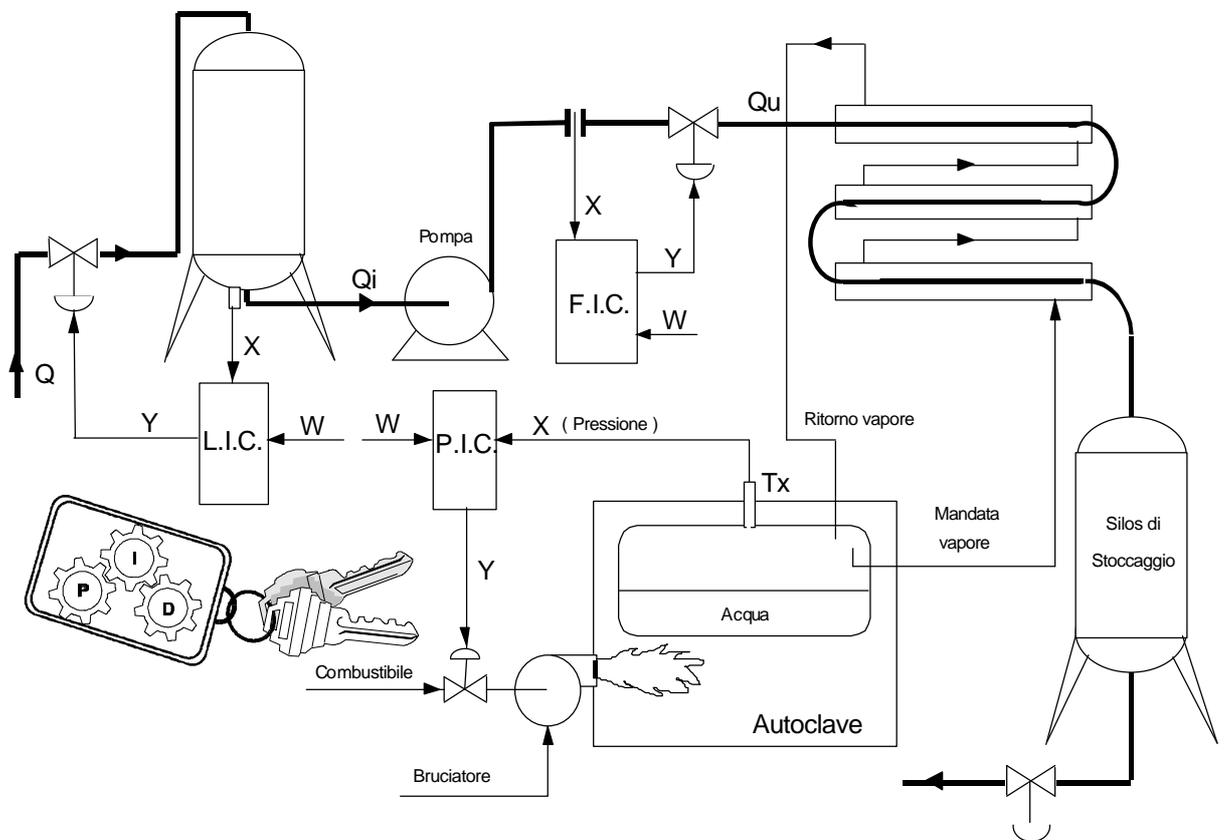


# Guida pratica alla regolazione di processo industriale

INFORMAZIONI TECNICHE  
Rev. 22 - 04 - 99



**RigaSoft**

*RigaSoft spa garantisce il massimo impegno per assicurare l'accuratezza delle informazioni contenute in questo documento. Tuttavia, al fine di mantenere la leadership tecnologica, i prodotti RigaSoft sono soggetti a miglioramenti continui; ciò potrebbe richiedere modifiche alle informazioni contenute in questo documento senza alcun preavviso. RigaSoft non sarà responsabile per errori tecnici o editoriali, oppure omissioni qui contenute, né per danni incidentali o conseguenti risultati dalla fornitura, prestazione o uso di questo materiale.*

*Tutti gli altri marchi e nomi di prodotti, sono marchi di fabbrica o marchi registrati dalle proprie società.*

**RigaSoft**

20030 Seveso ( Milano ) Italy

<http://www.riga.xt.net>

riga@xt.net

# Prefazione

Chi ha un pò più di conoscenza delle cose, le guarda un pò più dall'alto, ma resta pur sempre infinitamente lontano dal termine.

Pascal, Pensieri, Br. 72

Ricordo ancora oggi la difficoltà iniziale di fronte a tutti quei nuovi simboli e funzioni indecifrabili e quindi ho pensato di realizzare questa guida per tutti quegli utenti che si sono imbattuti per la prima volta in un regolatore P.I.D. Tutte le case costruttrici di regolatori si preoccupano di fornire dei dettagliati manuali d'uso, esempi di schemi elettrici o di situazioni anomale che si possono verificare sull'impianto, ma ben pochi costruttori si preoccupano di dare informazioni dettagliate sulle funzioni inserite.

Questo mio lavoro cerca di sopperire a questa mancanza trattando gli argomenti, mi auguro, in modo molto semplice e comprensibile. Dopo svariati anni di assistenza tecnica e di startup di impianti, mi sento di dover aiutare tutta questa gente che, travolta dal progresso tecnologico, si trova ad operare con aggeggi infernali mai visti prima.

Ringrazio soprattutto la ASCON s.p.a. per il tempo dedicato alla mia formazione professionale e tutti gli operatori o tecnici di enti o società che ho avuto il piacere di aiutare di persona e tutti quelli che leggeranno questa guida.



# I N D I C E

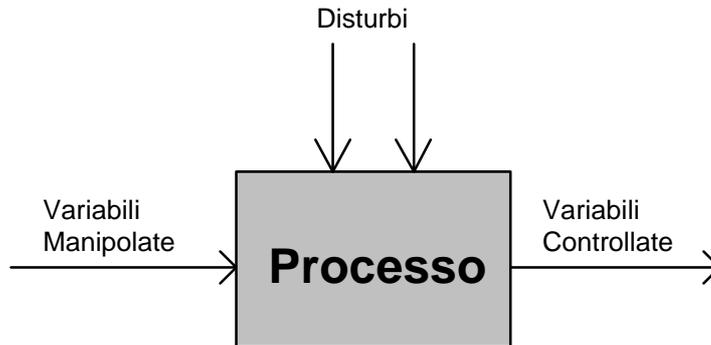
---

Descrizione generale del processo.....	1
Teoria semplificata sul controllo dei processi .....	1
Caratteristica statica del processo .....	2
La retroazione .....	2
Caratteristica dinamica del processo.....	3
Comportamento dinamico del loop di regolazione.....	3
Tipi di processo.....	4
Processi autoregolanti .....	4
Processi con tempo morto puro .....	5
Processi di ordine 0 autoregolanti .....	5
Processi di ordine 1 autoregolanti .....	6
Processi di ordine 2 autoregolanti .....	6
Processi di ordine superiore autoregolanti .....	7
Processi non autoregolanti .....	7
Elementi essenziali per comporre un loop di regolazione.....	7
Il trasmettitore .....	7
Il regolatore .....	8
L'organo finale o attuatore .....	8
Azioni tipiche dei regolatori.....	9
Azione On/Off .....	9
Azione proporzionale .....	11
Azione integrale.....	13
Azione derivativa .....	13
L'insieme delle azioni P.I.D.....	14
Azione Feed Forward.....	17
Le zone di approach o avvicinamenti.....	19
Caso A.....	19
Caso B.....	20
I parametri di bias e ratio.....	21
Tipi di uscite di regolazione .....	22
Uscita P.I.D. continua .....	22
Uscita P.I.D. discontinua .....	22
Uscita P.I.D. per servomotori .....	23
Uscita P.I.D. tipo Caldo / Freddo.....	24
Caratteristiche dinamiche e criteri di messa a punto dei regolatori P.I.D.....	25
Come stabilire la criticita' di un processo.....	25
Sintonizzazione di un regolatore P.I.D.....	27
Tipici valori dei parametri P.I.D. per i processi piu' comuni.....	29
Circuiti tipici di regolazione.....	29
Regolazione di portata.....	29
Regolazione di pressione .....	30
Regolazione di livello.....	31
Regolazione della temperatura.....	32
Regolazione in cascata .....	32
Regolazione di rapporto.....	33
Esempio di regolazione complessa .....	34
Cenni sulla regolazione Fuzzy logic .....	34
Il controllo Fuzzy.....	36

# DESCRIZIONE GENERALE DEL PROCESSO

## Teoria semplificata sul controllo dei processi

Fig 1. Schema basilare di un processo industriale.

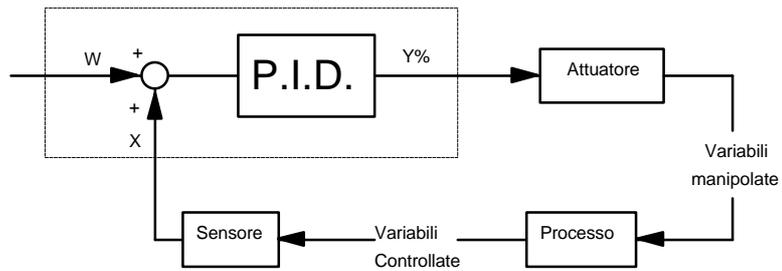


Si definisce processo industriale tutto un insieme di più elementi atti a produrre, con il minore spreco energetico e con la massima sicurezza possibile, sostanze, energia o manufatti. Per fare ciò, ogni singolo elemento deve funzionare al meglio per garantire il massimo standard qualitativo. Per raggiungere queste condizioni alcune grandezze devono essere mantenute il più stabile possibile a dei valori di progetto prestabiliti. Quest'ultima operazione viene chiamata regolazione di processo. Per capire come funzioni questo procedimento è necessario tenere presente che esistono tre fattori importanti che ne determinano il funzionamento.

Questi fattori sono: variabili controllate, variabili manipolate, disturbi (vedi fig.1).

Le variabili controllate sono quelle grandezze chimiche, fisiche o elettriche che i progettisti dell'impianto intendono controllare e successivamente mantenere a dei valori di regime stabili come ad esempio possono essere pressione, portate, livelli, temperature, etc. Queste sono le variabili di processo e comunemente vengono indicate con la lettera X. Il punto di lavoro desiderato viene comunemente denominato con un termine anglosassone "set point" e indicato con la lettera W. Le variabili manipolate sono quelle grandezze su cui bisogna agire per mantenere le variabili controllate più stabili possibile sul valore di settaggio. Le più comuni variabili sono: aria, acqua, oli, gas, energie elettriche, combustibili ed altro. I disturbi sono altre grandezze che agiscono sul processo in modo del tutto imprevedibile e indesiderato tendendo così ad allontanare la "X" da "W". Anche il semplice cambio di set point può essere considerato come un disturbo. Scopo del regolatore quindi è quello di portare e mantenere stabile questa relazione;  $W - X = 0$ . Per agire sulle variabili controllate il regolatore si avvale di una uscita che è in grado di gestire, tramite appositi attuatori, le variabili manipolate. Questa uscita prende il nome di "Y" e non ha una unità di misura prestabilita e quindi viene espressa in percentuale.

Fig 2. Loop elementare di regolazione.

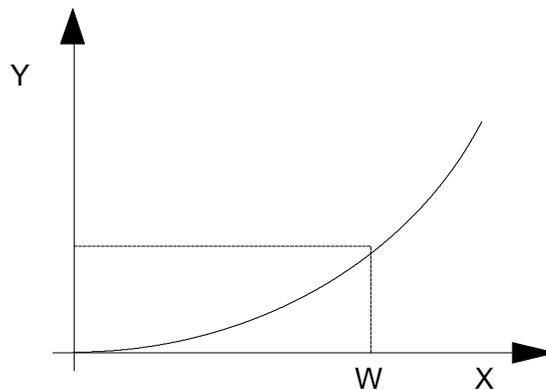


Si può quindi comporre il più elementare loop di regolazione automatico come in fig.2.

Si può notare in questo piccolo esempio di un loop di regolazione generico che il regolatore è solo uno dei tanti elementi che concorre alla buona riuscita della regolazione.

## Caratteristica statica del processo

Fig 3. Rappresentazione grafica della caratteristica statica del processo



In un sistema comunque complesso, si possono evidenziare due elementi basilari che sono, il processo e il regolatore. La caratteristica statica del processo è la relazione che esiste tra posizione dell'organo regolante, o "Y" del regolatore, e il valore "X" raggiunto dopo il transitorio di andata a regime del processo. Questo transitorio può essere più o meno lungo e dipende solo ed esclusivamente dalla natura e dalle caratteristiche del processo. Definita la caratteristica statica del processo ed il valore di "W", si può facilmente ricavare la posizione dell'organo regolante o "Y" come da fig.3.

Impostato quindi il valore di "Y" e in assenza di disturbi, il valore regolato "X" coinciderà con il valore richiesto "W".

## La retroazione

Come si può notare dalla fig.2, il regolatore elabora un segnale "Y" che farà muovere un attuatore che a sua volta farà modificare il processo medesimo. Se tutto si limitasse a questo, il regolatore non saprebbe mai dove si è portato il processo, a meno che di memorizzare la caratteristica statica in qualche modo o comunque in presenza di un disturbo il processo risulterebbe instabile e non più governabile. Per sapere istante per istante se il segnale elaborato "Y" ha prodotto i risultati sperati, viene posto nel processo, un elemento sensibile capace di trasmettere a distanza

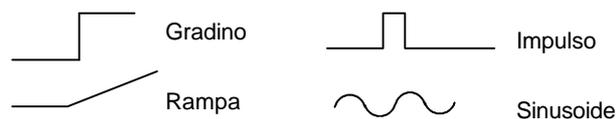
il valore di "X". Nel regolatore, questo dato viene confrontato con il nostro valore desiderato e la differenza tra i due genererà un errore che sarà in grado di correggere la posizione di "Y". Il segnale che torna al regolatore sottoforma di "X", viene dunque definito come retroazione.

## Caratteristica dinamica del processo

---

Non appena si verifica un disturbo nel processo, il valore di "X" tenderà ad allontanarsi da "W" e sarà quindi necessario agire sulla "Y" per ristabilire le condizioni di equilibrio. E' di grande aiuto conoscere a priori come si comporterà il processo ad una variazione nota e imposta all'organo regolante tramite la "Y".

