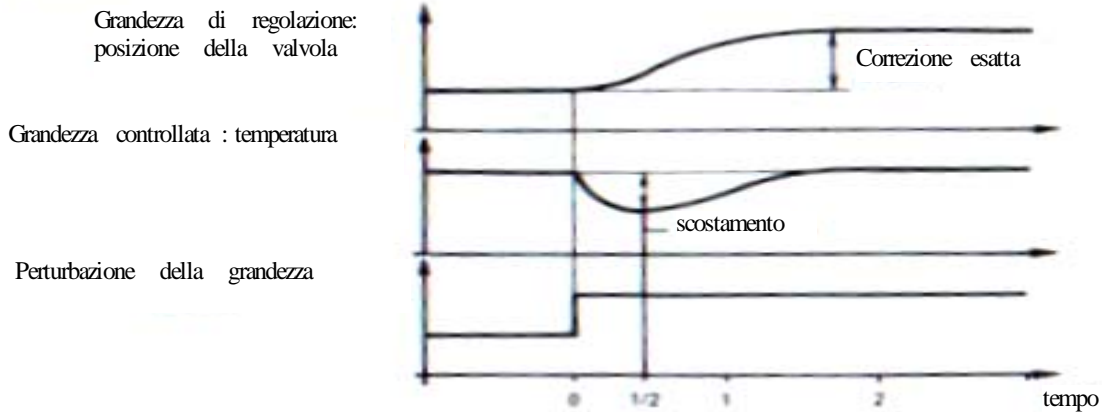
Un problema è quello relativo allo scostamento residuo, per ridurlo bisogna ridurre l'ampiezza della banda proporzionale, tenendo conto che esiste, però, una banda proporzionale minima al di sotto della quale il regolatore avrà un funzionamento ciclico assimilabile a quello del regolatore a due posizioni: questo fenomeno è detto *pendolazione*.

### 2.2.6. – REGOLATORI INTEGRALI (I)

Consideriamo il caso in cui la velocità di variazione dell'azione regolante è funzione dello scostamento; se tale dipendenza è proporzionale si può scrivere:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = -k_i \cdot \Delta x$$

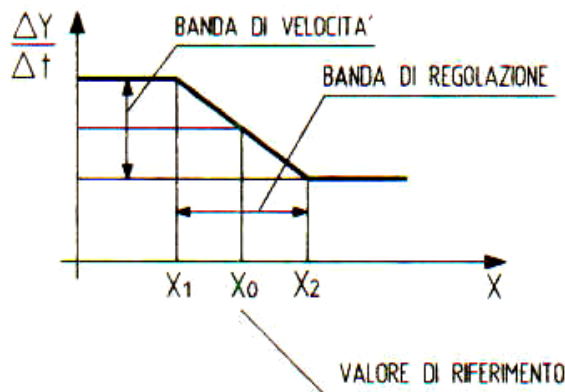
Tale relazione esprime il fatto che se, dato uno scostamento  $Dx_1$  della grandezza da regolare, si ha una velocità  $v_1$  di regolazione; quando lo scostamento diviene  $2Dx_1$  la velocità di regolazione assume il valore  $2v_1$ . Con tale sistema la velocità di regolazione tende a zero se il valore dello scostamento è zero, cioè quando il valore della grandezza regolata tende al valore di taratura



La denominazione *integrale* significa che viene eseguita una integrazione dell'evoluzione dei valori dello scostamento.

Questo sistema di regolazione esegue la correzione fintanto che lo scostamento non venga annullato, cosa questa impossibile nel caso di regolazione proporzionale.

Il diagramma che segue è il diagramma caratteristico di un regolatore integrale; si nota che ora la diretta proporzionalità esiste tra la velocità di regolazione e la grandezza regolata.

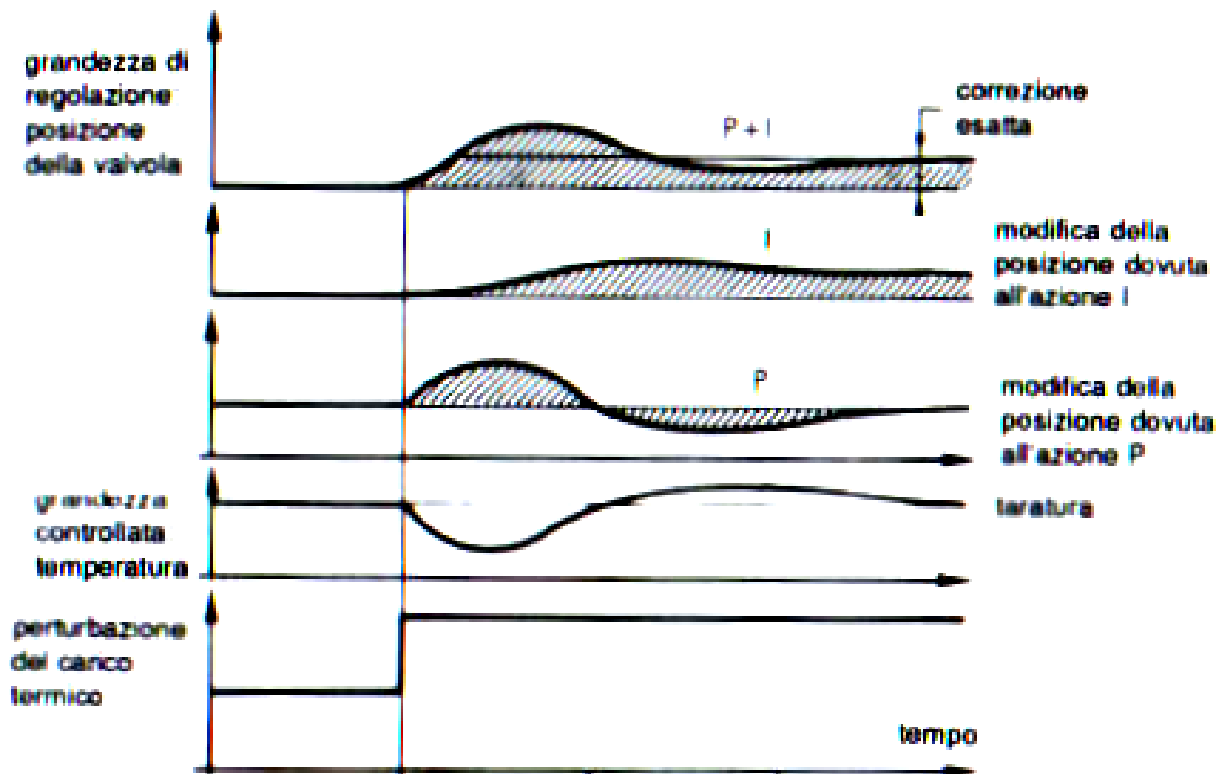


## 2.2.7. – REGOLATORI PROPORZIONALI INTEGRALI (PI)

Il sistema “integrale” ha l'importante vantaggio di poter effettuare una correzione fintanto che lo scostamento non si sia annullato.

La combinazione tra sistema integrale e sistema proporzionale, può far automaticamente annullare lo scostamento residuo caratteristico del sistema proporzionale.

Nella figura in basso, si nota che la correzione esatta avviene grazie alla somma delle due singole correzioni (proporzionale e integrale).



Il regolatore PI possiede quindi due parametri di regolazione:

- La **banda proporzionale**, che ripetendo è la variazione della grandezza regolata necessaria per far compiere l'escursione completa della corsa dell'organo di regolazione.
- La dosatura dell'azione integrale detta **costante di tempo di integrazione**, tale valore è il tempo, passato il quale l'azione proporzionale è replicata dall'azione integrale (cioè in parole diverse, tenendo presente che entrambe le regolazioni, I e P, agiscono sulla grandezza da regolare; il tempo in corrispondenza del quale, l'azione integrale determina una variazione della grandezza regolata uguale alla quantità di cui è responsabile l'azione proporzionale, è detto (tale tempo) costante di tempo di integrazione).

Tipicamente l'azione proporzionale garantisce, durante il transitorio, un grosso spostamento (proporzionale allo scostamento) dell'organo di regolazione (ad esempio una valvola), poi a regime l'azione integrale garantisce l'eliminazione dello scostamento residuo (che caratterizza la regolazione proporzionale).

Nel caso in cui la costante di tempo di integrazione sia troppo grande (bassa velocità di intervento), il sistema impiegherà parecchio tempo ad annullare lo scostamento residuo.

Viceversa, se è troppo piccola (alta velocità), il sistema è più pronto alla regolazione, anche se bisogna evitare costanti di tempo di integrazione troppo piccole, che possono comportare fenomeni di *pendolazione*.

## 2.2.8. – REGOLATORI PROPORZIONALI INTEGRALI DERIVATIVI (PID)

Quando è necessario rilevare e correggere gli scostamenti nel modo più rapido possibile, si deve tener conto non solo del valore dello scostamento stesso, ma anche della sua velocità di variazione. Infatti, tenuto conto dei ritardi, una perturbazione forte e brutale necessita di una compensazione effettuata con un surplus di energia al momento dell'inizio dell'azione correttiva.

