



Università degli Studi di Genova
Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale



Corso di Laurea in Chimica e Tecnologie Chimiche

FONDAMENTI DI TECNOLOGIE CHIMICHE PER L'INDUSTRIA E PER L'AMBIENTE
(modulo II)

CONTROLLO AUTOMATICO DI UN IMPIANTO

Aldo Bottino
e-mail : bottino@chimica.unige.it
Tel. : 010 3538724 - 3538719

Controllo automatico degli impianti chimici

L'operazione di *controllo* delle variabili operative in un processo chimico consta delle fasi di *misura e di regolazione*.

La *misura* consiste nella rilevazione delle variabili mediante opportuni strumenti capaci di fare corrispondere ad ognuna di esse un valore che deve essere *letto* dall'operatore (*strumenti indicatori*) oppure *registrato* (*strumenti registratori*).

La *regolazione* consiste nell'intervento manuale o automatico al fine di mantenere la variabile sotto controllo al valore desiderato.

Circuito di regolazione automatica

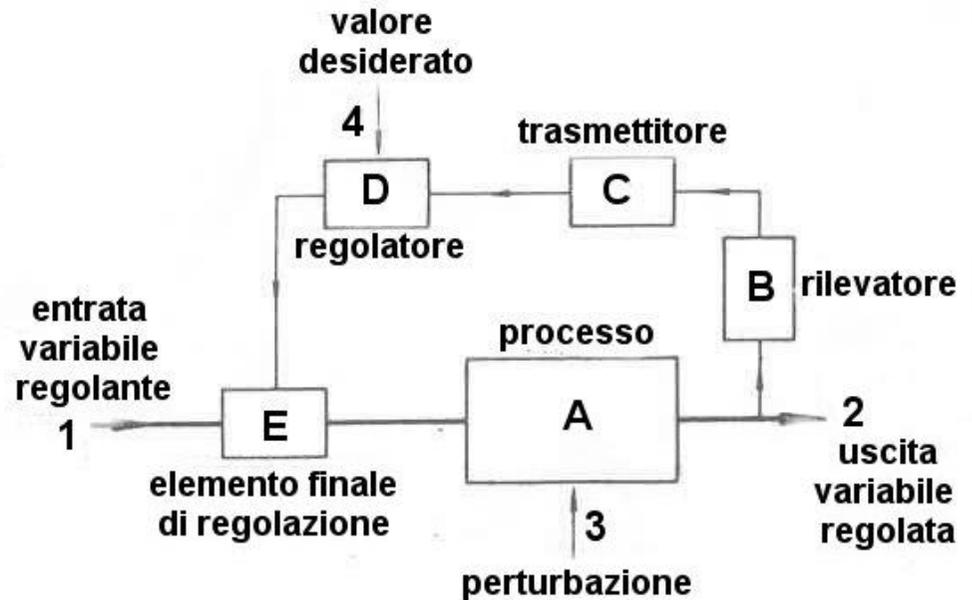
Un circuito di regolazione automatica di un dato processo è schematizzato nella Figura.

Il *processo* (A) è quella parte dell'impianto che compie una operazione oppure una serie di operazioni in modo da ottenere un certo risultato finale desiderato.

Può essere ad esempio un forno di cui si vuole controllare la temperatura oppure una tubazione dove si vuole controllare la portata.

La temperatura e la portata costituiscono in questo caso la *variabile da controllare* (*variabile controllata* o *variabile regolata*).

Le cause che tendono a modificare questa variabile sono dette *perturbazioni*.