La caratteristica dinamica del processo fornisce istante per istante l'andamento della variabile regolata "X" in funzione a una determinata variazione della variabile manipolata. Si possono applicare al processo diversi tipi di segnale dai più semplici ai più complessi ma di norma si tende ad applicare ad essi dei segnali di tipo semplice e facilmente riproducibili anche in laboratorio. Questi segnali sono:



- Variazione a Gradino
- Variazione a rampa
- Variazione a impulso
- Variazione sinusoidale

Tra questi segnali il più usato è la variazione a gradino perchè è il più semplice da generare e perchè prima e dopo il transitorio esistono condizioni di equilibrio. In particolare per poter valutare la risposta in frequenza del regolatore, si applicano dei segnali di tipo sinusoidali.

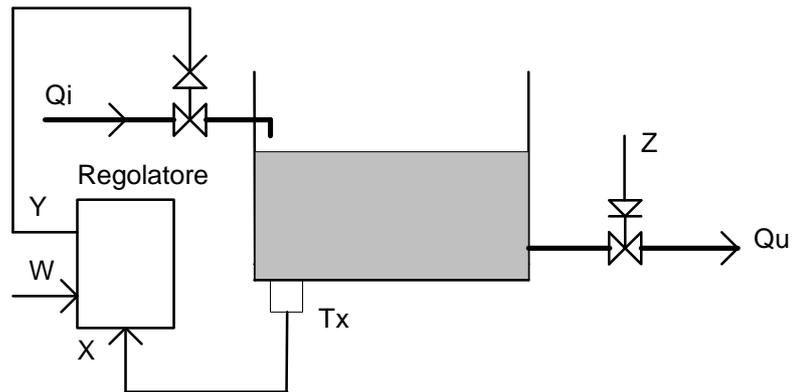
## Comportamento dinamico del loop di regolazione

---

Per analizzare il comportamento del sistema a seguito di una variazione o di un disturbo, prendiamo ad esempio la classica regolazione di livello in un serbatoio dove:

- |   |                             |                       |
|---|-----------------------------|-----------------------|
| X | = livello nel serbatoio     | (Grandezza regolata)  |
| Y | = Spostamento stelo valvola | (Grandezza regolante) |
| W | = Livello voluto            | (Set point)           |
| Z | = Disturbo                  | (Portata in uscita)   |
| Q | = Portata                   |                       |

Fig 4. Schema di un impianto per la regolazione del livello di un serbatoio.



Nel circuito come in figura 4 la condizione di equilibrio è caratterizzata da  $Q_i = Q_u$  e da  $X = W$ . Supponiamo ora che al tempo generico  $T_0$  la  $Q_u$  subisca una repentina diminuzione per cui si potrà scrivere che  $Q_i > Q_u$  e di conseguenza  $X > W$ . Il regolatore durante il continuo confronto tra  $X$  e  $W$ , elaborerà il nuovo valore di  $Y$  per ridurre  $Q_i$  fino a stabilizzare il sistema ad una nuova condizione di equilibrio. Il passaggio tra il vecchio e il nuovo regime non avverrà istantaneamente ma entro un periodo di tempo entro il quale il livello  $X$  tenderà ad oscillare. Da queste semplici deduzioni si può stabilire il grado di bontà di un loop di regolazione centrando l'attenzione su tre fattori che sono:

- Periodo transitorio (Tempo impiegato per stabilizzare la variabile)
- Deviazione massima (Massimo valore di scostamento dal set point)
- Offset residuo (Errore tra  $W$  e  $X$  dopo il periodo transitorio)

In particolare, un loop di regolazione è tanto più efficiente quanto minore è il tempo impiegato per raggiungere la nuova condizione con una minima deviazione tra set e misura e con un offset nullo a regolazione ultimata.

## Tipi di processo

---

Dalle descrizioni precedenti si può trarre che un processo è caratterizzato dalle sue caratteristiche statica e dinamica. La prima definisce il comportamento a regime mentre la seconda la fase di raggiungimento dello stato di regime. In base alla caratteristica dinamica, prescindendo quindi dalla natura fisica del processo, vediamo ora di distinguere i diversi tipi di processo. Esistono due grandi categorie di processi e più precisamente:

- Processi autoregolanti; la grandezza regolata  $X$  dopo un transitorio si stabilizza su un nuovo valore di regime.
- Processi non autoregolanti; dopo un transitorio la grandezza regolata  $X$ , non trova un punto di stabilità.

## Processi autoregolanti

---

Sono processi nei quali in seguito ad una variazione della grandezza regolante  $Y$ , la grandezza regolata  $X$  raggiunge un nuovo valore di equilibrio dopo un certo tempo tipico del processo stesso. Il nuovo valore di  $X$  dipenderà dalla variazione  $Y$

per cui si potrà scrivere la seguente relazione  $G = X/Y$  dove  $G$  rappresenterà il guadagno o fattore di amplificazione.

Sarà molto semplice regolare il processo se questo rapporto è uguale 1 o un numero inferiore ed è inoltre da tener presente che la maggior parte dei processi industriali, rientra in questa categoria.

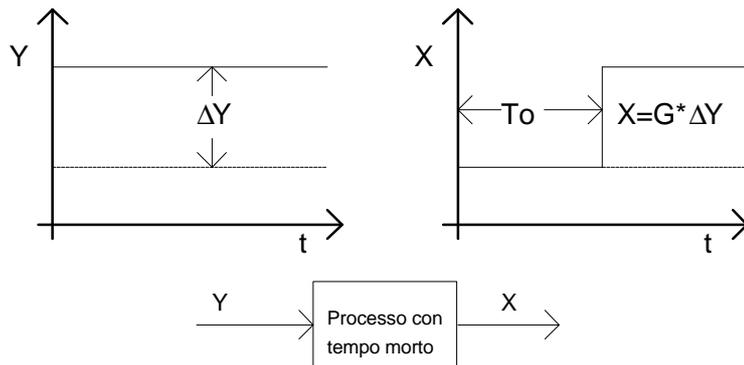
A questo punto è necessario creare una ulteriore classificazione a seconda della durata del transitorio e le modalità di arrivo al nuovo valore di equilibrio. Si identificano così:

- Processi con tempo morto puro
- Processi di ordine 0 autoregolanti
- Processi di ordine 1 autoregolanti
- Processi di ordine 2 autoregolanti
- Processi di ordine superiore autoregolanti

## Processi con tempo morto puro

Sono dei particolari processi dove l'effetto di una variazione della grandezza regolante  $Y$ , la si avverte solo dopo un certo tempo detto appunto tempo morto. In base a questa definizione si può dire che la grandezza regolante  $Y$  si trasmette con una velocità finita attraverso il processo. Vedi fig. 5

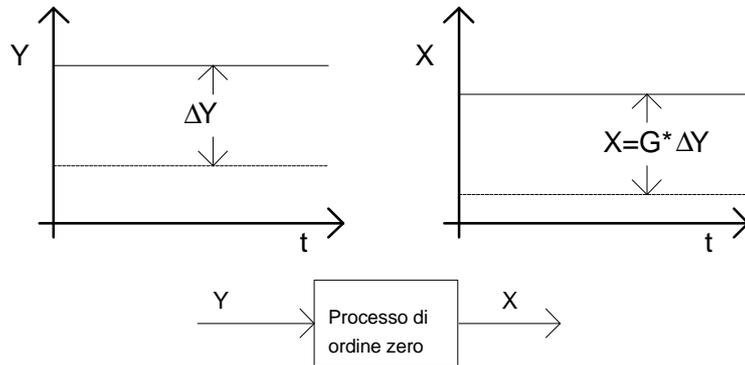
Fig 5. Rappresentazione di un processo con tempo morto puro



## Processi di ordine 0 autoregolanti

Sono caratterizzati dal fatto che la grandezza regolata  $X$  segue fedelmente la grandezza regolante  $Y$  senza ritardi apprezzabili. Ad un movimento della  $Y$  corrisponde un immediato movimento della  $X$  e cioè due segnali sono in fase tra loro. La f.d.t. (Funzione di trasferimento) che lega tra loro i due segnali è la seguente:  $X = G \times \Delta Y$  dove  $G$  rappresenta il guadagno del processo. Un processo di ordine zero è più teorico che pratico infatti non è industrialmente molto frequente. Vedi fig. 6

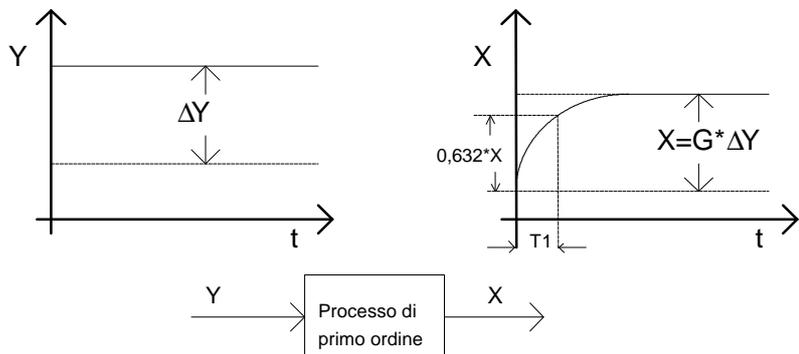
Fig 6. Rappresentazione di un processo di ordine zero



## Processi di ordine 1 autoregolanti

Sono caratterizzati dal fatto che la grandezza regolata X segue la grandezza regolata Y solo dopo un certo tempo. Anche in questo caso il valore finale di X è legato al guadagno per cui è ancora valida la relazione  $X = G \times \Delta Y$ . Questo tempo di ritardo di raggiungimento del nuovo valore di X, viene chiamato "prima costante di tempo" e identificato con le lettere T1. Si può definire T1 anche come il tempo necessario affinché la variazione di X raggiunga il 63,2% del suo valore finale. In pratica si può concludere che un processo di primo ordine è caratterizzato dai due fattori G e T1. Vedi fig. 7

Fig 7. Rappresentazione di un processo di primo ordine

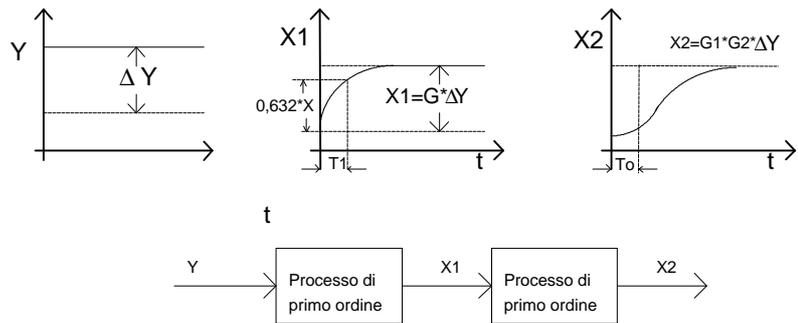


## Processi di ordine 2 autoregolanti

Sono caratterizzati, da un rallentamento iniziale che si può evidenziare dal fatto che la tangente nell'origine alla curva è orizzontale, da un tratto quasi rettilineo e da un arrivo al valore di regime smorzato e asintotico. Normalmente si semplifica un processo di secondo grado in due processi di primo grado in serie uno con l'altro.

Come si vede dalla figura, il transitorio attraversando il primo blocco subisce l'influenza della prima costante di tempo e così modificato entra in un secondo blocco dove viene ulteriormente rallentato dalla seconda costante di tempo e determina così la risposta al transitorio iniziale. Un processo di secondo ordine è dunque caratterizzato da tre parametri fondamentali che sono: il guadagno G, la prima costante di tempo T1, la seconda costante di tempo T2. Vedi fig. 8

Fig 8. Rappresentazione di un processo di secondo ordine



## Processi di ordine superiore autoregolanti

Come per il processo di secondo ordine era possibile semplificarlo in due processi di primo, così si può semplificarne uno di ordine superiore ipotizzando "n" processi di primo grado uno in serie all'altro. Il rallentamento iniziale sarà tanto più evidente quanto maggiore è il numero di elementi in serie che in taluni casi può divenire un vero e proprio tempo morto.

## Processi non autoregolanti

Sono caratterizzati dal fatto che esiste un unico valore di Y perchè la X rimanga in equilibrio. Se questo valore viene variato, la grandezza regolata X si allontana indefinitamente senza farvi ritorno. Anche per questi tipi di processi è possibile distinguere, a seconda delle modalità di allontanamento della grandezza regolata X, processi di ordine diverso come nei casi precedenti.

# ELEMENTI ESSENZIALI PER COMPORRE UN LOOP DI REGOLAZIONE

## Il trasmettitore

L'elemento essenziale e di vitale importanza per tutto il loop di regolazione è il trasmettitore o elemento primario. Di fatto questo sensore deve convertire una unità fisica (temperatura, pressione etc.) in una grandezza facilmente trasportabile a lunghe distanze e con una buona precisione. Inoltre il sensore deve avere delle caratteristiche meccaniche elevate perchè di solito è a contatto con i fluidi, gas, solventi o altro che nel tempo tendono a modificare le caratteristiche del sensore stesso. Un'altra caratteristica non meno importante è la ripetibilità della misura entro le tolleranze dichiarate e la velocità di risposta. Quest'ultima diventa essenziale quando la risposta del processo è molto veloce

e il tempo di ritardo introdotto dal sensore può aumentare considerevolmente il tempo morto globale del sistema.

A questo proposito l'installazione meccanica del sensore stesso diventa di vitale importanza e deve soddisfare due ben precise esigenze.

La prima è la rappresentatività della variabile: il trasmettitore deve essere collocato in un punto dove esistano le condizioni più significative del processo stesso.

La seconda condizione è la riduzione del tempo morto: il sensore deve essere posizionato nel punto dove le variazioni possono essere rilevate nel più breve tempo possibile.

Non si deve dimenticare che il trasmettitore è l'elemento fondamentale perchè fornisce un segnale di retroazione al regolatore di processo. Tale sensore può assumere le forme e dimensioni più disparate in funzione della variabile regolata. Per esempio termocoppie o termoresistenze nelle regolazioni di temperatura, diaframma calibrato con trasmettitore di pressione differenziale per regolazioni di portata, catena di elettrodi nelle regolazioni di Ph etc. etc.