Il surplus d'apertura della valvola deve in questo caso dipendere dalla velocità con la quale la grandezza regolata si scosta dalla taratura. Il surplus dovrà sparire nel momento in cui la velocità di variazione si annulla. Questo è il compito dell'azione derivativa D, per questo tipo di regolazione, vale la seguente:

$$\Delta y = -k_d \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

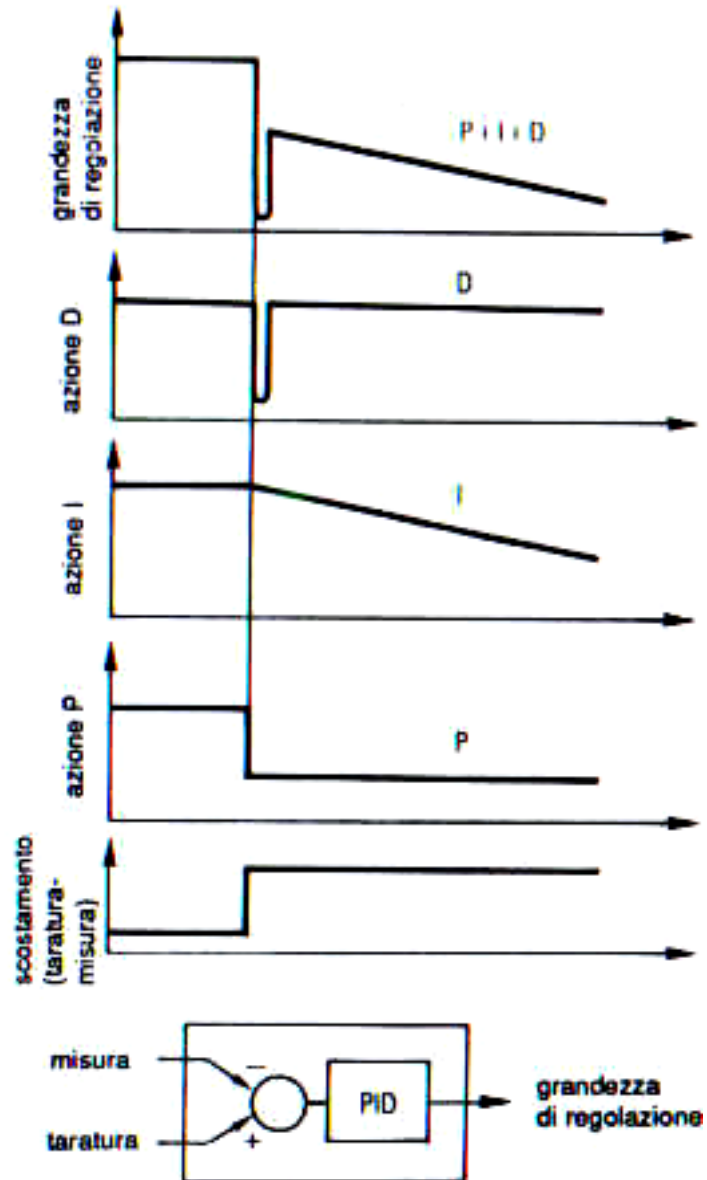
dalla relazione scritta si evince la proporzionalità diretta (mediante  $K_d$ ) tra l'azione regolante e la velocità di variazione dello scostamento.

Derivando la relazione pocanzi scritta, si può facilmente capire che la velocità dell'azione regolante, è proporzionale all'accelerazione dello scostamento.

La regolazione PID combina i tre sistemi di regolazione, P, I, D, in maniera da ottenere un sistema caratterizzato da:

- L'azione P corregge la posizione della valvola in funzione dello scostamento (azione proporzionale).
- L'azione I corregge la posizione della valvola ad una certa velocità che è funzione dello scostamento; tale azione elimina lo scostamento residuo permanente dopo un certo tempo, che dipende dalla costante di tempo di integrazione scelta.
- L'azione D corregge la posizione della valvola in funzione della velocità di variazione dello scostamento onde riportare, con la maggiore rapidità possibile, la grandezza regolata al suo valore di taratura dopo una perturbazione brusca.

Per chiarire quanto detto si faccia riferimento alla seguente figura:



La dosatura dell'azione derivativa è definita dalla costante di tempo di derivazione; quindi un regolatore PID può essere tarato in termini di:

- **Banda proporzionale**
- **Costante di tempo di integrazione**
- **Costante di tempo di derivazione**, quest'ultima va opportunamente scelta, in quanto se troppo stretta può comportare problemi di pendolazione.

### CAPITOLO TERZO

## REGOLAZIONE E CONTROLLO DI UN GENERATORE DI VAPORE

### 3.1 – INTRODUZIONE

In un generatore di vapore, i principali processi che avvengono a carico del fluido di lavoro (acqua) sono:

- 1) **Preriscaldamento dell'acqua di alimento**, in cui si ha un aumento di temperatura fino alle condizioni di liquido saturo. Tale processo é a carico dell'economizzatore.
- 2) **Evaporazione**, in cui si ha il passaggio di fase del fluido che raggiunge in tal modo, le condizioni di vapore saturo. Tale processo è a carico dell'evaporatore.
- 3) **Surriscaldamento**, in cui si ha un aumento di temperatura, che porta il fluido in condizioni di vapore surriscaldato. Tale processo è a carico del surriscaldatore.

Detti processi avvengono in successione nel circuito relativo al fluido liquido - vapore e, quindi, non sono tra di loro indipendenti, ma sono presenti delle interazioni tra di essi di cui bisogna tenere conto. Anche il circuito fumi, inoltre, presenta delle interazioni di complessità ben più elevata.

Una volta progettato e realizzato il generatore di vapore, quando esso diviene finalmente operativo si va incontro a tre tipi fondamentali di problemi:

- La realizzazione del generatore difficilmente risponde esattamente alle specifiche imposte. Cioè durante il funzionamento si ottengono dei valori di parametri sia inerenti il circuito acqua - vapore che quello aria - fumi che non corrispondono a quelli previsti in fase di progetto.
- Avendo progettato il generatore per funzionare in particolari condizioni operative in modo da ottenere determinate prestazioni, esso si trova ad operare in condizioni diverse rispetto alle quali esso è stato progettato (Condizioni di funzionamento OFF DESIGN).
- Il generatore di vapore può sempre subire durante il suo funzionamento dei disturbi di varia natura e di diversa origine che possono influenzare le condizioni di funzionamento del generatore stesso.

Le problematiche su esposte sono senza dubbio di non semplice soluzione soprattutto se si pensa alla notevole complessità del sistema e al gran numero di variabili messe in gioco legate a ciascuna fase del processo di produzione del vapore.

Per far fronte a tali problemi si ricorre ad un sistema di controllo per la regolazione dell'impianto.

### 3.2. – SISTEMA DI CONTROLLO PER LA REGOLAZIONE DI UN GENERATORE

Il compito del sistema di controllo per una corretta gestione del generatore risulta ovvio se si tiene presente il principio di funzionamento del processo di generazione, in cui la turbina rappresenta l'utenza e richiede l'erogazione di vapore in portata, temperatura e pressione ottimali per il suo corretto funzionamento.

Per generatori ad attraversamento il principio di controllo può essere esplicitato in modo abbastanza semplice: detta "*mt*" la portata massica richiesta dalla turbina e "*ml*" la portata di liquido immessa nel circuito dalla pompa di alimento, il sistema di controllo deve provvedere a variare o il numero di giri della pompa o l'apertura della valvola di regolazione a valle della pompa o entrambi in modo che la portata richiesta "*mt*" coincida con "*ml*". Inoltre, la potenza dei fuochi deve essere regolata in modo che il fluido in uscita al surriscaldatore abbia un'entalpia corrispondente alle condizioni di temperatura e pressione desiderate. La temperatura, poi, può essere fatta variare, indipendentemente dalla pressione, con un opportuno stadio di attemperamento per la sua diminuzione.

Nel caso invece dei generatori a circolazione, in cui esiste una separazione fisica tra fase di evaporazione e quella di surriscaldamento non si può pensare ad una regolazione del tipo vista. In tal caso sarà necessaria almeno una variabile manipolabile in più su cui poter agire. Si potrà, allora, o variare la ripartizione della potenza ceduta dai fumi tra i vari sottoprocessi a carico del fluido di lavoro o variare il rapporto tra le portate di fluido tra surriscaldatore ed evaporatore.

Il sistema di controllo deve inoltre provvedere a garantire il corretto funzionamento dell'impianto, nonostante variazioni di carico e presenza di disturbi, con la massima efficienza di funzionamento e garantendo un consumo di vita minimo del macchinario, con piena sicurezza di esercizio e disponibilità. Per il corretto funzionamento dell'impianto si prevede la definizione di un campo di variazione delle variabili regolate entro il quale il sistema è atteso funzionare correttamente in ogni condizione d'esercizio (fin dall'accensione del generatore).

#### 3.2.1. – VARIAZIONI DI CARICO

Le variazioni di carico possono essere dovute a diverse ragioni quali, ad esempio, le variazioni in base ai consumi o per cause d'emergenza.

Tali variazioni di carico possono essere piccole e talvolta repentine oppure possono essere abbastanza grandi e relativamente lente.

#### 3.2.2. – EFFICIENZA DI FUNZIONAMENTO

I principali elementi che concorrono a determinare il rendimento del ciclo termico relativo al processo di trasformazione tra energia chimica del combustibile ed energia meccanica sono essenzialmente due:

- Regolazione e controllo dei generatori di vapore -

- Temperatura del vapore in uscita al surriscaldatore o eventualmente al risurriscaldatore.
- pressione del vapore che viene immesso in turbina.

Un aumento di uno (o di entrambi) questi parametri comporta un aumento del rendimento del ciclo. Risulta peraltro ovvio che limiti di carattere fisico (resistenza dei materiali) permettono un aumento limitato sia di pressione che di temperatura.

L'efficienza del generatore è influenzata da parametri quali il rapporto tra quantità di aria comburente e di combustibile che deve essere certamente superiore a quello stechiometrico di combustione, ma non eccessivo altrimenti si otterrebbe nuovamente un basso rendimento. Se si operasse in difetto di aria, ossia addirittura con rapporti tra comburente e combustibile al di sotto di quelli stechiometrici, le perdite per incombusti aumenterebbero in modo spropositato, mentre forti eccessi di aria produrrebbero un aumento delle perdite per calore sensibile dei fumi.

Come al solito la condizione ottimale è un compromesso tra le due con un valore funzione del carico termico della caldaia.

Aspetti di manutenzione oltre che di controllo influenzano l'efficienza del processo di combustione. In particolare assumono notevole rilevanza nei confronti del rendimento, gli sporcamenti delle superfici di scambio termico degli scambiatori di calore che, quindi, devono essere pulite, di tanto in tanto, per assicurarne un corretto funzionamento. Va anche rilevato che il rendimento del generatore dipende anche dalla miscelazione tra combustibile e comburente ed in particolare, dalla qualità di atomizzazione del combustibile, dall'efficienza degli scambiatori di calore oltre che dal preriscaldamento dell'aria comburente. Questi aspetti, anche se di importanza considerevole nell'ambito dell'efficienza di un generatore di vapore, non saranno di seguito più ripresi in quanto si assumerà che si operi in condizioni di ottimizzazione nei loro riguardi.