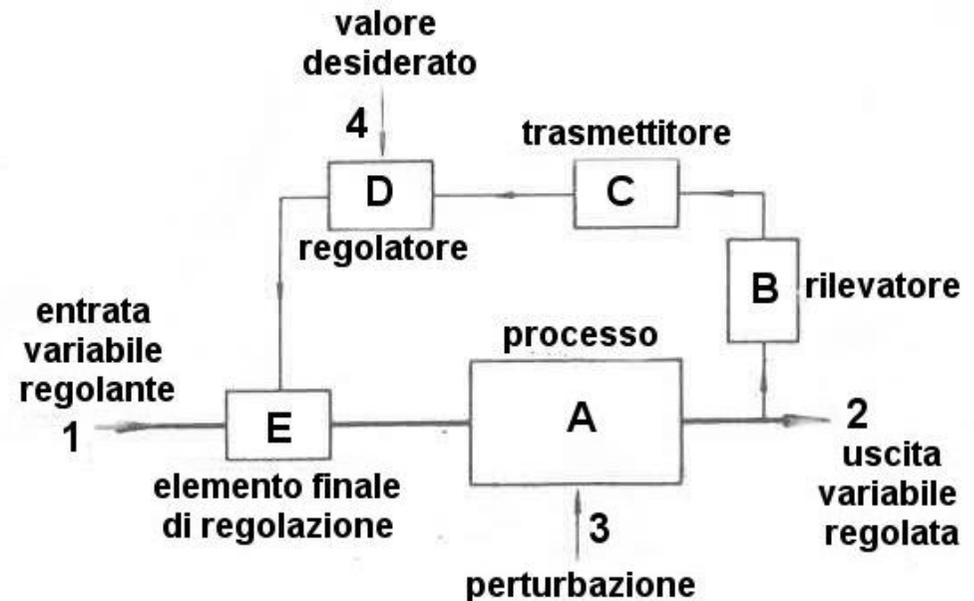


Lo *strumento di rilevazione* (B) è l'elemento del circuito sensibile alla variabile controllata e costituisce l'elemento sensitivo del *trasmettitore* (C).

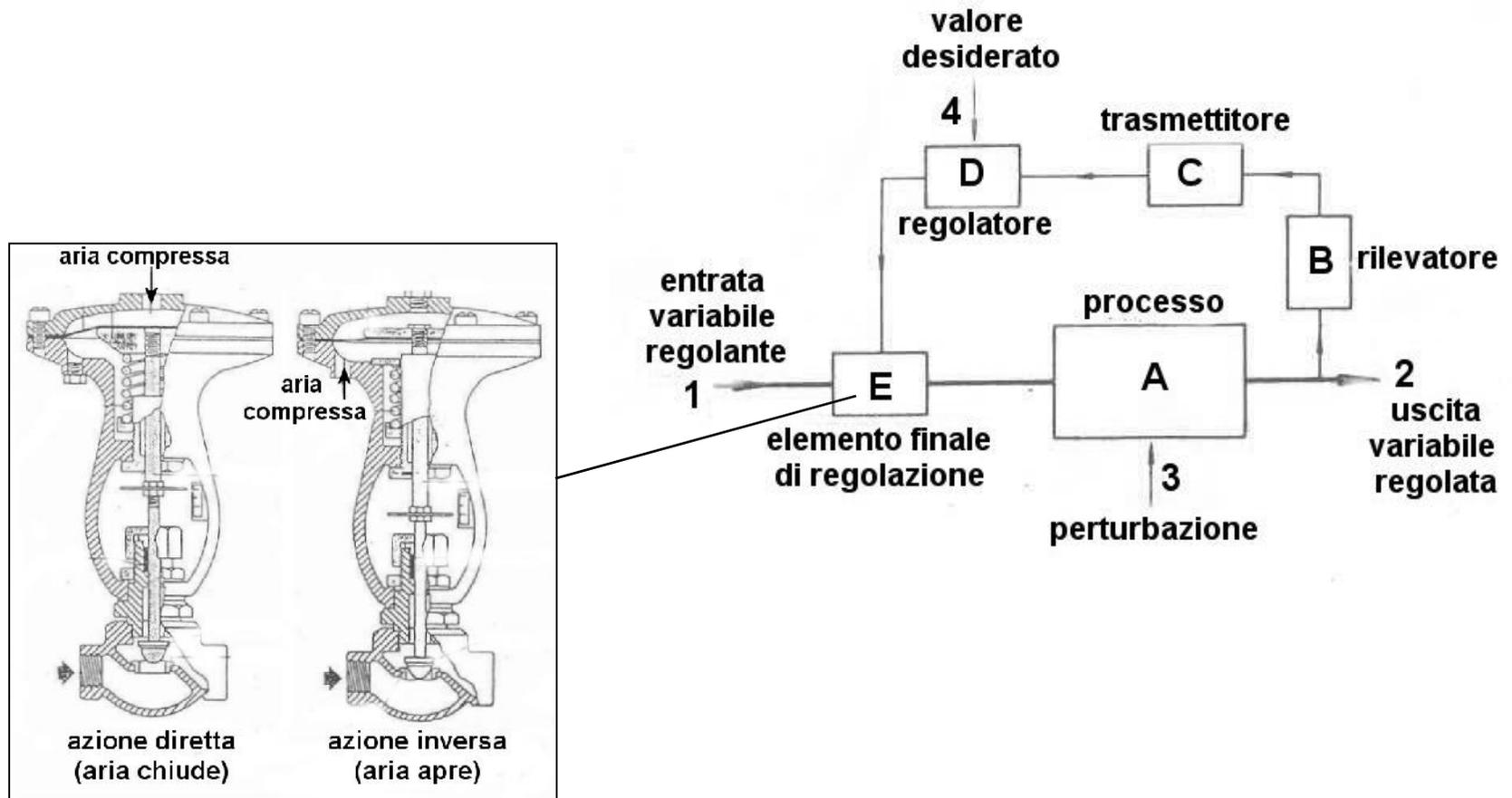
Il *trasmettitore* è il dispositivo che traduce la variabile del processo in un segnale elettrico o pneumatico ad essa equivalente che poi invia al *regolatore o controllore* (D).