## **Il regolatore**

---

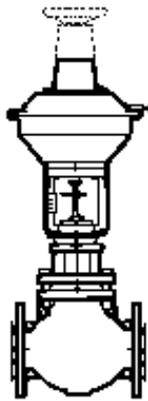
Il regolatore è il cervello di tutto il loop di regolazione. Infatti a lui giungono tutti i segnali, dal campo, dall'operatore o da sistemi remoti ed è in base ad una sua elaborazione che si ottiene un segnale capace di controllare un processo comunque complesso. Esistono diversi tipi di elaborazione di segnale e in base a questo compito i regolatori ne prendono il nome come ad esempio: regolatori di tipo ON/OFF, regolatori di tipo P.I.D., regolatori Flottanti, regolatori Integratori, regolatori Fuzzy, ed altri ancora. In ambito industriale sono comunemente utilizzati i regolatori di tipo ON/OFF e P.I.D. e solo ultimamente sono apparsi i primi regolatori ibridi Fuzzy-P.I.D. La scelta del regolatore non è sempre facile in quanto bisogna aver bene presenti le caratteristiche del processo da mettere sotto controllo. Usualmente si utilizzano i regolatori ON/OFF come soglie di allarme o di interventi vari a punti ben prestabiliti o per regolazioni non essenziali alla qualità del prodotto finale mentre vengono utilizzati i regolatori P.I.D. in tutti gli altri casi. Esistono due gruppi di regolatori che sono: pneumatici ed elettrici. A sua volta nel gruppo dei regolatori elettrici, si distinguono due sottogruppi che sono: analogici e digitali. I primi sono destinati ad una prossima scomparsa lasciando spazio ai secondi per motivi di costo di potenza di elaborazione e adattabilità alle proprie esigenze nonché alla possibilità di essere connessi a sistemi di supervisione. Anche i vecchi regolatori pneumatici sono oggi divenuti degli ibridi pneumatico-microprocessore perchè è su questa via la tendenza del futuro ormai prossimo.

## **L'organo finale o attuatore**

---

L'attuatore è l'elemento nel loop di regolazione che riceve il segnale di uscita elaborato dal regolatore e manipola l'agente regolante in modo da apportare le opportune correzioni al

processo. In pratica è un organo capace di trasformare un segnale, di solito elettrico e di bassa potenza, in un segnale ad alta potenza, in un movimento meccanico od altro ancora. Per la stragrande maggioranza dei casi, l'organo finale è costituito da una valvola. La valvola è una specie di rubinetto capace di modificare la portata in modo continuo da 0% a 100%. Lo stelo può essere mosso da diversi tipi di motore, elettrici o pneumatici comandati direttamente dal segnale di uscita del regolatore. Tutto il gruppo comprendente il motore, eventuali convertitori di segnale, e la valvola stessa, formano un attuatore. Esistono molti



altri tipi di attuatori e dipendono dal segnale ricevuto dal regolatore e dalla grandezza da manipolare. Es. teleruttori, contattori statici, P.L.C., inverter ed altro. Anche in questo caso, come per il trasmettitore, la giusta scelta ed il corretto dimensionamento, avvantaggiano il compito del regolatore mentre si possono ottenere degli insuccessi se una di queste due condizioni non viene rispettata. Per ottenere una buona ed efficiente regolazione, si deve dimensionare un attuatore in modo da farlo lavorare in campo di solito compreso da 20% a 80%. Il superamento di tali limiti, rendono la regolazione critica e in taluni casi impossibile.

Concludendo, è importante sottolineare che anche questo organo è un elemento attivo nel loop di regolazione e che da esso dipendono l'affidabilità e precisione di tutto l'anello, per cui è indispensabile che sia ben dimensionato, ben installato e mantenuto sempre in efficienza per ottenere il massimo di rendimento da tutti i componenti del loop considerato.

## AZIONI TIPICHE DEI REGOLATORI

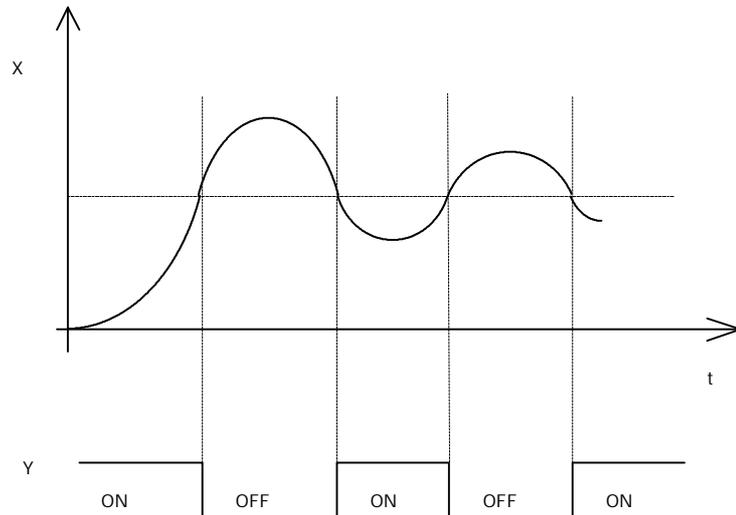
---

### Azione On/Off

---

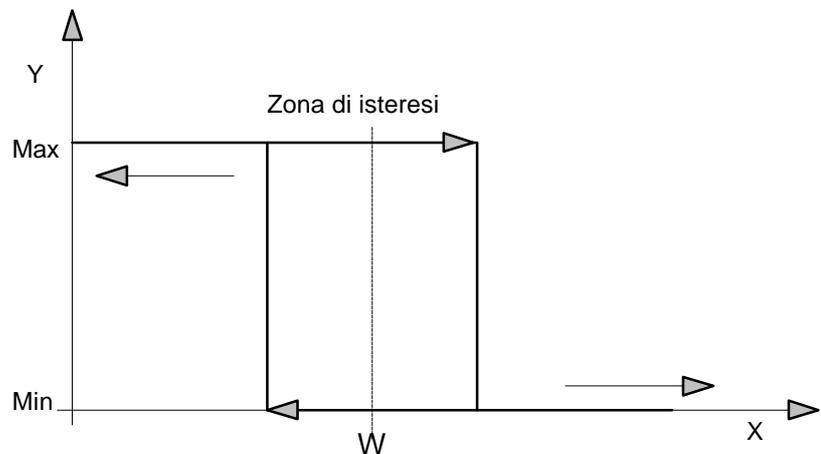
Questa azione è tipica dei regolatori discontinui ed è caratterizzata dal fatto che la grandezza regolante  $Y$  può assumere due soli stati di funzionamento:  $Y_{max}$  e  $Y_{min}$ . La commutazione tra i due stati di funzionamento è istantanea ed avviene quando la variabile  $X$  diventa maggiore o minore del set point  $W$  impostato. (Vedi fig.9)

Fig 9. Tipico andamento di una regolazione ON/OFF



Siccome la variabile  $X$  deve oltrepassare il set point  $W$  per commutare l'uscita, se ne deduce che il processo sarà in continua oscillazione nell'intorno del set point. L'ampiezza e il periodo di queste oscillazioni dipendono solo dalla caratteristica del processo stesso. (Vedi cap. Tipi di processo) In realtà il passaggio tra On e Off non è mai in coincidenza con il set impostato ma leggermente superiore o inferiore. Questa zona è conosciuta con il nome di isteresi o differenziale e anche se a prima vista può sembrare inutile, ha una grande importanza pratica. Se non esistesse questa zona, si avrebbe per un istante più o meno lungo durante il passaggio della variabile sul set point, la coincidenza perfetta  $W = X$ . In questa situazione, non esistendo altri punti di equilibrio, la grandezza regolante  $Y$  tenderebbe ad oscillare alla sua massima frequenza possibile. Questo è un comportamento inaccettabile per qualsiasi impianto. La zona di isteresi, elimina questo inconveniente. Infatti per ottenere la commutazione è necessario uscire da questa zona. Se la variabile  $X$  si dovesse stabilizzare nell'intorno del set e entro la fascia di isteresi, l'uscita manterrebbe lo stato precedentemente assunto. (Vedi fig. 10)

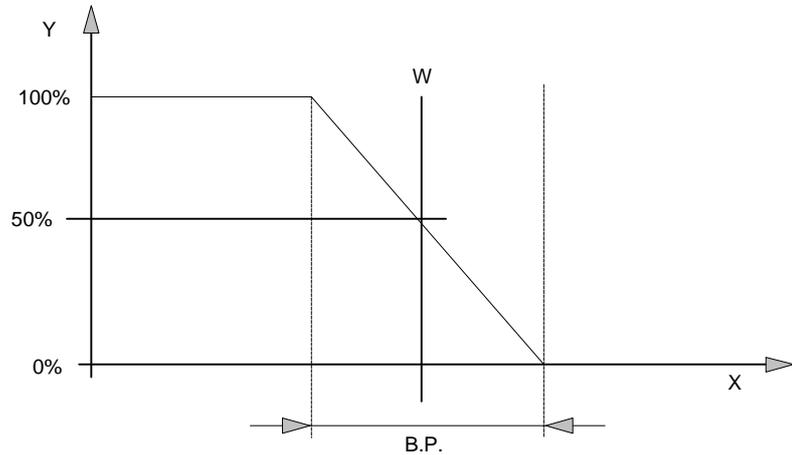
Fig 10. Rappresentazione della zona di isteresi



## Azione proporzionale

L'azione proporzionale determina una variazione della grandezza regolante Y, direttamente proporzionale all'entità dell'errore W - X. Questa azione è conosciuta con il nome di banda proporzionale e la si può idealizzare come una fascia che si dispone 50% sopra e 50% sotto il set point impostato e di norma si esprime in % ampiezza scala del regolatore. Vedi fig. 11.

Fig 11. Rappresentazione grafica dell'azione proporzionale



Al di fuori di questa fascia, il regolatore ha due ben precise condizioni che sono: Y max e Y min. (On/Off) Si può definire la B.P. come Guadagno del regolatore stesso e cioè

$$G = \frac{100}{B.P.\%}$$

Ipotizzando una B.P. di 100%, se ne ricava che il guadagno è = 1 che significa che occorre una variazione del 100% della variabile X per fare variare del 100% la grandezza regolante Y. Ipotizziamo ora di inserire una B.P. di 10%. Il guadagno è dato,

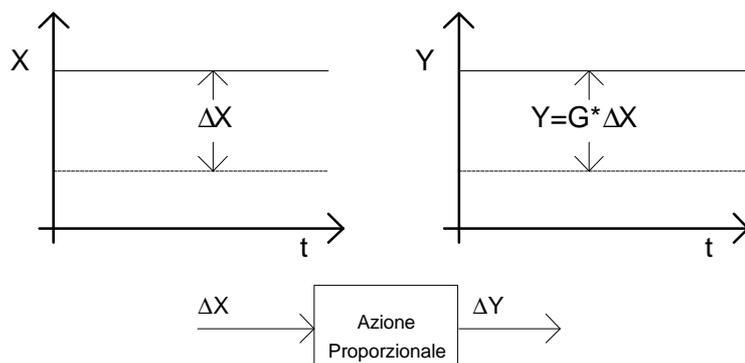
$$G = \frac{100}{B.P.\%}$$

che equivale a 10. In questo caso il guadagno, rispetto al caso precedente, è aumentato 10 volte e significa che è sufficiente una variazione del 10% di X per ottenere una variazione del 100% della grandezza regolante Y.

La relazione che lega tra loro errore (W-X) e Y è la seguente:  $Y = G \times |W - X|$  da cui  $Y = \frac{100}{B.P.\%} \times |W - X|$ .

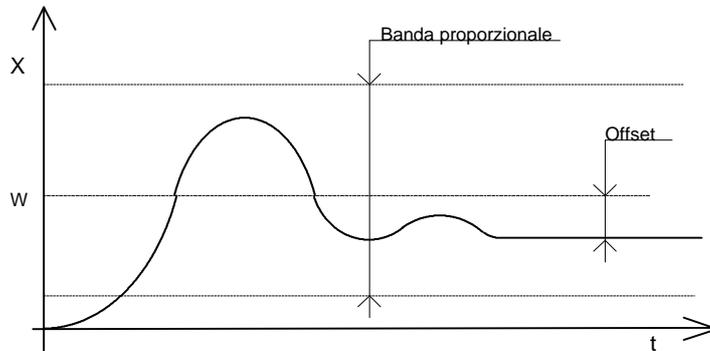
Vedi fig. 12.

Fig 12. Effetto dell'azione proporzionale sull'uscita Y



Nei regolatori sia elettrici che pneumatici o di altra natura, l'azione proporzionale è identificata dalle lettere B.P. oppure Xp oppure Gain (Guadagno) o P.B. Questo tipo di azione sebbene agisca in modo da portare il processo in modo graduale verso una condizione di equilibrio, non riesce ad annullare completamente lo scostamento residuo. Vedi fig. 13.

Fig 13. Tipica regolazione proporzionale.



Come si vede dalla fig.11, per qualsiasi valore di banda, quando la variabile eguaglia il set point l'uscita assume il valore di 50%. Se in un istante qualsiasi il processo dovesse richiedere una variazione pari a  $Y_1$ , la grandezza regolata  $X$  dovrà assumere un valore diverso da  $W$  e questo errore tra set e misura, viene chiamato scostamento residuo o offset. Si può limitare l'errore stringendo la banda proporzionale ma questa operazione è pericolosa in quanto si aumenta il guadagno e si rischia così di far entrare in risonanza l'impianto senza più poter fermare le oscillazioni. Si può a questo punto definire che un regolatore On/Off è paragonabile ad un regolatore solo Proporzionale con guadagno infinito o con banda proporzionale di 0%. Nella scelta del giusto valore di banda proporzionale dobbiamo forzatamente accettare un compromesso fra scostamento residuo e pendolazioni della  $X$  dopo ogni variazione del processo.

Fig 14. Rappresentazione dell'errore dovuto alla sola azione proporzionale.

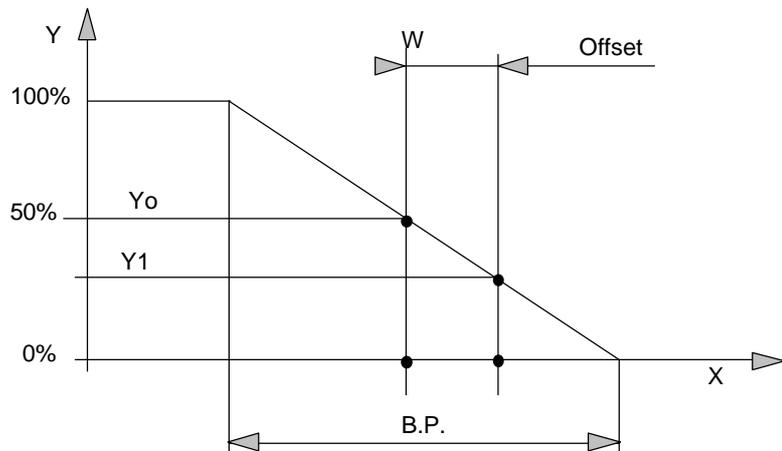
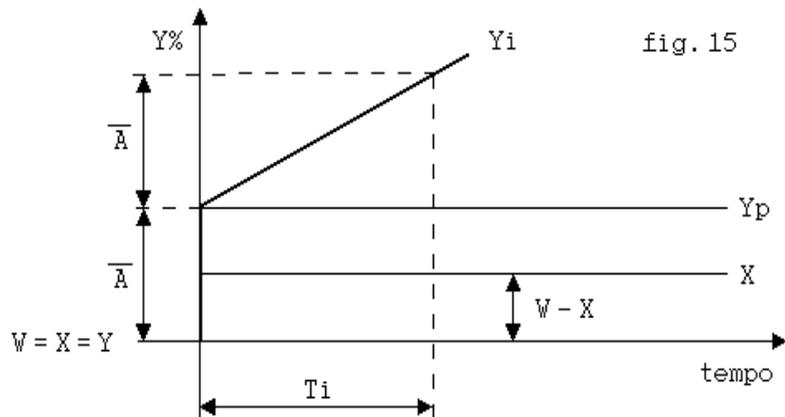


fig. 14

## Azione integrale

Fig. 15. Rappresentazione dell'azione integrale. (In questo caso l'azione di regolazione è diretta).