### 3.2.3. – VITA DEL MACCHINARIO

Il generatore di vapore, essendo sottoposto a sollecitazioni sia in condizione di regime che di transitorio, è soggetto a "stress" che ne determina un consumo di vita. In particolare i materiali costituenti subiscono, generalmente due tipi di fenomeni:

- Il fenomeno dei creep o di scorrimento viscoso. Esso avviene in quanto i materiali, sottoposti a temperature elevate a sollecitazioni meccaniche dovute per lo più a pressioni, subiscono una deformazione progressiva e di carattere permanente che può portare fino alla rottura del pezzo di cui fa parte il materiale.
- Il fenomeno della fatica. Esso è dovuto al fatto che i materiali sono sottoposti a sollecitazioni variabili ciclicamente per cui essi presentano una resistenza a rottura inferiore a quella "statica".

A causa del primo dei due fenomeni la temperatura del vapore surriscaldato non può superare certi limiti altrimenti il fenomeno di creep, che dipende dal quadrato della temperatura, potrebbe portare alla deformazione o addirittura alla rottura dei materiali.

Ciò pone in primo piano il processo di controllo della temperatura (e del gradiente di temperatura) del vapore surriscaldato che non può superare certi limiti. Il secondo dei due fenomeni, invece, pone dei limiti severi per quanto riguarda la rapidità e l'ampiezza delle variazioni di pressione e, quindi, di carico.

### 3.2.4. – SICUREZZA DI ESERCIZIO DELL'IMPIANTO

La prevenzione contro danni al macchinario o eventuali rischi per l'incolumità fisica del personale addetto alla conduzione dello stesso, è demandata ad un sistema di protezioni che può essere visto come parte integrante del sistema di controllo, benchè esso svolga un compito del tutto particolare: mettere in "sicurezza" l'impianto di generazione del vapore sospendendo, temporaneamente, tutta o in parte l'attività di produzione. Risulta evidente che il sistema di controllo deve sospendere la produzione solo in casi particolarmente gravi ed in particolare:

- Il guasto di un singolo componente di misura, di attenuazione o di elaborazione deve produrre delle conseguenze solo locali e cioè l'indisponibilità di una misura non deve far perdere la regolazione di altre variabili. Nel caso vi sia la perdita di regolazione di qualche variabile manipolabile, il sistema di controllo deve garantire che questa sia posta automaticamente ad un valore che garantisce almeno la sicurezza dell'impianto.
- Il sistema deve garantire la commutazione di ogni singola variabile manipolabile da manuale ad automatica (e viceversa) in modo da potere sempre avere un certo margine di intervento in caso di guasto.

Vale la pena qui esporre, sinteticamente, i principali eventi che possono verificarsi in un generatore di vapore che potrebbero essere fonte di rischio per l'incolumità del personale addetto alla conduzione oltre a provocare danni all'impianto:

- La regolazione della pressione presente in camera di combustione è di fondamentale importanza per quanto riguarda la questione della sicurezza. In particolare essa non deve essere troppo elevata perché altrimenti ciò provocherebbe la fuoriuscita della fiamma, oltre che di materiale (solido e gassoso) prodotto dalla combustione, con ovvia pericolosità per le persone che si trovano in prossimità del punto in cui vi è stata l'espulsione dei prodotti di combustione. Detta pressione non può neanche essere al di sotto di un certo valore perché ciò provocherebbe l'immissione in camera di combustione di ventate di aria falsando il rapporto aria-combustibile o addirittura potrebbe causare l'implosione della camera di combustione.

- Regolazione e controllo dei generatori di vapore -

- La regolazione del rapporto aria - combustibile deve essere fatto in modo molto accurato perché deve essere evitato in modo più assoluto un eccesso di combustibile. Una miscela troppo ricca, infatti, potrebbe essere la causa di innesco di esplosioni oltre che di produzione di un notevole inquinamento atmosferico. Risulta, quindi, evidente la notevole importanza che assume la miscelazione aria - combustibile in un generatore di vapore. Essa influisce sia sul rendimento del generatore, sia sull'inquinamento atmosferico ed è anche importante per la sicurezza. Alla luce di ciò non risultano infondati gli sforzi atti ad un'accurata regolazione della combustione.
- La rottura del corpo cilindrico può portare ad un grave incidente nel generatore di vapore. Infatti tale recipiente è pieno di liquido saturo e, nel caso di rottura, esso espanderebbe secondo una isoentalpica (perché espandendosi non produce lavoro). Tale notevole espansione avverrebbe, ovviamente, all'interno della camera di combustione e eventualmente, nell'ambiente circostante e può essere fonte di grave pericolo. Ovviamente maggiori sono le dimensioni del corpo cilindrico, maggiore è la quantità di liquido saturo in esso contenuto e maggiore è il grado di pericolosità della caldaia.
- Un altro fenomeno, altrettanto pericoloso, che si può verificare nell'evaporatore e che deve essere assolutamente evitato è il fenomeno del film boiling. Tale fenomeno limita superiormente la quantità di calore che può essere ceduta ai tubi dell'evaporatore. Infatti, finché il flusso termico specifico non supera determinati valori, l'evaporazione avviene attraverso l'enucleazione di bolle di vapore che si distaccano dalle pareti dei tubi e vengono sostituite dall'acqua circostante, però quando il flusso supera un certo valore a contatto della parete si forma un film di vapore che riduce sensibilmente il coefficiente di scambio termico; si ha quindi un brusco aumento del salto termico tra parete e fluido che può essere tanto sensibile da compromettere la resistenza del tubo fino allo scoppio.
- Infine esiste un fenomeno abbastanza pericoloso dovuto all'immissione del vapore in turbina in fase di avvio dell'impianto. Si supponga ad esempio che l'impianto sia stato fermato in un primo momento e poi sia stato riavviato. Il generatore di vapore inizialmente genererà del vapore ad una temperatura che non è ancora quella di regime, ma comunque ne invierà alla turbina una certa portata. Ma se il vapore lascia il generatore nelle condizioni di vapore saturo secco o non sufficientemente surriscaldato, alla turbina giungerà una miscela bifasica poiché, inizialmente, la tubazione percorsa dal vapore è fredda e il vapore nel suo percorso condensa. Tale miscela bifasica non è possibile mandarla in turbina altrimenti se ne comprometterebbe il funzionamento; il problema si risolve bypassando la turbina di modo che la miscela iniziale arrivi direttamente al condensatore. Esiste però un problema ulteriore legato alla miscela bifasica iniziale. Il fatto di avere una miscela bifasica nella tubazione uscente dal generatore può comunque essere un fatto pericoloso perché si rischia che in una curva della tubazione proporzionata per sopportare la spinta dovuta al vapore arrivi un "grosso" liquido che fa saltare la tubazione. Per evitare ciò si dispongono, lungo il tratto di tubazione rettilineo che precede la curva, dei raccoglitori di condensa.

### 3.2.5. – DISTURBI

In un impianto sono sempre presenti disturbi persistenti ed in genere di piccola ampiezza quali ad esempio le pulsazioni della fiamma in camera di combustione o le fluttuazioni nell'erogazione del combustibile. Tali disturbi in genere non pregiudicano il corretto funzionamento dell'impianto e per essi non si prende, di solito, nessun provvedimento particolare in quanto inducono delle variazioni davvero minime alle variabili di processo. Esistono però anche dei disturbi di notevole entità che possono provocare una perdita temporanea da parte dell'impianto della sua capacità produttiva. Compito del sistema di controllo sarà allora quello di minimizzare l'influenza dei disturbi e, dopo opportuni interventi, di far riprendere al più presto l'attività produttiva del generatore. I disturbi di notevole gravità possono essere i seguenti: la rottura di una pompa di alimento, l'arresto di un ventilatore dell'aria, la rottura di un mulino di polverizzazione del carbone, il consumo delle lamelle dei preriscaldatori d'aria che ne comporta la loro sostituzione.

### 3.3. – CARATTERISTICHE DI GESTIONE

La scelta del valore ottimale di pressione del vapore surriscaldato in uscita dal generatore, in ogni condizione di funzionamento dell'impianto, è un problema di non facile soluzione. Ciò perché il rendimento termico dell'impianto il consumo di vita del macchinario e problemi legati all'affidabilità conducono spesso ad esigenze contrastanti in termini di scelta di pressione ottimale. Esistono, comunque, due strategie fondamentali di variazione della pressione al variare del carico: una a pressione costante al variare della portata di vapore immessa in turbina ed una a pressione variabile in proporzione sempre alla portata. Legate a questa due strategie di variazione della pressione sono due filosofie di gestione.

La prima prevede il mantenimento in una posizione fissa delle valvole di immissione in turbina (ad esempio completamente aperte) e l'adeguamento della produzione di vapore alle richieste (con temperatura costante) variando congiuntamente la portata del fluido di alimento e la potenza termica ceduta dai fumi al fluido freddo (ed eventualmente la sua ripartizione tra evaporatore e surriscaldatore). In accordo con questa filosofia la pressione del vapore surriscaldato si manterrà proporzionale alla portata. Una filosofia di questo tipo, seppur possibile in linea di principio, presenta, tuttavia, delle difficoltà, dato che il generatore di vapore è sede di accumuli di massa e di energia e, ad ogni variazione di pressione, corrisponde una variazione di energia accumulata nel generatore. Risulta pertanto evidente che, con questa filosofia, si avrebbe una risposta molto lenta del generatore al variare del carico, dato che l'accumulo di energia è legata all'inerzia propria del generatore. Tale filosofia di gestione risulta quindi impraticabile per generatori con grande corpo cilindrico a cui è in genere associata una grande costante di tempo.

Per generatori che presentano accumuli rilevanti, aventi cioè grossa inerzia, o che debbano rispondere prontamente a repentine variazioni di carico si utilizza una filosofia di gestione differente detta ad accumuli costanti. Secondo tale filosofia le variazioni di carico richieste sono soddisfatte ad accumuli di massa e di energia costanti senza coinvolgere l'inerzia propria del

- Regolazione e controllo dei generatori di vapore -

generatore. Gli accumuli più rilevanti in un generatore sono gli accumuli di massa ed energia nell'evaporatore e nel surriscaldatore. E' necessario precisare, inoltre, che:

- ❑ L'accumulo di energia nell'evaporatore è determinato, principalmente, dal valore della pressione del fluido in passaggio di fase.
- ❑ L'accumulo di massa nell'evaporatore, una volta fissata la pressione, è determinato dal volume di liquido presente rispetto a quello totale (grado di vuoto dell'evaporatore).
- ❑ L'accumulo di energia nel surriscaldatore è determinato, principalmente, dalla temperatura del vapore surriscaldato.
- ❑ L'accumulo di massa nel surriscaldatore, una volta fissata la temperatura, è determinato dal valore della pressione del vapore.

Si noti che le pressioni nell'evaporatore e nel surriscaldatore non possono essere imposte indipendentemente l'una dall'altra, in quanto esse sono tali che la loro differenza deve dare proprio le perdite di carico nel surriscaldatore. Trascurando tali perdite di carico, si può immaginare una realizzazione della gestione ad accumuli costanti come segue:

regolando opportunamente la potenza ceduta dai fumi, si può mantenere costante la pressione nell'evaporatore e, agendo sulla portata del liquido di alimento, si può mantenere costante il grado di vuoto dell'evaporatore. In questo modo l'accumulo di massa e di energia nell'evaporatore resta costante. Agendo, poi, sulla temperatura del vapore surriscaldato, tramite un dispositivo di atterramento del vapore, si possono mantenere gli accumuli costanti anche nel surriscaldatore. Le richieste di portata di vapore della turbina, poi, possono essere soddisfatte agendo opportunamente sulle valvole di efflusso che immettono in turbina.

E' opportuno osservare che esistono delle interazioni tra variabili regolate determinate sia dal fatto che la variazione di una variabile di controllo (come può essere, ad esempio, la quantità di calore ceduto dai fumi) influisce sullo stato di diversi sottosistemi nel generatore, sia dal fatto che il processo di generazione del vapore può essere visto come una cascata di sottoprocessi, con le ovvie interazioni tra gli stessi.

Nelle considerazioni fin qui svolte, si è taciuto riguardo la gestione del sistema di combustione, assumendo di poter variare a piacere la potenza termica ceduta dai fumi. In effetti anche il controllo della combustione assume notevole importanza nella gestione dell'impianto, però si può assumere che esso sia un sistema asservito alle regolazioni principali di caldaia riguardanti il circuito acqua vapore. Ciò nondimeno, per variare la potenza termica ceduta, occorre un complesso sistema di controllo dell'aria comburente e combustibile oltre che di controllo della pressione in camera di combustione che manualmente è tenuta leggermente al di sotto della pressione atmosferica per evitare la fuoriuscita dei prodotti di combustione. Tale sistema di controllo può tuttavia, essere progettato in maniera del tutto indipendente dalle regolazioni principali.

### 3.4. – SPECIFICHE DI REGOLAZIONE

I tipi di interventi più importanti che si possono compiere su un generatore di vapore di media potenza a circolazione naturale onde poter ottenere una conduzione efficiente dello stesso si possono schematizzare come di seguito:

- ❑ Proporzionamento del combustibile e della corrispondente aria comburente in modo da avere una combustione completa e un rendimento più elevato possibile.
- ❑ Proporzionamento della quantità di calore ceduta alla camera di combustione sotto forma di combustibile alla quantità di calore portata via dal fluido in modo che vi sia equilibrio termico.
- ❑ Mantenimento ad un valore costante della temperatura del vapore surriscaldato nonché quella del vapore risurriscaldato.
- ❑ Mantenimento ad un valore costante della pressione del vapore in uscita dal generatore.
- ❑ Proporzionamento della portata dell'acqua di alimento rispetto al vapore in uscita.
- ❑ Mantenimento ad un valore costante della pressione nella camera di combustione che nei generatori del tipo a tiraggio equilibrato deve essere uguale o di poco inferiore a quella esterna.
- ❑ A seconda che nel processo si includa o meno la turbina, tra le variabili da regolare va inclusa o meno la regolazione della potenza meccanica generata all'asse della turbina.

#### 3.4.1. – REGOLAZIONE DELLA POTENZA GENERATA

La strategia di controllo, che provvede alla regolazione della potenza generata dalla turbina e che considera come prioritaria l'esigenza dell'utenza prende il nome di Caldaia-Segue. Essa é una modalità di controllo concepita per rispondere con la massima prontezza alle richieste di variazione della potenza generata demandando alla caldaia il compito di adeguarsi alle mutate condizioni di carico.

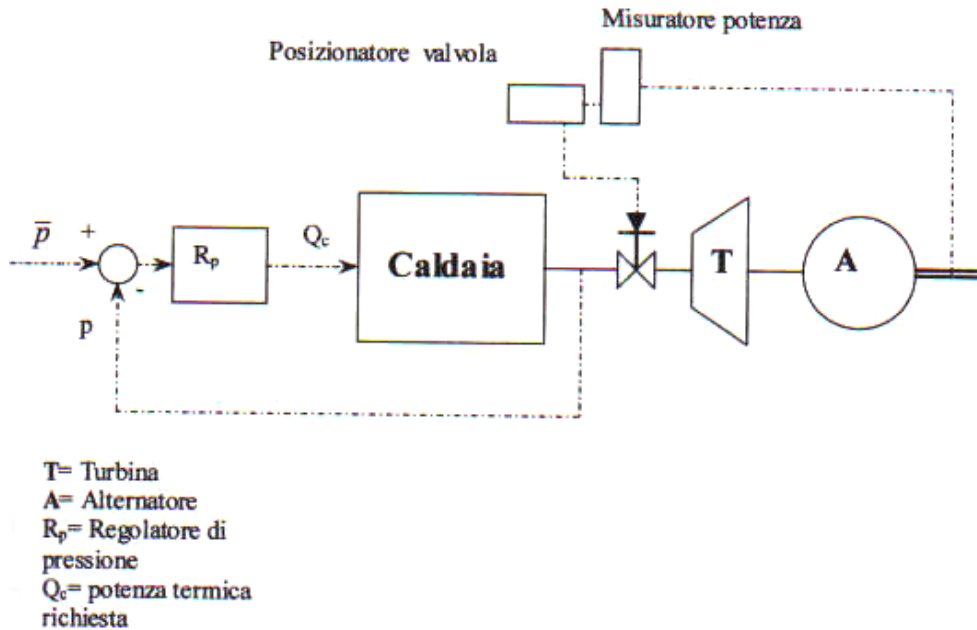


Fig.3.4.1. – Schema di regolazione “CALDAIA – SEGUE”

Il concetto base della strategia consiste nel variare direttamente la posizione della valvola di immissione di vapore in turbina per ottenere la potenza richiesta (vedere fig. 3.4.1.) dall'utenza. La mutata richiesta di vapore in turbina provocherà una variazione di pressione in caldaia, che potrà essere ripristinata agendo sulla potenza dei fuochi tramite un regolatore di pressione.

La strategia *Caldaia- Segue* si adatta bene a generatori di vapore avente una grossa capacità di accumulo del vapore: essa viene adottata con caldaie a circolazione con grosso corpo cilindrico. Se al limite la capacità dell'evaporatore fosse infinita, in uscita non si avrebbero variazioni di pressione, nonostante l'apertura delle valvole di immissione in caldaia e, quindi, non sarebbe richiesta una maggiore potenza termica per reintegrare la variazione di pressione. In tal caso la potenza richiesta dalla turbina sarà completamente prelevata dall'accumulo di energia dell'evaporatore. Se, invece, come in realtà accade, la capacità dell'evaporatore non è infinita ma sufficientemente grande, quando verrà richiesta una maggiore potenza, si produrrà una variazione di pressione che dovrà essere reintegrata da una variazione di potenza termica con tempi di recupero legati alle costanti di tempo relative al circuito fumi. Se si desidera una pressione che non vari molto alle mutate condizioni di carico é necessario che la prontezza di intervento del sistema asservito combustibile – aria sia proporzionata alla rapidità di variazione del carico e all'accumulo di vapore nell'evaporatore.

Ricapitolando si può affermare che la strategia di controllo Caldaia-Segue privilegia le esigenze dell'utenza lasciando alla dinamica del generatore il compito di ripristinare le condizioni iniziali di pressione. Essa quindi ben si sposa con generatori di vapore aventi elevato rapporto capacità di accumulo energetico nell'evaporatore e tempo di ritardo associato al sistema asservito di combustione.

Accanto alla strategia Caldaia - Segue che privilegia le richieste dell'utenza, contando sulla capacità del generatore di ripristinare l'accumulo di energia nell'evaporatore, esiste anche una strategia di controllo detta "*Turbina - Segue*" che privilegia invece la dinamica del generatore in modo da mantenere un accumulo costante in caldaia e fare in modo che l'utenza si adegui di tempi di risposta del generatore.