N.B. In questo caso l'azione di regolazione è diretta.

Per annullare lo scostamento residuo sui regolatori proporzionali, esiste la possibilità di traslare di qualche percento la B.P. rendendola così asimmetrica rispetto al set point ma con il risultato di correggere l'offset indesiderato. Questa azione si chiama Riassetto Manuale o Manual Reset. Se la presa di carico al processo rimane costante, anche l'offset rimane costante. Agendo quindi sul M.R. si può riportare il processo sul punto desiderato  $W$ . Ma se al processo dovessimo applicare in continuazione diverse prese di carico, ne consegue che dovremmo correggere in continuazione il valore di M.R. per correggere i diversi offset. Questa operazione può essere eseguita in modo del tutto automatico da un regolatore P.I. cioè da un regolatore con azione proporzionale e integrale.

Per definizione si dice che: l'azione integrale è il tempo impiegato dalla sola azione I. per ripetere il medesimo contributo dell'azione P. (Ad errore costante) Vedi fig. 15.

In parole più semplici si può dire che l'azione integrale percepisce qualsiasi differenza tra set  $W$  e misura  $X$  e muove la variabile  $Y$  con una velocità proporzionale alla differenza stessa. E' un'azione che si esercita in modo continuo sull'organo regolante con energia decrescente sino ad annullarsi quando il valore di  $W - X = 0$ . Per analizzare in dettaglio la sola azione I, applichiamo in ingresso al regolatore una variazione di  $X$  a gradino e manteniamo il nuovo valore raggiunto costante nel tempo. Dopo un gradino o step sull'uscita più o meno ampio dovuto al guadagno dell'azione P. si ottiene una rampa con una inclinazione più o meno accentuata dovuta al tempo integrale inserito. Vedi fig. 15. L'azione integrale si può dunque esprimere anche come

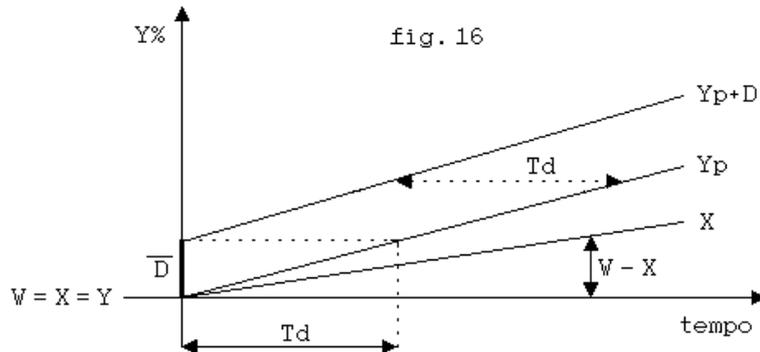
ripetizioni per minuto (r.p.m.) dove  $r.p.m. = \frac{1}{T_i}$

## Azione derivativa

L'azione derivativa rende il regolatore sensibile ad ogni variazione di velocità della variabile  $X$  e viene anche detta azione

anticipatrice. Per definizione si dice che: l'azione derivativa è il tempo necessario alla sola azione P per raggiungere lo stesso livello  $P + D$ . Questo risulta più chiaro dalla fig. 16.

Fig. 16. Rappresentazione dell'azione derivativa. (In questo caso l'azione di regolazione è diretta).



E' necessario precisare che per analizzare la sola azione D, si deve applicare in ingresso al regolatore una variazione di X a rampa costante in quanto la derivata percepisce solo l'istante iniziale della variazione stessa perchè gli istanti successivi sono di ampiezza costante.

La derivata non agisce mai da sola ma in combinazione con le altre azioni perchè, come prima abbiamo enunciato, è in grado di percepire solo le variazioni di velocità ma non gli scostamenti della variabile X dal set point W per cui non sarebbe in grado di portare il processo al valore desiderato W. Questa sua caratteristica, sentire ogni minima variazione di velocità, conferisce al processo una ottima stabilità Di conseguenza, essendo tutto il loop di regolazione più stabile, si può ridurre la B.P. riducendo l'offset e rendendo il regolatore più pronto a reagire a qualsiasi variazione del processo stesso.

## L'insieme delle azioni P.I.D.

Un regolatore P.I.D. è uno strumento, dotato di tutte le azioni sino ad ora esaminate. l'insieme di queste azioni, permette la regolazione di buona parte dei processi esistenti.

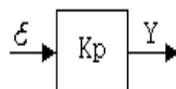
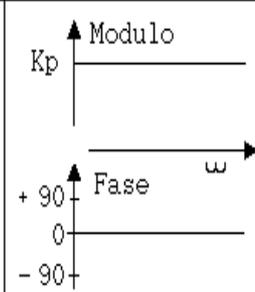
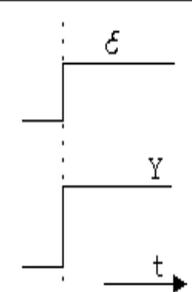
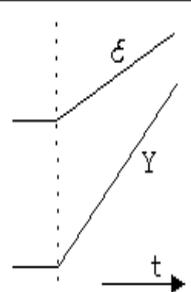
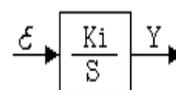
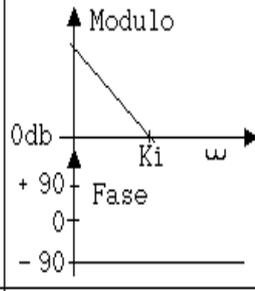
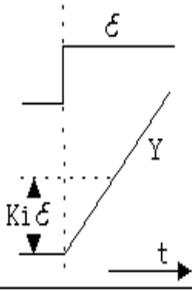
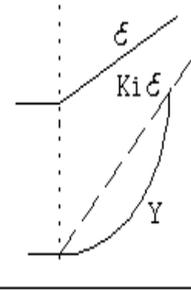
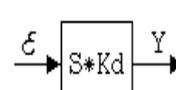
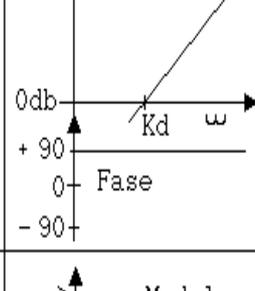
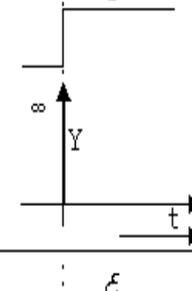
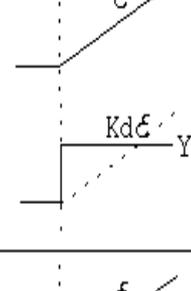
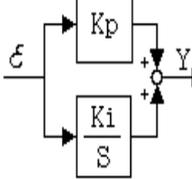
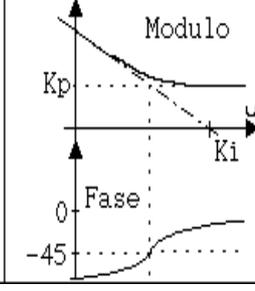
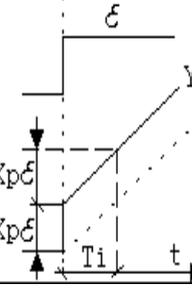
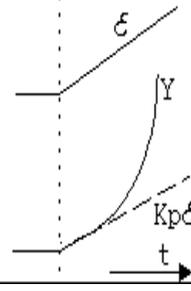
Infatti, l'azione Proporzionale corregge in continuazione il valore di Y proporzionalmente all'errore tra set e misura; tanto è maggiore l'errore  $W - X$  e tanto è maggiore l'apporto dato alla grandezza regolante Y. E' un'azione che risponde in fase all'errore stesso.

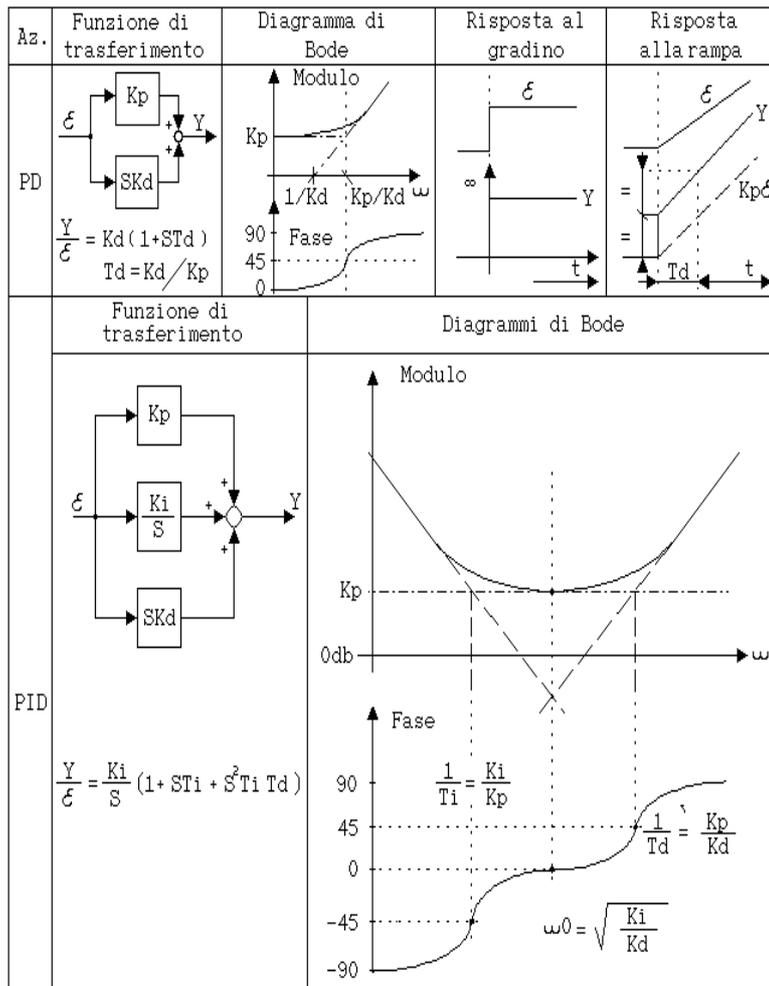
L'azione Integrata invece, risponde in ritardo rispetto all'errore  $W - X$  ma è in grado di correggere le imprecisioni dell'azione precedente.

L'azione Derivativa, anticipa la risposta del regolatore e tende quindi a stabilizzare il processo.

Considerando il processo come un complesso circuito elettrico, siamo in grado di intuire che le risposte in "Fase", in "Ritardo" e in "Anticipo", ci permettono di "Rifasare" il circuito in questione. Analogamente per la regolazione di processo, i parametri P.I.D., consentono di ottimizzare la risposta del regolatore per stabilizzare il processo al valore desiderato. In un regolatore a  $\mu P$ , esistono innumerevoli funzioni e parametri ma solo le tre azioni P.I.D. sono il "cuore" del regolatore.

A questo punto si può capire l'importanza di queste azioni che devono essere le prime ad essere ottimizzate per ottenere la stabilità voluta. I regolatori più evoluti, hanno la capacità di ricercare i giusti valori P.I.D. e regolare con i parametri così ottenuti mentre quelli analogici, pneumatici o sprovvisti di questa funzione, necessitano dell'intervento di uno strumentista o di un operatore con esperienza in merito. Questo non deve far scoraggiare gli operatori più inesperti perchè nei prossimi capitoli, riserverò a loro alcuni metodi semplici e pratici per ricavare i parametri in questione. Per chi desiderasse conoscere ancora meglio la regolazione di processo, ho realizzato due tabelle riassuntive, dove vengono enunciate le funzioni P.I.D., in forma matematica.

Az.	Funzione di trasferimento	Diagramma di Bode	Risposta al gradino	Risposta alla rampa
P	 <p><math>K_p = \text{Guadagno azione proporzionale}</math></p>			
I	 <p><math>K_i = \text{Guadagno az. Integrale}</math></p>			
D	 <p><math>K_d = \text{Guadagno azione derivativa}</math></p>			
PI	 <p><math>\frac{Y}{\epsilon} = K_p + \frac{K_i}{S}</math></p>			



## Azione Feed Forward

Molti operatori non sanno che Feed Forward significa "venire prima, anticipare, prevenire".

Come abbiamo visto sino ad ora, le tre azioni principali P.I.D. aspettano che si verifichi un errore tra set e misura prima di intervenire sulla variabile Y. L'azione feed forward, elimina questo inconveniente ed ecco spiegato il suo nome. In pratica il F.F. è un sommatore algebrico programmabile in grado di sommare una percentuale nota sull'uscita del regolatore.

Fig 17. Circuito di regolazione con sommatore inserito.