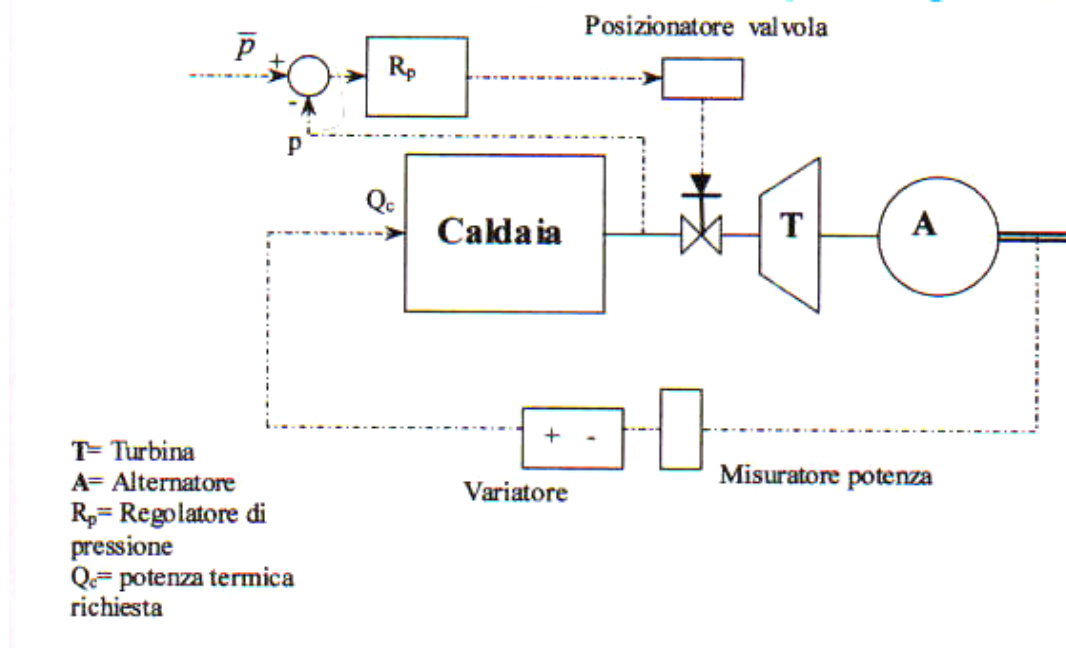


Fig.4.3.2.- Schema di regolazione "Turbina - Segue".

La strategia *Turbina-Segue* si basa sul principio secondo il quale, al variare della potenza richiesta dall'utenza, non si varia, come nella strategia precedente, la posizione della valvola di immissione in turbina ma si varia la richiesta di potenza in caldaia che risponde, ovviamente, con un certo ritardo dovuto alla dinamica del circuito aria - fumi. La variazione di potenza termica ceduta dai fumi provocherà poi un aumento di pressione oltre che di portata del vapore surriscaldato immesso in turbina. Il regolatore di pressione "sente" questa variazione di pressione e, quindi, produce una variazione di posizione della valvola per mantenere la pressione costante.

La regolazione di pressione, attuata tramite servoposizionatori delle valvole, avviene in genere molto più rapidamente (nell'ordine di qualche decimo di secondo) rispetto alla variazione della potenza termica ceduta dai fumi, poiché, a prescindere dalla dinamica propria della combustione, che già di per sé è lenta, variazioni troppo brusche di alimentazione ai bruciatori, darebbero luogo a miscele aria-combustibile non ideali. Ciò provocherebbe la produzione di incombusti, con ovvie conseguenze negative sul rendimento termico del generatore oltre che sul grado di inquinamento dei fumi in uscita dal generatore.

La strategia Turbina - Segue, che privilegia la dinamica del generatore, si adotta nei casi in cui le richieste dell'utenza non sono troppo stringenti in termini di dinamica, in quanto la variazione della potenza richiesta dalla turbina deve "attendere" i tempi di ritardo legati alla dinamica del circuito

aria-fumi. Difatti mentre nel caso della precedente strategia tale circuito doveva far fronte a bruschi transitori, dovuti al fatto che il generatore doveva "inseguire" le variazioni di carico, in questo caso ciò non avviene e, quindi, la capacità di accumulo dell'evaporatore può anche non essere molto grande rispetto al ritardo del combustibile.

In alternativa alle due strategie discusse, esiste anche un'altra strategia di controllo della potenza che privilegia stavolta la dinamica della turbina, ossia fa gravare il meno possibile l'onere del servizio per la turbina. Il servizio meno oneroso per la turbina è quando le valvole di immissione sono completamente aperte, ovvero non sono presenti affatto. Quando si ha una variazione di richiesta di potenza (all'asse della turbina) si potrà agire semplicemente sulla potenza termica ceduta dai fumi. In questo modo si avrà un funzionamento a pressione variabile proporzionalmente al carico e tale strategia è detta "*a pressione variabile pura*". Dal punto di vista del controllo lo schema è del tutto analogo a quello visto per la strategia Turbina-Segue, ma senza l'anello di regolazione della pressione.

La filosofia di controllo a pressione variabile pura si basa su un "egoismo" di turbina e far gravare pesantemente l'onere del servizio sia sul generatore che sull'utenza. Quest'ultima può, difatti, fare assegnamento solo su lente variazioni di potenza dovute alla lentezza del circuito aria fumi. Mentre il generatore si troverà a lavorare a pressione variabile, con ovvie conseguenze negative per quanto riguarda le sollecitazioni subite dai materiali ed il consumo di vita degli stessi.

Nelle strategie fondamentali di regolazione della potenza discusse si può notare che non esiste un vero e proprio anello di regolazione della potenza generata. Infatti, nel caso di strategia del tipo Caldaia-Segue, si fa variare la posizione delle valvole di immissione in turbina al variare della potenza richiesta, mentre nelle altre due strategie di controllo si fa variare la portata di combustibile - comburente al variare della potenza richiesta. Si potrebbe pensare allora di disporre di un anello di regolazione anche per la potenza generata. Ma questa soluzione è spesso di difficile attuazione, poiché potrebbe condurre il sistema all'instabilità.

Nel caso di strategia Caldaia-Segue, se si sostituisse al comando di apertura della valvola un regolatore, il sistema, nel caso di mancata risposta del sistema di produzione della potenza termica, continuerebbe a variare l'apertura delle valvole per generare la potenza richiesta. Detta potenza, ovviamente, non può essere data dalla semplice apertura delle valvole. In mancanza di risposta del circuito aria-fumi, si perviene, in tal modo, all'instabilità.

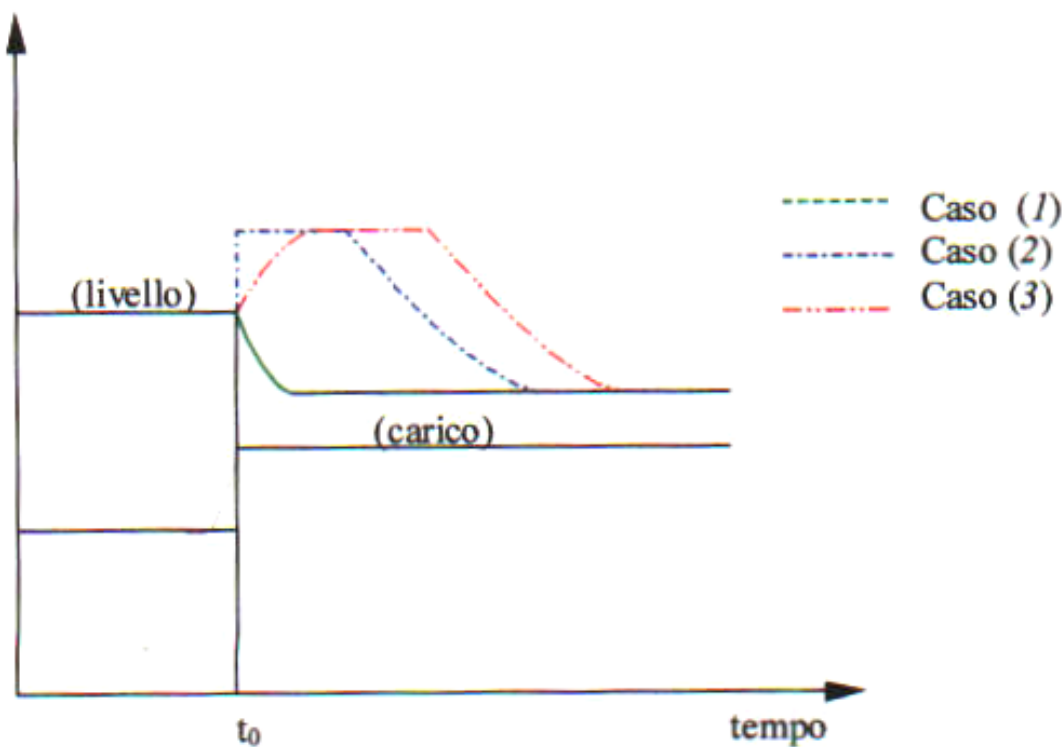
Nel caso di strategia Turbina-Segue, il disporre un P.I.D. in ingresso al sistema asservito di caldaia potrebbe portare all'instabilità quando è richiesta una variazione di potenza elevata. Per rimuovere le possibili condizioni di instabilità suddette si è introdotto un differente tipo di controllo che permette un coordinamento tra le azioni di caldaia e turbina. Tale tipo di strategia viene detta "*Controllo coordinato caldaia turbina*" e tiene conto sia delle esigenze dell'utenza, viste come richieste di potenza, sia delle esigenze di caldaia, viste, invece, come controllo di pressione.

Un'ultima considerazione va fatta per quanto riguarda l'applicabilità delle diverse strategie di controllo della potenza con i diversi tipi di combustibili utilizzati dal generatore. Nel caso di

alimentazione a polverino di carbone, il sistema asservito di caldaia è piuttosto lento nel seguire le variazioni di potenza termica richiesta; per tale motivo, in questo caso, è preferita la strategia di controllo "Turbina-Segue" che fa gravare il meno possibile l'onere di variazione della potenza sul circuito di alimentazione del combustibile. Nel caso il combustibile utilizzato è l'olio combustibile o il metano si ottiene una maggiore affidabilità e rapidità di risposta: si preferisce allora una strategia di controllo del tipo Caldaia-Segue.

### 3.4.2. –REGOLAZIONE DI PORTATA DELL'ACQUA DI ALIMENTO

La regolazione di portata del vapore può essere fatta per via indiretta e cioè non si misura direttamente la portata di vapore, ma si misura il livello di acqua saturo raggiunto nel corpo cilindrico. Ciò perché se la turbina richiede più vapore di quanta acqua si immette con la pompa di alimento, allora il livello scende e viceversa (vedere fig. seguente, caso 1).



Ma regolare il livello d'acqua contenuta nel corpo cilindrico, al contrario delle apparenze, si presenta come un problema di non semplice soluzione, in particolar modo per le caldaie a piccolo volume di acqua.

Difatti nel caso vi sia un improvviso aumento di carico, ovvero ci sia una richiesta repentina di una maggiore quantità di vapore, si crea all'interno del corpo cilindrico un improvviso abbassamento di pressione. Ciò comporta che il liquido saturo in esso contenuto si trovi in forte sovrassaturazione e

di conseguenza si ha una tumultuosa ebollizione che porta ad un aumento del livello di liquido per il maggior volume delle bolle (caso 2 della figura precedente). Nel caso allora sia predisposto sul corpo cilindrico un semplice misuratore di livello, esso "sentirà" quest'apparente crescita e, quindi, provocherà una diminuzione della portata agendo sulla pompa di alimento, quando, invece, occorrerebbe un aumento della stessa per sopperire alle mutate condizioni di carico. Di conseguenza si avrebbe un indesiderato e, per di più, pericoloso svuotamento del corpo cilindrico. Inoltre si deve tener presente anche il problema dei "tempo di salita" delle bolle, che rende ancora più difficile il controllo. Difatti, considerando che le bolle impiegano un tempo finito per fermarsi e per salire in superficie dai collettori inferiori per tutta l'altezza dei tubi evaporatori, bisogna attendere un tempo ancora più lungo, prima che possa diminuire il livello del corpo cilindrico (caso 3 della figura). Ciò comporta un intervento del regolatore, nel diminuire la portata dell'acqua d'alimento, ancora più in ritardo del caso di formazione e risalita istantanea delle bolle, il che potrebbe portare all'instabilità il sistema.

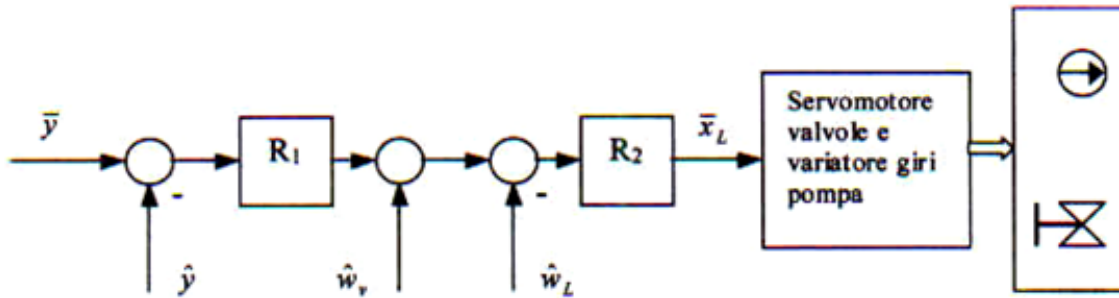
Per le suddette ragioni occorre agire sulla valvola o sulla pompa di alimento in base non solo al livello del corpo cilindrico, ma anche alla portata di vapore (**Regolazione a due elementi**). In genere si preferisce agire in modo da regolare la portata d'acqua d'alimento in base alle variazioni della portata di vapore e, in seguito, correggere in base al livello raggiunto dal corpo cilindrico. In tal modo, quando esso è finalmente arrivato al valore di set point, si può portare ad un valore costante la portata dell'acqua di alimento.

Per rendere ancora più robusto il sistema di regolazione s'introduce talvolta anche un misuratore di portata dell'acqua (**Regolazione a tre elementi**). Ciò è dovuto al fatto che spesso sul circuito di alimentazione possono nascere dei disturbi che provocano, ad esempio, una variazione della pressione dell'acqua. Nel caso ci siano variazioni del carico, quindi, il regolatore provvede a regolare il rapporto tra la portata di acqua e quella di vapore e, poi, quando la portata dell'acqua diviene uguale alla nuova portata del vapore, esso continua ad agire sulla valvola di alimentazione fino a quando il livello del corpo cilindrico non abbia di nuovo assunto il valore di SET POINT.

In definitiva si possono evidenziare due tipi fondamentali di disturbi che agiscono sul livello del corpo cilindrico:

- a) Un disturbo di tipo integrale costituito dalla variazione della portata di vapore prelevata dalla turbina.
- b) Un disturbo di tipo istantaneo e/o transitorio, dovuto essenzialmente alle variazioni di potenza termica ceduta all'evaporatore e di pressione nel corpo cilindrico che provocano fenomeni di rigonfiamento dovuti alle variazioni di densità del fluido sotto il pelo libero, ma anche alle variazioni del titolo del fluido nei tubi evaporanti.

Il primo tipo di disturbo è abbastanza semplice da compensare in quanto, è legato all'integrale del livello del corpo cilindrico così come la variabile manipolabile (ossia la portata di acqua immessa nel corpo cilindrico); mentre il secondo tipo di disturbo è ad azione istantanea e, quindi, più difficile da compensare agendo su una variabile che "agisce" in modo integrale sul livello del corpo cilindrico. Il classico sistema di regolazione a tre elementi è illustrato nella seguente figura.



$R_1, R_2 =$  Regolatori.

$\bar{y}, \hat{y} =$  Set point e misura del livello del corpo cilindrico.

$\hat{w}_v =$  Misura portata vapore in uscita.

$\hat{w}_L =$  Misura portata liquido immesso nel corpo cilindrico

$\bar{x}_L =$  Segnale di richiesta liquido di alimento.

Fig.3.4.3 – Schema di regolazione a tre elementi dell'acqua di alimento.

Il sistema di regolazione a tre elementi necessita di una misura di livello, di una misura di portata di vapore ed infine di una misura di liquido immesso: la prima è utilizzata come variabile regolata, la seconda come variabile di compensazione del disturbo ed infine la terza come variabile regolata relativa all'anello interno.

Per quanto riguarda il regolatore  $R_1$ , esso può anche essere un semplice regolatore proporzionale in quanto i disturbi di tipo b) sono, una volta passato il transitorio, costanti e, quindi, determinano un errore nullo a regime, facendo risultare inutile il polo nell'origine dovuto all'azione integrale. Permangono, tuttavia, gli errori a regime delle misure delle portate che, se si vuole che siano compensati, occorrerà disporre di un regolatore P.I.

Lo schema a tre elementi risulta efficace solo quando la misura di vapore è sufficientemente attendibile. Per bassi carichi ciò non avviene, per cui è necessario commutare da uno schema a tre elementi ad uno come quello riportato in figura.

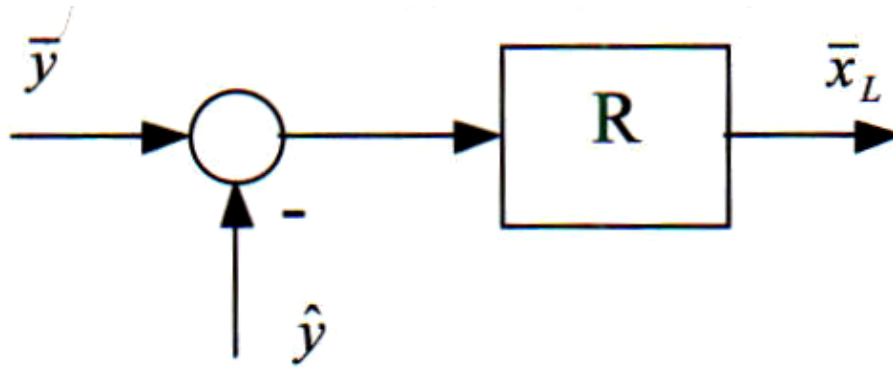


Fig.3.4.4 – Schema di regolazione ad un elemento.

Il regolatore R dovrà essere un proporzionale integrale, in quanto esso deve far fronte al disturbo relativo alla variazione di portata del vapore che non risulta essere più compensato.

Risulta ovvio che un sistema come quello della regolazione ad un solo elemento risulta abbastanza scadente in termini di prestazioni, in particolar modo nei riguardi di rapide variazioni di carico, se raffrontato al sistema di regolazione a tre elementi visto in precedenza. In questo caso si dovrà necessariamente prevedere una gestione con lente variazioni di carico.

Vale la pena accennare al comportamento del sistema di controllo a fronte di uno dei disturbi più severi che può capitare in un generatore di vapore ossia il rifiuto del carico, che determina una chiusura repentina delle valvole di immissione in turbina. Per ovviare a questo inconveniente, è utile disporre di un by-pass della turbina che consente al vapore di fluire direttamente al condensatore.

Tuttavia, il by-pass è in grado di far fluire una quantità di vapore che è solo una certa percentuale del carico nominale di funzionamento.

La riduzione di portata del vapore nominale, al valore scaricabile dal by-pass, comporta una riduzione quasi istantanea del livello del corpo cilindrico, a fronte di una diminuzione del volume specifico del fluido contenuto in esso.

Ovviamente quanto più il carico è elevato, tanto maggiore sarà la discesa del livello. Per tale motivo, per carichi elevati, si opera con margini richiesti per la discesa di livello più elevati.

### 3.4.3. – REGOLAZIONE DI PRESSIONE E TEMPERATURA

La regolazione della pressione di uscita del vapore, si attua agendo opportunamente sulla quantità di combustibile - comburente che è immessa in camera di combustione.

E' opportuno precisare in che modo avviene la variazione della potenza ceduta dai fumi agendo sulla portata di combustibile - comburente. In particolare la variazione della quantità di combustibile bruciato può essere ottenuta in due modi diversi:

- a) Agendo sulla portata d'aria in modo da determinare una variazione della portata di combustibile mediante un regolatore di rapporto (**Regolazione in serie**).

2. Agendo contemporaneamente sulla portata di combustibile e di comburente (***Regolazione in parallelo***).

Nella regolazione in serie un aumento di richiesta da parte del carico determinerà un eccesso d'aria, in quanto tale metodo prevede che si vada ad agire prima sul circuito dei comburenti e poi su quello del combustibile; una riduzione di richiesta del carico, invece, provocherà un dannoso eccesso di combustibile.

Nell'utilizzazione del secondo metodo bisogna tener presente che il circuito d'immissione dell'aria presenta un'inerzia maggiore rispetto a quello del combustibile. Ciò comporta un eccesso di combustibile nel caso vi sia un aumento di richiesta del carico ed un eccesso di aria nel caso di diminuzione dello stesso.