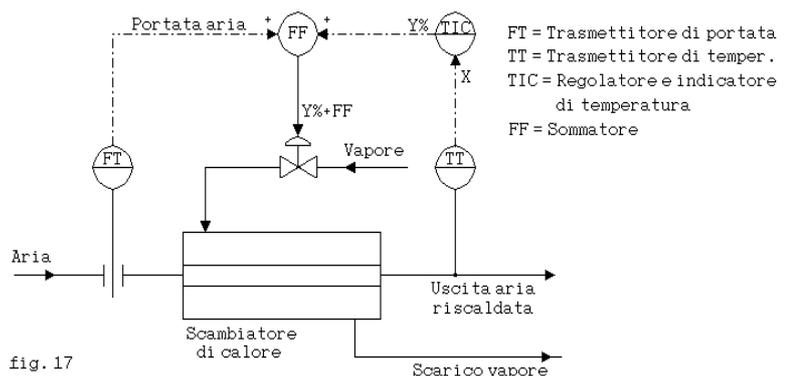


fig. 17

Come si vede dalla fig. 17, il sommatore è esterno al regolatore e ha come riferimento la portata dell'aria. Le variazioni della temperatura in uscita, sono influenzate appunto, dalle variazioni di portata in ingresso. Correggendo in anticipo la posizione della valvola, prima che si verifichi l'errore tra set e misura, la perturbazione viene recuperata immediatamente e senza eccessive pendolazioni perchè ad una variazione nota, viene contrapposta una azione correttiva ideale e proporzionale alla variazione in atto. A questo punto si può dedurre che questa azione è ideale per i processi con forti prese di carico sempre uguali, ma è molto scomoda per processi fortemente non lineari e con variazioni non quantificabili perchè andrebbe ricalcolata di volta in volta. I primi sommatore erano delle unità fisiche esterne al regolatore mentre oggi, con l'avvento dei microprocessori, si è riusciti ad integrare questa funzione all'interno del regolatore stesso semplificando ulteriormente il cablaggio dei quadri elettrici e riducendo il numero di apparecchiature installate nonché, il costo.

Anche la società Ascon, è riuscita ad integrare da tempo questa funzione nei suoi regolatori a microprocessore ma con una variante singolare. Come abbiamo visto in precedenza, il sommatore F.F. somma sull'uscita una quantità nota prendendo come riferimento la variabile più significativa del processo. Ascon prende come riferimento il valore del set point  $W$ . Con questa astuzia si possono eliminare gli overshoot, arrivare al set point più velocemente e non di meno, seguire perfettamente i vari profili dei set point programmati con rampe e stasi. Infatti legando la posizione del set  $W$  con quella dell'uscita  $Y$  è possibile, perdendo un po' di dinamica, stabilire quale valore dovrà assumere la  $Y$  per mantenere la  $X$  a quel determinato valore di set  $W$ . Dopo prove sperimentali si può stabilire che, per mantenere stabile la  $X$  sul set  $W$ , l'uscita deve assumere un certo valore. Noto questo valore si può inserire nei regolatori il valore di F.F. dato dalle seguenti formule:

$$\begin{aligned} \text{- Azione Inversa} \quad FF &= \frac{Y\% \times \text{Amp. Scala}}{W - \text{Inizio Scala}} \\ \text{- Azione Diretta} \quad FF &= \frac{(100 - Y\%) \times \text{Amp. Scala}}{W - \text{Inizio Scala}} \end{aligned}$$

In pratica con questa azione di somma sull'uscita, è possibile traslare il punto naturale di bilanciamento dell'uscita di 50%, ad un valore desiderato e ideale per la regolazione. Come la variabile entra in banda proporzionale, l'uscita  $Y$  salta direttamente al giusto valore per cui in coincidenza  $W = X$ , la  $Y$  assume il valore finale riducendo così tutti gli inconvenienti delle oscillazioni e delle sovraelongazioni. Inserendo questa azione di F.F., è consigliabile ridurre l'apporto dell'azione integrale aumentandone il tempo perchè l'integrale non è più necessaria in quanto siamo stati noi a dire al regolatore, che per mantenere quel set  $W$ , occorre un certo valore di  $Y$ . Al contrario del caso precedente, questo F.F. non è adatto a processi fortemente perturbati.

## Le zone di approach o avvicinamenti

Approach significa avvicinarsi. Questo è dunque il compito di queste zone e cioè, far avvicinare la variabile X al set point W secondo i propri desideri. Normalmente queste zone sono due e sono posizionate una sopra (Avvicinamento dall'alto=A.h.) e una sotto (Avvicinamento dal basso=A.l.) il set point W. Sono espresse in "Volte  $\times$  B.P." per semplificarne l'uso. Infatti modificando la B.P., automaticamente si modificano anche le zone di approach, altrimenti andrebbero modificate ad ogni variazione di B.P. Per default vengono posizionate a 0,5 B.P. perchè si ha una coincidenza con i limiti di Banda Proporzionale superiore e inferiore. Ricordiamoci infatti che la B.P. è simmetrica rispetto al set point e si dispone metà sopra e metà sotto W per cui  $A.l. = 0,5 \times B.P.$  è equivalente a  $B.P./2$  cioè coincide con la parte inferiore della B.P. Idem par la zona di approccio A.h. ma in modo reciproco. Dopo aver imparato a posizionare queste zone, vediamo come funzionano.

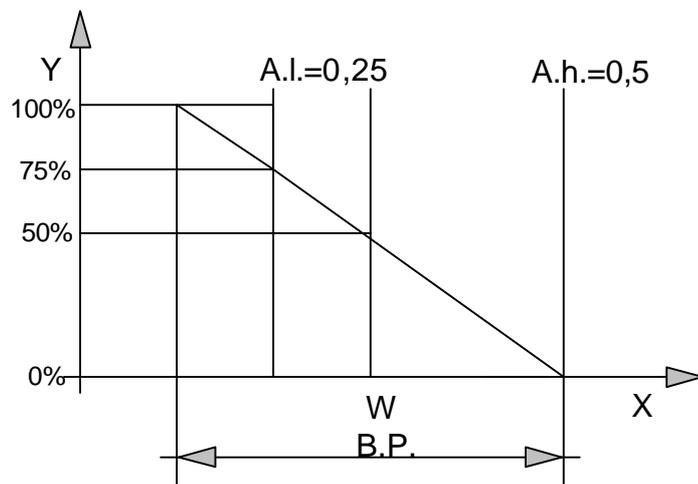
Esistono due possibilità di funzionamento e sono:

- **A)** Restringere la zona di approach, alta o bassa, all'interno della B.P.
- **B)** Allargare la zona di approach, alta o bassa, all'esterno della B.P.

### Caso A

Se si stringe la zona di A.l. o A.h. all'interno della B.P., si ottiene un'azione di forzaggio, a 0% o al 100% dipendente dal tipo di azione se diretta o inversa, sino al raggiungimento della zona stessa dopo di che si ottiene una modulazione di Y% regolare. (Vedi fig. 18)

Fig 18. Effetto della zona di avvicinamento inferiore sul normale andamento della Y.



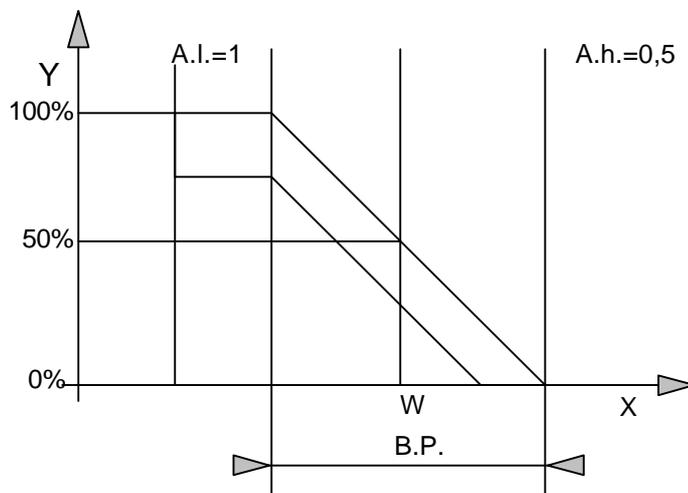
Questa azione è utile in tutti quei casi dove il processo fa molta fatica ad arrivare al set point W, per cui necessiterebbe di una B.P. stretta per dare un maggiore contributo all'uscita Y, mentre per stare stabile sul set W occorrerebbe una B.P. larga. L'azione di approach ha la capacità di far coesistere le due necessità contemporaneamente. Infatti pur avendo una B.P. larga, la zona di approach forza l'uscita sino al punto stabilito senza necessariamente modificarne il guadagno. Può essere utile anche per limitare imprevisti ed indesiderati overshoot. Posizionando ad un giusto valore A.h., si ottiene che, l'uscita viene forzata a 0% appena la variabile X raggiunge la zona di A.h. e non aspetta di uscire dalla B.P. superiore limitando così l'ampiezza dell'oscillazione ed il tempo di tutto il transitorio.

N.B. Stringendo al massimo consentito sia la zona A.I. che la zona A.h., per qualsiasi valore di B.P. inserita, si ottiene un regolatore On/Off.

## Caso B

Allargando la zona di A.I. o A.h. all'esterno della B.P., si ottiene una azione frenante ancora prima che la variabile X entri nella B.P. perchè tra la zona di approach e la B.P., viene attivata la sola azione derivativa. Questa azione di frenata sarà piu forte quanto maggiore è il tempo derivativo o quanto maggiore sarà la velocità della variabile X. Questo tipo di azione è utile in tutti quei casi dove l'energia applicata al processo è in esubero per cui si è costretti a parzializzare l'uscita molto lontano dal set point. Anche in questo caso, il solo P.I.D. non riesce ad arrivare a degli ottimi risultati perchè esistono due necessità contrapposte che sono: per regolare correttamente il processo necessita una B.P. stretta mentre per evitare la sovraelongazione, necessiterebbe una B.P. larga per iniziare la frenata molto prima. Le zone di approach, risolvono anche questo problema. Il classico esempio può essere rappresentato dall'estrusore per materie plastiche. Normalmente si applicano delle resistenze di grossa potenza per ridurre i tempi di riscaldamento iniziali mentre in fase di regolazione, il processo richiede solo una piccola parte della potenza impegnata. E' altresì vero che per regolare questo tipo di processo, occorrono delle B.P. strette. A questo punto si intuisce che occorrerebbe un'azione in grado di ridurre l'uscita Y molto prima che la variabile entri in B.P. per eliminare la sovraelongazione.

Fig 19. Effetto della zona di avvicinamento inferiore sul normale andamento della Y.



Come si può vedere dalla fig.19 la zona di A.I. risolve questo problema. E' da premettere che per analizzare il comportamento dell'uscita, si applica in ingresso al regolatore, una rampa costante per verificare l'influenza della azione derivativa nella zona compresa tra A.I. e B.P. inferiore. Dopo tutte queste precisazioni, si può affermare che la modulazione dell'uscita Y avviene all'interno delle zone di approach mentre all'esterno si funziona in On / Off. In conclusione a tutti i discorsi sino a qui fatti, si trae che le azioni di regolazione fondamentali sono:

- A) Azione proporzionale (B.P.)
- B) Azione integrale (T.i.)
- C) Azione derivativa (T.d.)

mentre le azioni F.F., A.I., A.h., sono un valido aiuto alle prime tre. Un regolatore, almeno in linea teorica, fornito di tutte queste azioni è in grado di far fronte a qualsiasi tipo di necessità pratica.

## I parametri di bias e ratio

Per avere una maggiore flessibilità di impiego, la società Ascon ha inserito su alcuni regolatori a microprocessore, la possibilità di manipolare il set point remoto analogico  $W_r$  con i due parametri di bias (Zero) e ratio (Guadagno). Nella stragrande maggioranza dei casi, i segnali analogici  $0 \div 10V$  o  $4 \div 20mA$ , corrispondono rispettivamente all'inizio della scala (0%) e al fondo scala (100%), cioè si ha un rapporto di 1:1, tanto è l'ingresso analogico e tanto è il set point remoto. I parametri di bias e ratio, servono a modificare questo rapporto. Per esempio se si trasla il bias di +50% e il ratio lo si riduce al 50%, si ha in corrispondenza dello 0% del segnale analogico in ingresso un  $W_r = 50\%$  scala e in corrispondenza del 100% del segnale analogico remoto, un  $W_r = 100\%$  scala del regolatore. In questo esempio il segnale analogico, viene traslato di zero e dimezzato di guadagno perchè è sufficiente una escursione del set point (da 50% a 100%) di 50%. Se si mantiene il ratio=100.0 (Guadagno=1) sempre in questo esempio, si ottiene che al raggiungimento del 50% del segnale analogico remoto, il  $W_r$  corrisponde al 100% scala e così via per innumerevoli altri esempi data la ampia possibilità di impostazione di questi parametri. Infatti il bias può essere impostato da un valore -999 a 9999, mentre il ratio può variare da un minimo di 10.0 (Guadagno=0.1) ad un massimo di 500.0 (Guadagno=50). E' da tener presente che che il bias è espresso direttamente in unità ingegneristiche mentre il guadagno è espresso dalla formula  $G = \text{ratio} \div 100$ . In questo modo si può manipolare il set point remoto analogico come si vuole. Tutto questo risulta più comprensibile dalla fig. 20.

Fig. 20. Effetto dei parametri bias e ratio sul set point remoto.

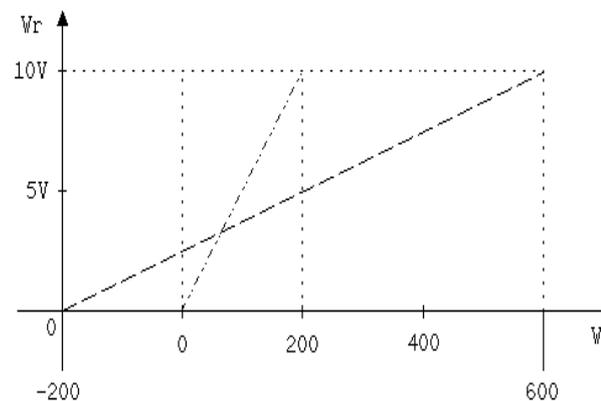


fig. 20

$$r_t = \frac{E_d}{A_s}$$

$$b_i = \text{Start} - I_s$$

--- =  $W_{\text{standard}}$   
 - - - - - =  $W_{\text{modificato}}$

W = Set point di lavoro  
 r<sub>t</sub> = Ratio  
 b<sub>i</sub> = Bias  
 I<sub>s</sub> = Inizio scala regolatore  
 A<sub>s</sub> = Ampiezza scala regolatore  
 E<sub>d</sub> = Escursione desiderata di W  
 Start = Punto di partenza W

Supponiamo di avere un regolatore con scala -200 +600 e di voler far muovere il  $W_r$  tra 0 e 200 con un segnale di 0-10V. Nel parametro bias, si può scrivere direttamente 200 perchè

$I.S. + b_i = \text{Start}$  dove I.S. è l'inizio scala del regolatore,  $b_i$  è il bias e lo Start è il punto da cui si vuol far partire il set point remoto. Sostituendo si ottiene  $-200 + 200 = 0$  da cui;  $b_i = 0 - (-200)$  cioè  $b_i = 200$ . Il ratio invece, determina la massima escursione del set point remoto in corrispondenza del massimo segnale ricevuto. Per ricavare il parametro  $r_t$  è sufficiente svolgere la seguente

formula:  $r_t = \frac{E.D.}{A.S. \times 100}$  Sostituendo si ottiene

$r_t = \frac{200}{800 \times 100} = 25$ . Inserendo questi due parametri nel regolatore sopraccitato, si ottiene in corrispondenza di un segnale di 0-10V di ingresso remoto, una variazione del set point da 0 a 200.

## TIPI DI USCITE DI REGOLAZIONE

---

### Uscita P.I.D. continua

---

Un regolatore con uscita continua, è caratterizzato dal fatto che la sua azione regolante è continua nel tempo e la grandezza regolante  $Y$  può far assumere all'organo regolante, tutte le posizioni possibili comprese nel suo campo di escursione. Per definizione questo campo di escursione può variare in modo continuo tra 0% e 100%. I segnali elettrici che vengono solitamente usati dai regolatori per pilotare gli attuatori sono di due tipi:

- Segnale in tensione (0...10V)
- Segnale in corrente (4...20mA)

Il primo tipo è solitamente usato per connettere tra loro dei regolatori, registratori ed altra strumentazione elettronica mentre il secondo, è solitamente impiegato per pilotare gli attuatori in campo in quanto, un segnale in corrente è molto più robusto di uno in tensione ed inoltre offre un controllo intrinseco sulle connessioni elettriche realizzate verso gli stessi. Infatti il segnale in corrente non parte da 0mA ma da 4mA per cui una qualsiasi interruzione del circuito, porterebbe questa corrente a 0mA denunciando quindi una anomalia del circuito.

### Uscita P.I.D. discontinua

---

Quando si parla di un regolatore di tipo discontinuo, ci si riferisce ad un regolatore con uscita di tipo a relè (Contatto aperto o chiuso) o provvisto di uscita logica (0V o 24V) per il pilotaggio di contattori statici. Un regolatore di questo tipo è solitamente impiegato per controllare la temperatura, agendo sulle resistenze elettriche o accendendo e spegnendo dei bruciatori On/Off.

L'uscita di un regolatore discontinuo è caratterizzata dal fatto che possiede due soli stati possibili che sono:

- Y max (On)

- Y min (Off)

Ma come riesce un regolatore P.I.D. che ha due sole condizioni dell'uscita Y a mantenere la variabile X stabile sul valore di set point senza oscillazioni?

Semplice! Il regolatore in questione non parzializza la potenza applicata al processo ma ne modula l'energia. Molta confusione ruota intorno a questo punto. Per cercare di chiarire come funziona, prendiamo come esempio un regolatore con uscita a relè che pilota delle resistenze. Quando il relè chiude, nelle resistenze fluirà una corrente che dipenderà dalla tensione applicata e dal valore di resistenza (Legge di Ohm  $V = R \times I$ ) per cui la potenza (istantanea) applicata sarà sempre la medesima ( $W = V \times I = R \times I^2$ ) ogni qualvolta il contatto del relè si chiude.

Ma è la potenza istantanea che riscalda le resistenze? No! E' l'energia (potenza applicata per un tempo).  $Joule = W \times t$

Questo vuol dire che è sufficiente variare il tempo di inserzione delle resistenze per variare l'energia applicata. Tutti i regolatori provvisti di uscita discontinua, hanno un tempo di ciclo applicato all'uscita Y. Nei regolatori più complessi o a uP, viene data la possibilità di variare il duty cycle o tempo di ciclo. All'interno di questo tempo, l'algoritmo P.I.D. modulerà i tempi di accensione e spegnimento dell'uscita Y a relè.

Ad esempio, se fissiamo un tempo di ciclo di 60" e l'uscita si trova al 50%, significa che il relè sarà eccitato per 30" e diseccitato per i rimanenti 30" fornendo al processo il 50% dell'energia applicata.

Se l'uscita si dovesse portare al 10%, il relè rimarrebbe eccitato per 10" e diseccitato per i restanti 50" e così via per tutti i restanti valori.

## Uscita P.I.D. per servomotori

---

L'uscita "Modulante" è una versione particolare di uscita a relè in grado di comandare un servomotore elettrico. Questa uscita è normalmente composta da due relè interbloccati tra loro e pilotati singolarmente. Le tre posizioni possibili ottenute con questa connessione sono:

- 1) Apri
- 2) Stop
- 3) Chiudi

In questo modo è possibile far ruotare un motore elettrico avanti, indietro e fermarlo nella posizione desiderata. In pratica, l'albero motore tramite una serie di riduzioni meccaniche, muove l'otturatore di una valvola.

Per posizionare con accuratezza l'apertura della valvola, una volta venivano montati dei potenziometri che, grazie ad una serie di riduzioni meccaniche, erano in grado di fornire al regolatore l'esatta posizione della valvola dandogli così modo di trovare la giusta posizione. Questo sistema di posizionamento tramite retroazione potenziometrica, è risultato essere molto inaffidabile tanto da essere tralasciato perchè bastava un pò di polvere, sporco o la semplice usura del potenziometro o vibrazioni per dare al regolatore delle false informazioni di posizione dando origine a pendolamenti o a continui movimenti dell'attuatore.

I regolatori a  $\mu P$ , sono riusciti a risolvere questo problema. Infatti quasi tutti i tipi di regolatori per servomotori hanno un posizionamento di tipo flottante che consente di dare dei movimenti controllati senza tener conto della posizione della valvola. L'unica informazione necessaria al regolatore per fare ciò, sarà solo il tempo impiegato dall'attuatore per muoversi da 0% a 100%. Conoscendo tale tempo, si è in grado di muovere l'attuatore di una quantità voluta con estrema semplicità e precisione.

Ipotizziamo che il tempo di rotazione  $T_y$  sia di 60" e che l'algoritmo P.I.D. debba fornire una variazione del 10% all'uscita Y. Al regolatore non rimane altro che calcolare il 10% del tempo totale di rotazione e dare un comando equivalente al tempo calcolato; in questo caso 6 secondi. Dopo un comando di 6 secondi, la valvola si sarà sicuramente mossa del 10% (giochi meccanici a parte).

Ma è così importante conoscere la posizione della valvola per regolare? Decisamente no! Sarà solo l'algoritmo P.I.D. in base alla velocità e posizione della variabile X rispetto al set point W a determinare di quanto deve spostarsi la valvola a prescindere dalla sua posizione reale. Nei regolatori più evoluti, viene comunque data la possibilità di conoscere la posizione reale della valvola in quanto sono solitamente provvisti di un ingresso per potenziometro di visualizzazione di posizione.

In questo tipo di regolatori vi è un'altro parametro importante solitamente chiamato DY (zona morta). Questo parametro ha lo scopo di definire quale deve essere l'impulso minimo da applicare al servomotore. Infatti sino a che la Y fornita dall'algoritmo P.I.D. non supera la quantità descritta in questo parametro, l'uscita non varia.

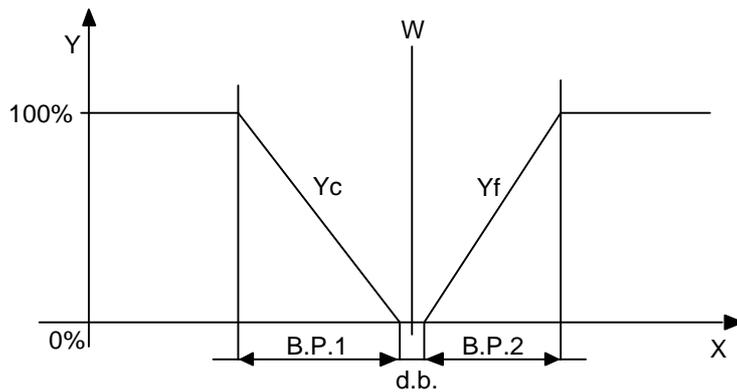
## **Uscita P.I.D. tipo Caldo / Freddo**

---

E' un particolare tipo di regolazione in cui vi è una sola variabile X da controllare e due variabili manipolate Y contrapposte tra loro ma che entrambe agiscono sullo stesso processo.

Esistono molti processi che durante la fase di avviamento, abbisognano di un apporto di calore ma successivamente, durante la marcia a regime, erogano a loro volta calore (processi esotermici) richiedendo quindi di una azione refrigerante. Per soddisfare questa esigenza, sono stati realizzati i regolatori così detti Caldo/Freddo forniti di una doppia uscita.

Quando la variabile X è inferiore al set point W, il processo viene regolato dall'uscita riscaldante mentre se la variabile X supera il set point W, il processo viene regolato dall'uscita refrigerante. E' da notare che quando una delle due uscite è attiva, l'altra è inattiva o ferma al suo valore minimo e viceversa come si vede dal disegno di fig. 21.



Sino ad ora siamo stati abituati a vedere una sola B.P. centrata sul valore di set point. In questo regolatore esistono invece due bande proporzionali totalmente indipendenti che si posizionano una sotto al valore di set point  $W$  e una sopra (B.P.1 e B.P.2). Le due bande proporzionali risultano divise da una zona morta (dead band) e agiscono su di una propria uscita.

Nella maggioranza dei casi, non è possibile sovrapporre le due caratteristiche in quanto significherebbe riscaldare e raffreddare contemporaneamente dando origine ad una forte perdita energetica. Esistono però dei regolatori in grado di sovrapporre le due caratteristiche tramite un parametro che si chiama appunto di overlap (sovrapporre).

Questo tipo di regolatore viene normalmente impiegato per regolare la temperatura di estrusori plastici o di camere climatiche o reattori chimici e in tutti quei casi dove si deve controllare la variabile  $X$  tramite due azioni contrapposte e distinte.

## CARATTERISTICHE DINAMICHE E CRITERI DI MESSA A PUNTO DEI REGOLATORI P.I.D.

### Come stabilire la criticità di un processo

La criticità di un processo, ovvero la possibilità di regolarlo con ottimi risultati senza tanti problemi, può essere facilmente determinata individuando i due tipici parametri del processo che sono:

- $T_o$  (tempo morto)
- $T$  (costante di tempo del processo)

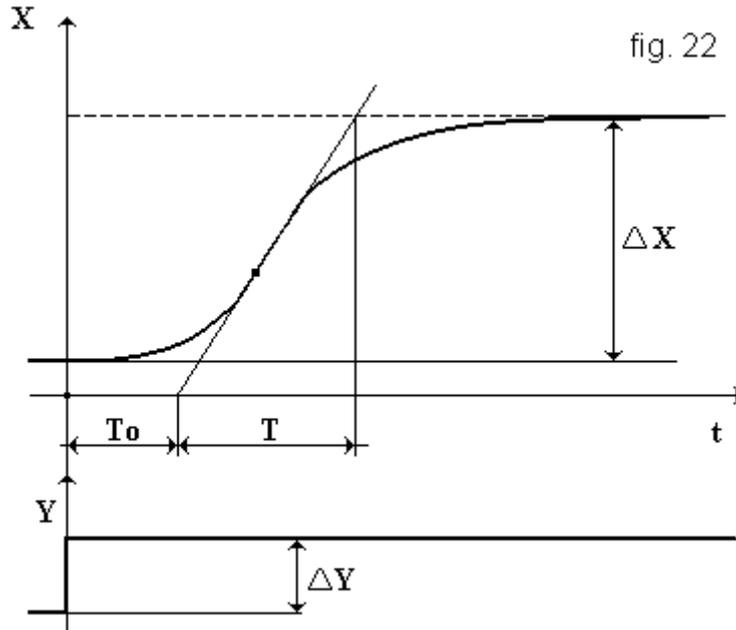
Su di un impianto in funzione, questi due parametri possono essere ricavati nel modo seguente:

- 1) Portare l'impianto a regime.
- 2) Portare il regolatore in funzionamento in manuale (Se il regolatore fosse sprovvisto della azione bumpless, riportare il valore dell'uscita "Y" al valore che aveva durante il funzionamento in automatico).
- 3) Attendere che il sistema si stabilizzi.
- 4) Imporre una variazione a gradino della variabile manipolata "Y" (Variazione compresa tra il 5% e il 10%).
- 5) Registrare l'andamento della variabile controllata "X".

- 6) La procedura è terminata e si può riportare tutto il sistema in funzionamento automatico (Se lo si desidera).

Sicuramente la variabile controllata "X", fornirà un'andamento come quello riportato nella figura 22 sottostante.

Fig. 22. Risposta del processo ad anello aperto.



Si potrà quindi tracciare la tangente al punto di flesso della curva per ricavare i due tempi  $T_0$  e  $T$ . Il valore del loro rapporto definisce la criticità del processo.

$$\frac{T_0}{T} \leq 0,10 \text{ definisce un processo non critico.}$$

$$\frac{T_0}{T} \cong 0,16 \text{ definisce un processo di mediocre criticità.}$$

$$\frac{T_0}{T} \geq 0,33 \text{ definisce un processo decisamente critico.}$$

Se il processo ha dunque un rapporto  $\frac{T_0}{T}$  favorevole, il regolatore può assicurare una soddisfacente qualità di regolazione anche in presenza di forti prese di carico. Se invece il rapporto di criticità è sfavorevole, tutte le prestazioni dell'anello di regolazione possono risultare insoddisfacenti sino ad arrivare ad una situazione di completa impossibilità di regolazione. In questi casi è opportuno diminuire questo rapporto modificando il processo stesso; ad esempio introducendo circuiti ausiliari (Regolazioni in cascata, sistemi con feed forward etc.) o scegliendo dei sensori con risposte più rapide in modo da diminuire l'inerzia dello stesso o trovando una posizione più idonea allo scopo.

## Sintonizzazione di un regolatore P.I.D.

---

La sintonizzazione di un regolatore consiste nella scelta e nella assegnazione del valore dei suoi parametri, in modo da adeguare il comportamento del sistema controllato ai requisiti tecnici del processo ed ai vincoli dell'impianto.

E' facile rendersi conto che si possono presentare infiniti tipi di processi, uno diverso dall'altro, caratterizzati da leggi generalmente non lineari e variabili nel tempo.

A questo scopo prenderemo in esame un processo semplificato al primo ordine caratterizzato da tre fattori fondamentali che sono:

**K** (guadagno del processo)

**To** (tempo morto del processo)

**T** (costante di tempo del processo)

Esistono diversi metodi più o meno complessi per ricavare i parametri ottimali di regolazione. Il più semplice di tutti è quello di conoscere i tre dati sopra enunciati perchè si possono applicare le seguenti regole:

$$Pb = \frac{K \times To}{T} \times 100$$

$$Ti = To \times 2$$

$$Td = Ti \div 5$$

dove:

**Pb** è la banda proporzionale espressa in %

**Ti** è il tempo integrale

**Td** è il tempo derivativo

Solitamente però, questa terna non la si conosce e si presenta così il problema della sua determinazione. La sintonizzazione può essere effettuata sostanzialmente in due modi: A) ad anello aperto, B) ad anello chiuso.