Occorrerebbe, dunque, una combinazione dei due schemi di regolazione, di modo che, il regolatore, nel caso di aumentato fabbisogno di carico, vada ad agire prima sul circuito dell'aria e, poi, in base all'aumento di portata di aria, su quello del combustibile; mentre, nel caso di una diminuzione di richiesta dei carichi, il comando di riduzione del combustibile e dei comburenti può essere impartito contemporaneamente. Il perché si effettui un controllo di questo tipo risiede nel fatto che deve essere evitato, in modo categorico, un eccesso di combustibile per le ovvie conseguenze negative, già accennate in precedenza, sull'impatto ambientale, sulla sicurezza e sul decadimento dell'efficienza dei generatori.

La regolazione della temperatura del vapore d'uscita è strettamente legata a quella della pressione, ciò accade poiché se, ad esempio, vi è un aumento di richiesta da parte del carico, il regolatore di pressione agisce in modo da avere una maggiore immissione di combustibile, provocando, però, in tal modo, un concomitante aumento di temperatura. Allora se si verificasse una situazione in cui, ad esempio, vi è un aumento di richiesta del carico e una contemporanea diminuzione di temperatura si andrebbe incontro a due esigenze contrastanti. Per ovviare a tale inconveniente è necessario disporre di un dispositivo che permetta la variazione di temperatura, ma che non influisca pure sulla pressione. Si utilizza solitamente un attemperamento del vapore ad acqua nebulizzata.

Si può presentare il caso in cui si abbia necessità di aumentare la temperatura che può essere scesa al di sotto del valore di SET POINT, a causa, ad esempio, di una diminuita richiesta di carico, che ha portato ad un'eccessiva diminuzione della quantità di combustibile - comburente immessa. Si fa lavorare il generatore ad una temperatura che è sempre al di sopra del valore impostato. Per poi agire con l'acqua di raffreddamento per raggiungere il valore prefissato. In tal modo, se è necessario un aumento di temperatura, si diminuisce la quantità di acqua nebulizzata per raffreddare e viceversa. Il sistema di controllo agisce per modulazione della portata di acqua desurriscaldante.

Progettare, comunque, un sistema di controllo del desurriscaldamento del vapore è un compito tutt'altro che semplice. Infatti il processo di surriscaldamento del vapore si presenta come un sistema a parametri distribuiti: ossia esso è modellabile solo mediante equazioni alle derivate parziali ed inoltre sono presenti delle non linearità abbastanza marcate. La linearizzazione permette:

di ricavare modelli linearizzati di detto processo dipendenti dal punto di funzionamento. Detto modello avrà parametri che dipendono dal punto di funzionamento e variano al variare di questo.

Occorre, a questo punto, definire i criteri su cui si basa il progetto dello stadio di attemperamento.

- Per non comprometterne il buon funzionamento, la turbina non può ricevere goccioline di liquido mescolate con il vapore. Ciò comporta che, per permettere l'evaporazione del liquido desurriscaldante, lo stadio di attemperamento prima della turbina deve essere sempre seguito da un ulteriore stadio di surriscaldamento.
- Per evitare che vi sia un ritardo eccessivo tra l'istante in cui si inizia a desurriscaldare il vapore, agendo sulla posizione della valvola di immissione del liquido nebulizzato, e l'istante in cui varia la temperatura del vapore immesso in turbina (variabile regolata) si cerca di porre l'attemperamento quanto più vicino possibile alla turbina.
- Per non avere temperature del vapore troppo alte prima dell'iniezione dell'acqua di attemperamento (dannose per i materiali) in genere si progetta l'attemperatore in più stadi in modo che il salto teorico relativo ad ogni stadio sia più basso.
- Per ottenere un'iniezione di acqua nebulizzata nel vapore surriscaldato deve esistere un salto di pressione tra l'ingresso della valvola di attemperamento ed il vapore surriscaldato a valle. Anzi sarebbe utile avere una portata di acqua di attemperamento proporzionale alla portata di vapore da desurriscaldare perché all'aumentare della portata di vapore vi è un aumento "naturale" di temperatura dovuto all'aumento dei coefficienti di scambio termico lungo le pareti degli scambiatori del generatore. Lo schema adatto allo scopo è rappresentato in fig.

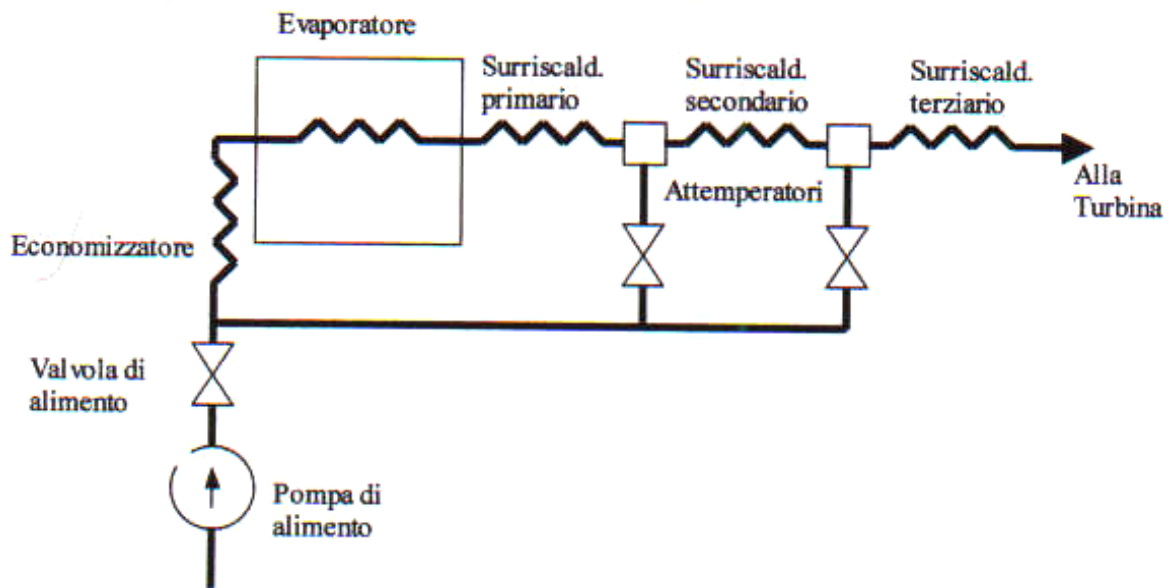
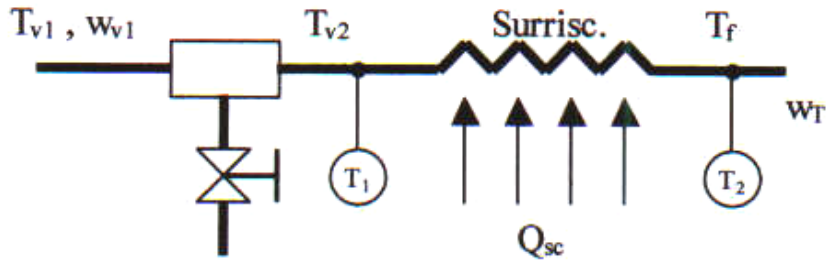


Fig.3.4.5.- Schema di attemperamento in più stadi.

- Regolazione e controllo dei generatori di vapore -

In tale schema si può notare che il salto di pressione ai capi della valvola di ottemperamento è pari alla caduta di pressione lungo il generatore. In tal modo sia la portata di ottemperamento che quella di vapore risultano proporzionali alla radice quadrata della suddetta caduta e perciò proporzionali tra di loro.

Si esamini il caso di un unico stadio di ottemperamento rappresentato nella seguente figura.

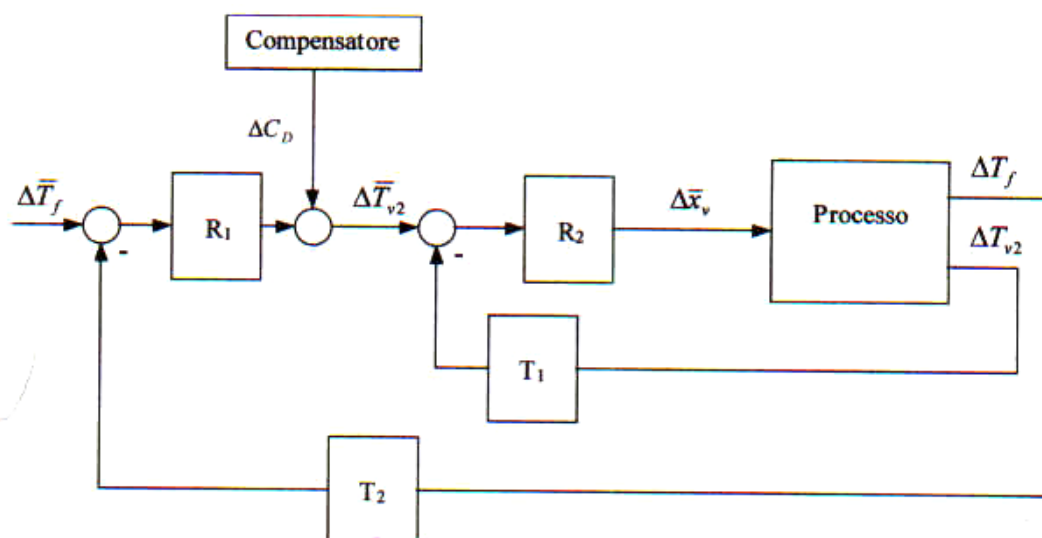


$T_{v1}, w_{v1}$  = Temperatura e portata vapore in ingresso.  
 $T_{v2}$  = temperatura in uscita attemperatore.  
 $T_f$  = Temperatura finale vapore.

$T_1, T_2$  = Sensori di temperatura.  
 $w_T$  = Portata vapore in ingresso alla turbina.  
 $Q_{sc}$  = Potenza termica ceduta al surriscaldatore.

Fig.3.4.6.- Schema di ottemperamento a singolo stadio.

Come si può notare in tale schema si sono utilizzati due sensori di temperatura: uno misura la temperatura immediatamente a valle dello stadio di attemperamento e l'altro misura la temperatura finale del vapore dopo il surriscaldamento (che è in effetti la variabile controllata). Ciò permette la realizzazione di una struttura di controllo in cascata come quella rappresentata nella figura in basso, in cui sono presenti due regolatori che consentono un controllo più efficace sull'apertura della valvola di attemperamento (che è la variabile manipolabile).



$T_1, T_2$  = trasduttori di temperatura.  
 $R_1, R_2$  = Regolatori.  
 $\Delta T_f, \Delta \bar{T}_f$  = Temperatura finale e set point di temperatura finale.  
 $\Delta T_{v2}, \Delta \bar{T}_{v2}$  = Temperatura in ingresso all'attemperatore e relativo set point.

$\Delta C_D$  = Segnale di compensazione disturbi.  
 $\Delta \bar{x}_v$  = Set point di posizione valvola di attemperamento.

Fig.3.4.7.- Schema di controllo in cascata della temperatura alle variazioni.

E' opportuno precisare che il regolatore  $R_2$  presente nella struttura di controllo a cascata può svolgere un'azione proporzionale integrale o una semplice azione proporzionale in quanto non interessano le prestazioni statiche che vengono stabilite da  $R_1$ .

In figura è anche rappresentato un eventuale compensatore di disturbi inserito per aumentare ulteriormente le prestazioni del sistema di controllo. Si noti che il segnale  $\Delta C_D$  esprime le variazioni di temperatura in ingresso al surriscaldatore che compensano le variazioni opposte che i disturbi inducono sulla temperatura finale del vapore. Detti disturbi possono essere sia dovuti ad un'eventuale variazione della potenza termica ceduta dai fumi (provocata, ad esempio, da una variazione di variabili di controllo di altre regolazioni che fa variare sia la portata di vapore sia la temperatura del vapore surriscaldato, sia dovuti ai dispositivi di redistribuzione della potenza ceduta dai fumi alle superfici scambianti all'interno del generatore.

Un' ultima osservazione va fatta circa i limiti imposti dall'impianto nella regolazione del vapore surriscaldato; essi possono essere di due tipi:

1. La temperatura nominale non può essere raggiunta al di sotto di un certo valore di carico detto carico di controllo: ciò per mantenere il dimensionamento dell'impianto di desurriscaldamento entro limiti accettabili.

2. Valori di temperatura e soprattutto quelli dei gradienti temperatura non possono superare certi limiti per evitare sollecitazioni eccessive sui materiali metallici.

#### 3.4.4. – REGOLAZIONE DELLA PRESSIONE IN CAMERA DI COMBUSTIONE

La regolazione della pressione in camera di combustione costituisce una delle funzioni fondamentali del sistema di controllo della combustione. Per comprendere in pieno il principio su cui si basa detta regolazione, è opportuno chiarire il modo in cui viene gestito il movimento dell'aria e dei gas combusti all'interno del generatore, detto anche *tiraggio*.

Il tiraggio può essere *naturale*, se prodotto spontaneamente dalla differenza di densità tra l'aria relativamente fredda e i gas di combustione a temperatura più elevata, o *artificiale* (o meccanico o forzato) quando il moto dell'aria è determinato da ventilatori opportunamente disposti. Il tiraggio naturale presenta dei limiti dovuti soprattutto al fatto che, con l'adozione di tale metodo, non è possibile raggiungere valori di rendimento elevati, poiché, per favorire il moto dei fumi, sarebbe necessario un elevato valore di temperatura, per diminuirne la densità, che porterebbe ad un aumento delle perdite per calore sensibile dei fumi. Soprattutto nei grandi impianti, allora si ricorre al tiraggio meccanico che consente, tra l'altro, una maggiore attività di combustione ed una diminuzione della temperatura dei fumi all'uscita per lo meno fino all'insorgere di altri fenomeni nocivi per l'impianto.

Il tiraggio meccanico può essere di tre tipi:

1. ***Tiraggio forzato*** in cui si prevede l'utilizzo del ventilatore posto a monte della camera di combustione che "spinge" l'aria nell'interno con una determinata pressione. Lo svantaggio di tale metodo è che in camera di combustione si ha una pressione più elevata di quella atmosferica esterna che può essere la causa di sfuggite di aria o, quel che è peggio, la fuoriuscita delle fiamme e/o dei prodotti di combustione, nel caso di apertura di qualche portello, che potrebbero procurare gravi conseguenze per il personale addetto.
2. ***Tiraggio indotto*** in cui il ventilatore è posto a valle della camera di combustione ed in particolare proprio a monte del camino. La camera di combustione risulta, così, essere in depressione rispetto all'esterno e si eliminano i pericoli dovuti alla fuoriuscita di fiamma. Gli svantaggi legati a tale metodo sono dei possibili rientri nel focolare di aria fredda che potrebbero abbassare il rendimento, il fatto che la potenza assorbita dai ventilatori è maggiore di quella del tiraggio forzato per il maggior volume specifico dei gas ed infine il maggior deterioramento subito dai ventilatori che sono attraversati da gas caldi (invece che da aria).
3. ***Tiraggio bilanciato o equilibrato*** in cui si dispongono due ventilatori uno a monte della camera di combustione e l'altro a valle della stessa. Con questo sistema, che è il più

diffuso, si cerca di mantenere la pressione in camera di combustione pari o di poco al di sotto di quella atmosferica.

Il terzo sistema di tiraggio permette un controllo indipendente dalla regolazione di potenza termica richiesta al sistema asservito combustibile. Infatti, a parità di fattori della combustione immessi in camera di combustione (ossia aria e combustibile) si potrà variare come si vuole la pressione in camera di combustione variando la quantità di fumi estratta attraverso il ventilatore estrattore: (potrebbe essere anche più di un ventilatore), avendo però l'accorgimento di disporre di un segnale di anticipo dato dalla misura della portata d'aria immessa in camera di combustione (come mostrato nella figura in basso)

Il principio su cui si basa il sistema di regolazione si ispira proprio al criterio suddetto: nel caso vi sia una variazione del carico, al generatore si presenta una variazione della richiesta di potenza termica. Il sistema asservito del combustibile provvede a variare la portata di combustibile e proporzionalmente la portata d'aria agendo sul ventilatore a monte della camera di combustione. Tale ventilatore, variando il numero di giri, determinerà una variazione sia di prevalenza, che dovrà eguagliare le perdite di carico a valle, sia di pressione in camera di combustione. Il regolatore di depressione agirà sul ventilatore di aspirazione in modo da mantenere la pressione costante.

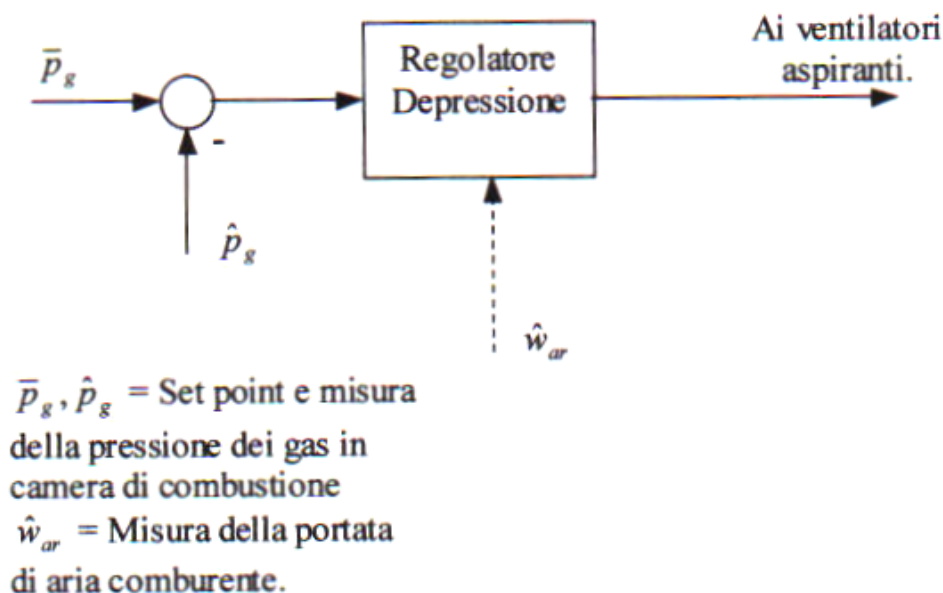


Fig.3.4.8.- Regolazione pressione fumi in camera di combustione.

Le variazioni di portata di aria e di combustibile risultano essere l'unico disturbo esistente in questo tipo di regolazione. Peraltro, in condizioni di funzionamento "normale", dette variazioni sono abbastanza lente rispetto al tempo di risposta del circuito aria - fumi in quanto sono legate alle variazioni del carico. Risulta, quindi, che il suddetto disturbo sia facilmente compensabile a meno di condizioni anomale quali ad esempio il blocco del combustibile (a causa ad esempio di un guasto) che determina una variazione repentina di temperatura dei fumi che a sua volta causa un

- Regolazione e controllo dei generatori di vapore -

brusco cambiamento di pressione in camera di combustione. In questa situazione, per quanto pronto possa essere il sistema, ben poco può fare il regolatore, in quanto la dinamica del sistema di regolazione è pur sempre limitata dal tempo di risposta finito degli attuatori. Si devono prevedere, allora, interventi da parte degli organi di emergenza che provvedono ad agire direttamente sugli attuatori secondo una logica di tipo on - off senza ricorrere al sistema di regolazione.

In conclusione si può dire che nel sistema di regolazione di pressione in camera di combustione l'aspetto relativo alla dinamica non ha la stessa importanza che esso ha nelle strategie di controllo relative al circuito acqua - vapore. Ciò accade in quanto l'unico disturbo è costituito dalle variazioni di carico, la cui rapidità, in condizioni di funzionamento normale, è legata alla dinamica più lenta del circuito acqua - vapore e, quindi, diventa inutile l'ottimizzazione delle caratteristiche dinamiche del sistema di regolazione del circuito aria-fumi. Le condizioni di funzionamento anomale, che potrebbero portare variazioni repentine del disturbo, vengono gestite dalle apparecchiature di protezione.