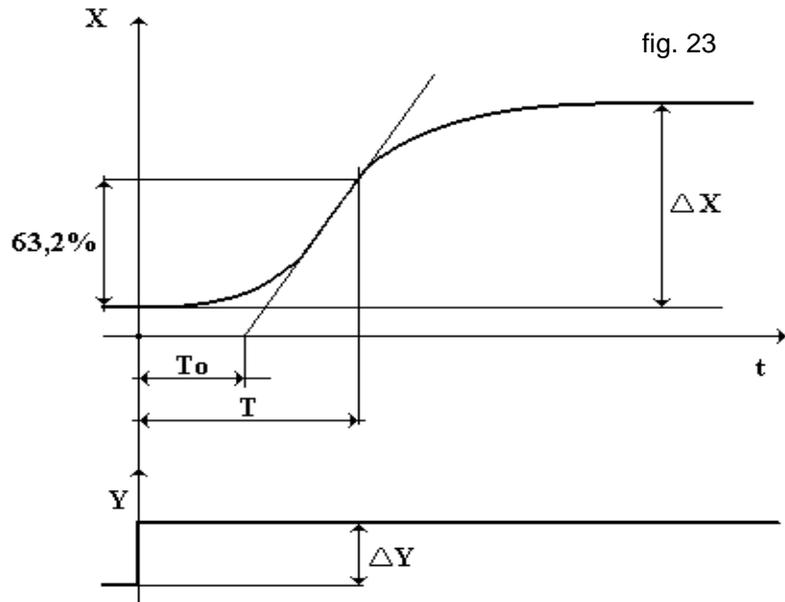
**A)** Si osserva la risposta della variabile controllata "X" ad una sollecitazione della variabile manipolata "Y". Il guadagno del processo è facilmente ricavabile tramite la formula  $K = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$  dove

$\Delta X$  è l'incremento della variabile controllata "X" a transitorio ultimato in % mentre  $\Delta Y$  in % è la variazione della variabile manipolata che ha causato il  $\Delta X$ .

**To** è facilmente misurabile in quanto basta tracciare la tangente alla curva dal punto in cui è più ripida all'asse del tempo. La distanza tra il punto d'origine e il punto di intersecamento della tangente, è il tempo morto. (vedi fig. 23)

**T** è il tempo impiegato dalla variabile controllata "X" per raggiungere il 63,2% di  $\Delta X$ .

Fig. 23. Risposta del processo ad anello aperto.



**B)** Si osserva il comportamento ad anello chiuso della variabile controllata "X" con il regolatore predisposto in automatico e con la sola azione proporzionale inserita. Partendo da un valore di  $P_b=100$ , si continui a restringere o allargare la banda proporzionale sino a trovare quel valore per cui il sistema entri in risonanza (la risonanza è una oscillazione con frequenza e ampiezza costante nel tempo).

Si misuri il tempo del periodo di tali oscillazioni e lo si annoti come  $T_c$ .

A questo punto saranno noti il periodo delle oscillazioni del sistema  $T_c$  e il valore di banda proporzionale ( $P_{bc}$ ) per cui il sistema entra in risonanza. Seguendo i semplici enunciati di **Ziegler** e **Nichols** per ottenere una attenuazione delle oscillazioni a "Quarter Decay ratio" (Smorzamento tale da ridurre l'ampiezza di ogni oscillazione al 25% di quella precedente), si potranno scrivere queste semplici regole:

Tipo di algoritmo	Azione P	Azione I	Azione D
<b>P</b>	$P_{bc} \times 2$	*	*
<b>P + I</b>	$P_{bc} \times 2,2$	$T_c \div 1,2$	*
<b>P + I + D</b>	$P_{bc} \times 1,6$	$T_c \div 2$	$T_c \div 8$

Sebbene questo metodo dia degli ottimi risultati di stabilità, in fase di andata a regime provoca un primo overshoot molto ampio e a volte inaccettabile.

Cercando di migliorare la sintonizzazione, di recente (1990) sono state messe a punto delle regole che si affiancano a quelle precedentemente esposte e sono note con il nome di "**Bhaly**".

Il metodo di Bhaly come per il metodo di Ziegler e Nichols, prescrive di portare in oscillazione il sistema e di annotarsi il tempo del periodo di oscillazione  $T_c$ .

Si calcoli il guadagno del regolatore con la formula:  $G = \frac{100}{P_b}$ .

Coscendo il tempo di ciclo delle oscillazioni e il guadagno del regolatore, si possono applicare le regole di Bhaly che sono:

Tipo di algoritmo	Azione P	Azione I	Azione D
P	$200 \div G$	*	*
P + I	$220 \div G$	$T_c \div 1,2$	*
P + I + D	$170 \div G$	$T_c \div 2$	$T_c \div 7,8$

## Tipici valori dei parametri P.I.D. per i processi piu' comuni

---

Anche se non si può definire a priori i valori dei parametri P.I.D. conoscendo solo il tipo di processo su cui è applicato il regolatore, è possibile in modo molto approssimato dare un campo di appartenenza agli stessi. Tutto ciò non è dettato da rigide formule matematiche ma solo da una notevole esperienza in merito. Nella seguente tabella sono considerati i più comuni processi industriali e il normale campo di appartenenza degli stessi. Ovviamente questi parametri non sono da ritenere ottimali per una buona regolazione ma sono da considerare come un valido punto di partenza.

Caratteristica	Portata e pressione di liquidi	Pressione di gas	Livello di un liquido	Temperatura
Tempo morto	Trascurabile	Trascurabile	Trascurabile	Variabile
Costanti di tempo	Multiple	Singola	Singola	Multiple
Tempo critico oscillazione persistente	1 ... 30 sec.	1 ... 10 sec.	min. ... ore	min. ... ore
Presenza rumori	Sempre	Talvolta	Mai	Mai
Azione B.P.	100 ... 500	1 ... 20	5 ... 100	1 ... 50
Azione T.i.	Essenziale	Non necessaria	Talvolta	Si
Azione T.d.	Sconsigliata	Non necessaria	Sconsigliata	Essenziale

L'azione integrale è necessaria qualora sia richiesta una elevata precisione a regime.

L'azione derivativa è consigliata in quei processi che sono per loro natura lenti, in modo da aumentare la prontezza della regolazione. E' sconsigliata nei processi in cui vi è presenza di rumori, poichè diventerebbe praticamente un amplificatore di quest'ultimi.

## CIRCUITI TIPICI DI REGOLAZIONE

---

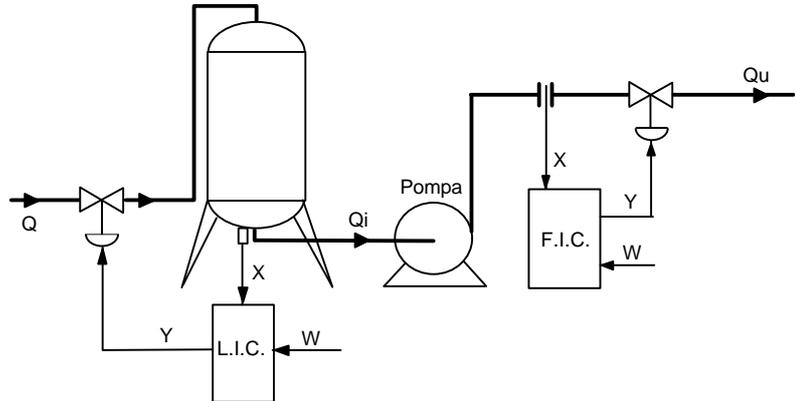
### Regolazione di portata

---

La portata di un fluido dipende dalla differenza di pressione disponibile fra gli estremi della tubazione e dalla resistenza fornita dal circuito. La portata può quindi essere modificata variando la pressione fra gli estremi (Agendo sul numero di giri della pompa) o variando la resistenza del circuito mediante l'intervento di valvole. Il sistema comunemente usato è il secondo anche perchè è più economico rispetto al precedente. I regolatori più comunemente usati per regolarli sono di tipo P.I.

perchè questi processi sono molto rapidi e hanno un tempo morto praticamente trascurabile.

Fig. 24. Esempio di circuito per la regolazione di portata.



Le valvole normalmente impiegate per questo tipo di applicazione, hanno un motore di tipo pneumatico per cui il segnale del regolatore dovrà necessariamente essere convertito in un segnale di pressione tramite un convertitore elettro/pneumatico. Si intuisce quindi che i regolatori normalmente impiegati per questo tipo di applicazione, hanno una uscita di tipo continua.

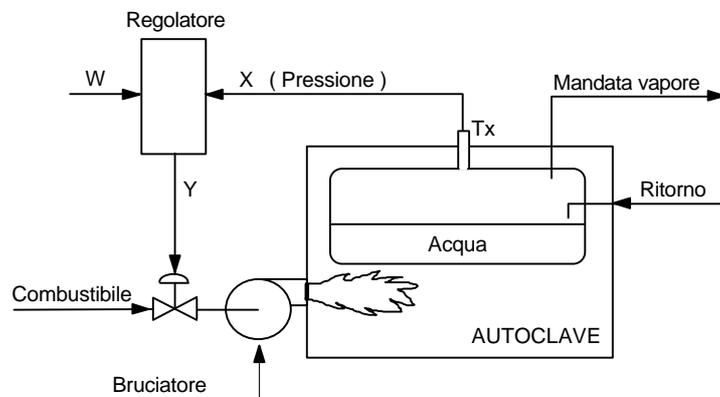
## Regolazione di pressione

La pressione di un fluido può avere una diversa natura a seconda che questa la si generi all'interno di un recipiente chiuso (autoclave, caldaie), oppure in un serbatoio dove si verificano scambi di fluidi con l'esterno (Reattori chimici).

Nel primo caso la pressione viene regolata controllando la temperatura del fluido (solitamente si tratta di vapore) all'interno dell'autoclave o della caldaia.

Nel secondo caso la pressione viene regolata controllando le portate in entrata o in uscita dal reattore.

Fig. 25. Esempio di circuito per la regolazione di pressione



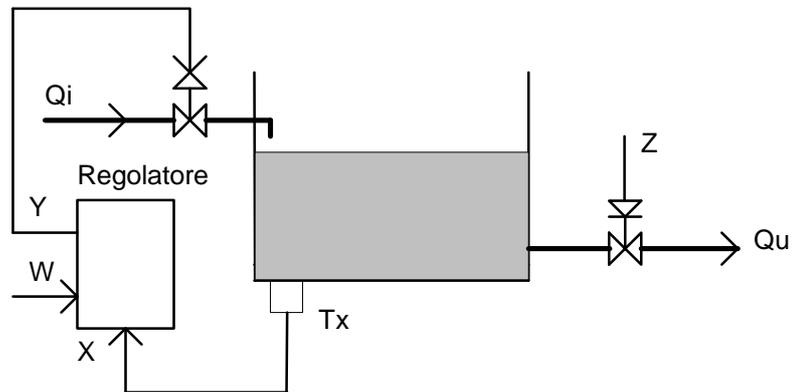
Se si tratta di liquidi (Generalmente i liquidi sono incompressibili) la velocità di propagazione della pressione è molto alta (circa 1500 mt/sec). Per gas e vapori, tale velocità si abbassa a circa 300 mt/sec anche a causa della loro compressibilità.

comprimibilità. Questo può dar luogo a tempi morti di qualche secondo, se le tubazioni sono di notevole estensione, portando il fattore di criticità a dei valori elevati. Anche in questo tipo di controllo, i regolatori più comunemente usati sono di tipo P.I. con uscita continua o P.I.D. con uscita "modulante".

## Regolazione di livello

Il processo è generalmente costituito da un serbatoio munito di una tubazione di adduzione e di una tubazione di scarico. Se la grandezza perturbatrice è la portata in entrata, l'organo regolante viene posto sulla tubazione d'uscita mentre se le perturbazioni sono causate dalla portata in uscita, l'organo regolante viene posto sulla tubazione di adduzione. Il processo in questione presenta un certo grado di autoequilibrio in quanto la portata in uscita tende ad aumentare all'aumentare del livello nel

Fig. 26. Esempio di circuito per la regolazione di livello



serbatoio in concomitanza dell'aumento della portata in ingresso.

Un regolatore solo P. può essere sufficiente allo scopo ma se si vuole ottenere una maggiore precisione l'azione integrale è indispensabile.

A volte per maggiore semplicità di esecuzione impiantistica e di risparmio, le regolazioni adottate sono di tipo On/Off con una soglia minima ed una massima.

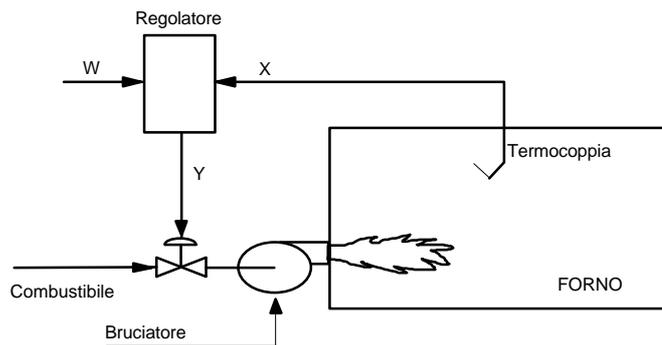
### Simboli utilizzati nello schema di fig.26

<b>X</b>	= livello serbatoio	(Grandezza regolata)
<b>Y</b>	= Spostamento stelo valvola	(Grandezza regolante)
<b>W</b>	= Livello voluto	(Set point)
<b>Z</b>	= Disturbo	(Portata in uscita)
<b>Q</b>	= Portata	

## Regolazione della temperatura

La temperatura è una delle variabili più controllata nei processi industriali. Solitamente un processo termico è autoequilibrante ed ha una risposta di secondo ordine con le costanti di tempo molto lunghe. La giusta scelta del punto di misura e il tipo di sensore adottato rivestono un ruolo importantissimo nella catena di regolazione. Solitamente un processo termico non è molto critico da regolare ed un semplice regolatore P.D. può bastare allo scopo. Se si desidera una maggiore precisione di regolazione, diventa necessario introdurre l'azione integrale.

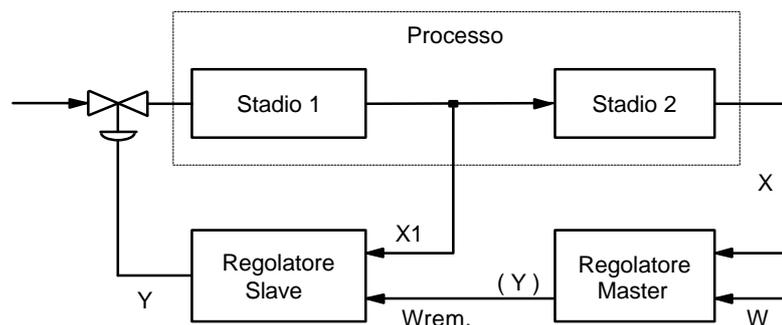
Fig. 27. Esempio di circuito per la regolazione della temperatura



Normalmente si impiegano regolatori P.I.D. con uscita "modulante" per pilotare direttamente le valvole dei bruciatori con servomotore elettrico mentre si impiegano delle uscite discontinue, quando l'elemento o gli elementi da controllare sono delle resistenze o altri attuatori simili.

## Regolazione in cascata

Fig. 28. Schema a blocchi di un circuito di tipo a cascata.



E' una particolare forma di regolazione caratterizzata da una grandezza regolata ausiliaria e una principale. Il circuito prevede dunque due regolatori, uno principale (Master) ed uno ausiliario (Slave). Una realizzazione di questo tipo è utile in tutti quei casi dove il tempo morto del processo  $T_0$  è notevole nei confronti della costante di tempo  $T$  e quindi si avrebbe un fattore di criticità notevolmente elevato tanto da non permettere la semplice regolazione P.I.D. La regolazione a cascata, risolve questo problema.

Infatti il regolatore slave si preoccupa di intercettare le grandezze perturbatrici all'ingresso del processo senza farle ulteriormente propagare agli stadi successivi. (Vedi figura 28)

Il regolatore master è posto all'uscita del processo, riceve il valore della grandezza regolata X ed interviene con la sua grandezza manipolata Y sul set point remoto dello slave.

In generale il regolatore slave può essere solo ad azione P. o P.D. mentre il Master deve essere necessariamente ad azione P.I. per eliminare gli scostamenti residui.

## Regolazione di rapporto

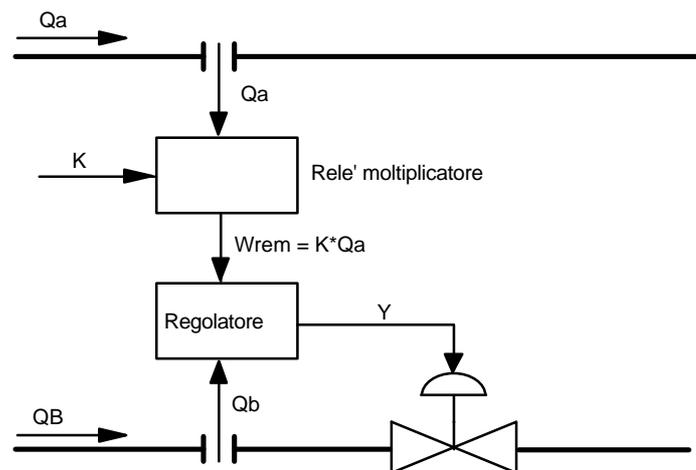
Il regolatore di rapporto interviene sulla portata secondaria in modo da mantenerla in un rapporto costante con la portata di riferimento.

Il regolatore al variare di  $Q_a$ , interviene regolando  $Q_b$  in modo che sia verificata la seguente relazione:  $Q_b = K \times Q_a$  da

$$\text{cui } \frac{Q_b}{Q_a} = K.$$

- $Q_a$  = Portata di riferimento
- $Q_b$  = Portata secondaria
- $K$  = Fattore di rapporto

Fig. 29. Esempio di una regolazione di rapporto.



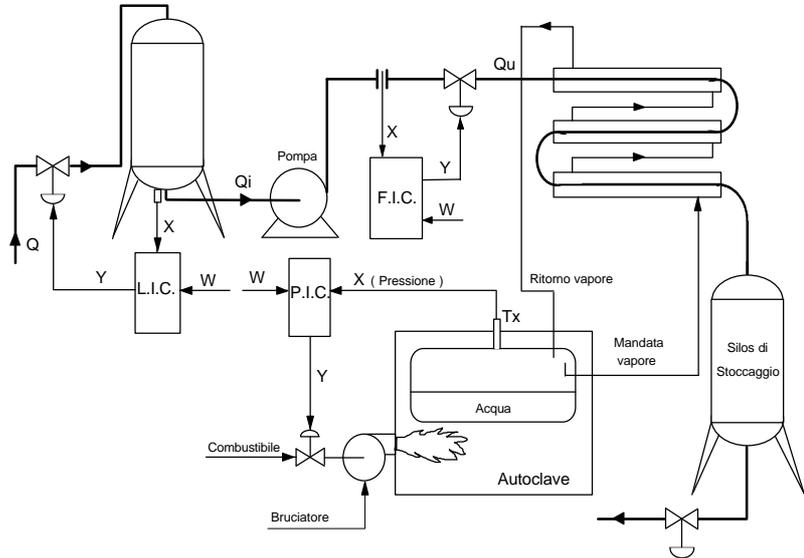
Questo tipo di regolazione è normalmente applicato ai seguenti processi:

- Processi chimici
- Processi alimentari
- Miscelazione di fluidi
- Rapporto aria / combustibili per bruciatori.

I regolatori impiegati hanno comunemente una uscita di tipo continua.

## Esempio di regolazione complessa

Fig. 30. Ipotesico impianto per la produzione di puree alimentari.



Ecco rappresentato un tipico esempio di regolazione per produzione di puree alimentari. Simboli utilizzati:

L.I.C. = Level indicator controller (Regolatore di livello con indicatore)	
F.I.C. = Flow indicator controller (Regolatore di portata con indicatore)	
P.I.C. = Pressure indicator controller (Regolatore di pressione con indicatore)	
T.X. = Variable transmitter (Trasmittitore linearizzato)	

## CENNI SULLA REGOLAZIONE FUZZY LOGIC

Negli ultimi anni la logica Fuzzy ha attirato su di sé sempre maggiore interesse polarizzando l'attenzione anche delle case costruttrici di regolatori. Ma che cosa è questa logica Fuzzy?

Il termine letteralmente tradotto dall'inglese significa:

- non bene definito
- dai contorni sfuocati
- indefinito

Ma come può una logica Fuzzy sostituire un algoritmo P.I.D. che invece per le sue caratteristiche è matematicamente preciso? Semplice! I calcoli matematici sono eseguiti sempre con la massima precisione possibile mentre è il concetto stesso di logica che viene stravolto rendendo questo tipo di algoritmo più vicino al modo di pensare tipicamente umano.

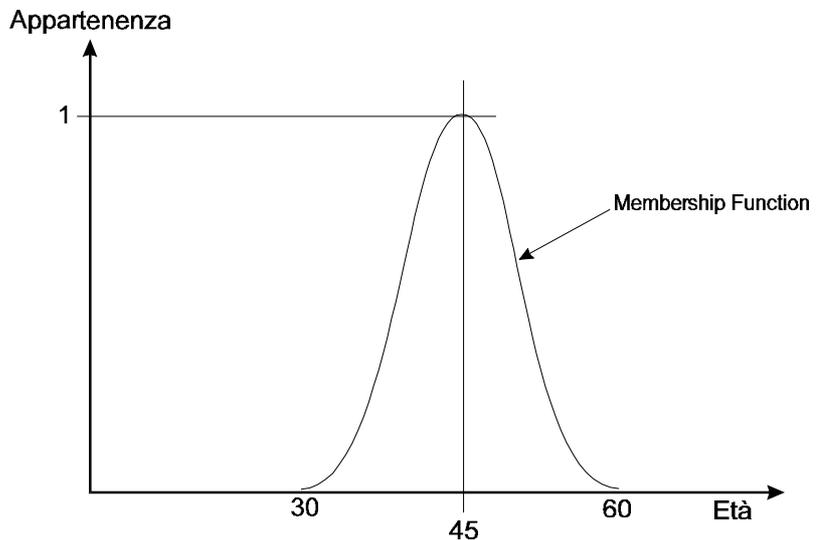
Pensiamo per un attimo alla rigida logica binaria adottata da tutti computer tradizionali. Questa logica non consente di manipolare agevolmente dei dati rappresentanti idee soggettive e quindi rende difficile la gestione di concetti quali:

- un oggetto tiepido

- una persona attraente
- un colore quasi nero

La logica fuzzy è stata quindi concepita per permettere alle macchine di interpretare dei concetti che con la sola logica binaria non si riuscirebbe a rappresentare rendendo il lavoro delle macchine più simile a quello umano e quindi più semplice e intuibile.

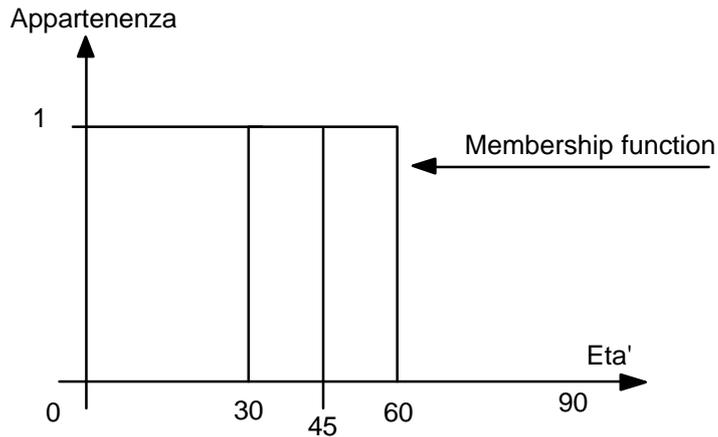
Fig. 31. Rappresentazione di una membership function generica.



Le prime teorie sulla logica fuzzy furono ideate da il prof. Lofti A. Zadeh docente presso l'università di Berkeley in California nel 1965. Il professore Zadeh introdusse il concetto di "insiemi di tipo fuzzy" per definire in modo analitico il concetto di "sfumato". Per cercare di chiarire il concetto di "Insiemi fuzzy", prendiamo come riferimento il canonico esempio dell'uomo di mezza età. Supponiamo per un momento che l'età media di un uomo sia di 45 anni. Tuttavia non possiamo dire con altrettanta sicurezza che chi ha 30 o 60 anni non appartenga assolutamente alla categoria delle persone di mezza età. Ci si accorge quindi che il concetto di uomo di mezza età assume un diverso peso all'interno dei suoi confini. Questo è rappresentato dalla figura chiamata anche "Membership function" il cui valore può variare tra zero e uno in modo continuo consentendo di quantizzare un'idea astratta.

La logica binaria rappresenterebbe l'insieme delle persone di mezza età come l'insieme di tutti gli esseri umani con età compresa tra i 30 e i 60 anni, così come risulta da figura. Secondo tale grafico le persone di 29 e di 61 anni non appartengono più all'insieme delle persone di mezza età.

Fig. 32. Rappresentazione di una membership function in logica binaria.



## Il controllo Fuzzy

Il controllo fuzzy come abbiamo visto, non usa delle rigide formule matematiche ma delle regole logiche. Queste regole sono dette "Inferenze". Le inferenze sono la formalizzazione di esperienze e competenze. Le inferenze fuzzy sono dunque applicabili solo se si ha una buona conoscenza del problema.

Esaminiamo ora di voler controllare la frenata di un treno per mantenerlo a distanza costante da uno precedente.

La nostra conoscenza si tramuta in regole:

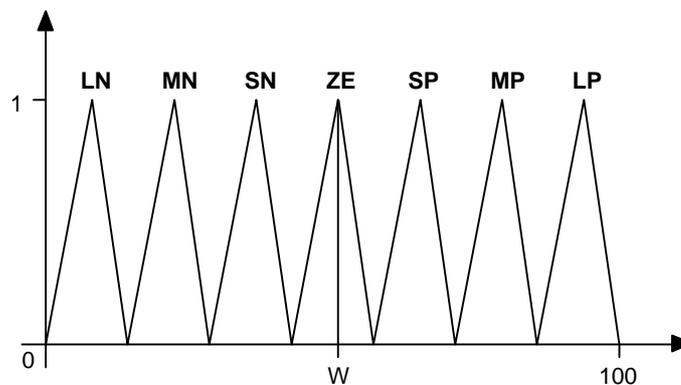
- 1) Se la distanza tra i due treni è Piccola e la velocità del treno è Media, allora la frenata sarà Brusca.
- 2) Se la distanza tra i due treni è Media e la velocità del treno è Bassa, allora la frenata sarà Lieve.
- 3) Se.....

sino a completare tutti i casi possibili.

Il controllore fuzzy in base a questa conoscenza, darà un certo grado di appartenenza alle membership function. Una volta stabilito il grado di appartenenza, determinato dalle regole precedenti, si esegue la "Defuzzyficazione" che è semplicemente una riconversione dei concetti applicati, in numeri.

Le membership function sono solitamente 7 e di forma triangolare. ma il numero e la forma possono variare a seconda del campo di impiego. Le etichette che identificano le membership function sono:

Fig. 33. Rappresentazione di un insieme di membership functions.



- LN (large negative)
- MN (medium negative)
- SN (small negative)

- **Z** (about zero)
- **SP** (Small positive)
- **MP** (medium positive)
- **LP** (large positive)

Questi concetti applicati ad un regolatore permettono di ottenere il massimo possibile da una regolazione. Infatti una regolazione fuzzy è virtualmente priva di overshoot e underrange ed è ottima anche per processi con notevoli variazioni di carico o

Ecco alcune tipiche regole Fuzzy:

**A) If devP LN and devX SP then LY**

**B) If devP SP and devX SN then ZY**

Si definisce con devP l'errore tra set point "W" e misura "X" e con devX la velocità con cui si sposta la variabile controllata "X".

A questo punto si possono comprendere le regole fuzzy sopra enunciate:

**A)** Se la variabile si trova molto al di sotto del set point e la sua velocità di avvicinamento è molto piccola, allora incrementa di molto l'uscita.

**B)** Se la variabile si trova leggermente sopra al set point e la sua velocità di avvicinamento è molto piccola allora non muovere l'uscita.

Continuando con "n" regole di questo tipo, si fornisce al regolatore una "conoscenza" del processo che deve regolare. Si capisce a questo punto che la risposta del regolatore fuzzy è molto simile a quella che farebbe uno strumentista di fronte allo stesso problema perchè la "conoscenza" acquisita, è stata appunto fornita da una persona che per così dire, lo ha "addestrato" a comportarsi in un certo modo.

La natura del regolatore P.I.D., non permette tutto questo perchè le sue reazioni sono dettate da rigide leggi matematiche e non da "conoscenza" ed è questa la grossa differenza tra i due sistemi.