Il *regolatore* confronta istante per istante il valore della variabile che gli viene comunicato con il valore desiderato o prefissato manualmente dall'operatore (*punto di regolazione o set-point*).

Qualora non si verifichi l'uguaglianza tra valore desiderato e valore prefissato il regolatore interviene inviando un segnale di comando all'*elemento finale di regolazione* (E).



L'elemento finale di regolazione (E) è una valvola servocomandata che agisce sul processo o su una *variabile regolante o manipolata* in modo da eliminare la deviazione della variabile regolata dal set-point.(C).



Trasmissione dei segnali e dei comandi nella regolazione pneumatica

Nella generalità dei casi il *trasmettitore* è installato nelle *immediate vicinanze* del processo mentre il *regolatore* o *controllore*, che dispone anche di una parte indicatrice e registratrice della variabile regolata, viene installato su un *quadro* che può essere posto anche a *notevole distanza* dal processo.

Sorge allora il problema della *trasmissione a distanza* dei segnali e dei comandi non solo tra trasmettitore e regolatore ma anche tra i vari altri componenti del circuito di regolazione.

Per questa trasmissione si usa un sistema *pneumatico* oppure *elettrico*.

Nei *sistemi pneumatici* la trasmissione dei segnali e dei comandi tra i vari componenti del circuito di regolazione avviene mediante collegamenti costituiti da tubicini di rame o di materie plastiche dove circola *dell'aria compressa*.

Nei *sistemi elettrici* la trasmissione avviene per mezzo di normali *cavi conduttori*.

Regolazione elettrica

La *regolazione elettrica* risponde appieno alle esigenze di centralizzazione in quanto consente di tenere sotto controllo quelle parti del processo che sono anche a *notevole distanza* dal pannello di controllo.

Essa inoltre offre il vantaggio di una trasmissione molto *rapida*.

Tuttavia per i *pericoli di incendi ed esplosioni* che essa comporta (dovuti a scintille) la regolazione elettrica può essere usata solo nei processi in cui tale pericolo non sussiste.

Regolazione pneumatica

La *regolazione pneumatica* risponde sia alle esigenze di centralizzazione che a quelle di sicurezza.

Tuttavia con questo sistema si possono controllare solo quelle parti del processo che distano meno di 150 metri dal pannello di controllo.

Nei sistemi di regolazione pneumatica, qualunque sia la natura della variabile regolata (pressione, temperatura, portata, etc.) il suo valore viene tradotto (dal trasmettitore) in una pressione di aria modulata variabile da 3 a 15 psi a seconda del valore assunto da questa variabile.

Anche il regolatore dà in uscita una pressione di aria modulata, che agisce sulla valvola pneumatica di regolazione, anch'essa variabile tra 3 e 15 psi a seconda dello scostamento esistente tra il valore desiderato e quello assunto dalla variabile regolata.

Così come la *pressione di entrata* al regolatore rappresenta la *variabile regolata*, quella di *uscita* è la *variabile regolante* o *variabile manipolata*.

Ritardi nella regolazione automatica

In un processo sotto controllo automatico, le eventuali deviazioni della variabile vengono contenute entro limiti modesti e successivamente annullate in un tempo più o meno lungo.

Questo tempo dipende principalmente dal *ritardo*, dovuto a varie cause, con cui il circuito di controllo sviluppa e concretizza la propria azione e dal tipo di controllo adottato.

Il ritardo tra l'insorgere della perturbazione e l'intervento correttivo della valvola può essere assimilato ad uno spostamento di fase tra due avvenimenti.

Cioè se nel processo o nell'impianto si verifica un ritardo tra l'istante in cui inizia la perturbazione e l'istante in cui la valvola comincia ad intervenire, la deviazione della variabile dal set-point avrà tutto il tempo di assumere valori tanto più ampi tanto più grande sarà questo ritardo, prima di venire corretta ed annullata dalla susseguente azione correttiva della valvola.

In pratica il controllo automatico *non è mai privo* di ritardi.

Essi possono essere dovuti a cause inerenti al particolare tipo di installazione e configurazione dell'impianto oppure possono insorgere a causa del particolare tipo di controllo fornito dal regolatore.

Fra i ritardi appartenenti alla prima categoria vi sono quelli dovuti alla *valvola di regolazione* per attriti e capacità; quelli introdotti dalle *linee di trasmissione* dei vari segnali; quelli generati dalla *capacità e resistenze* dei recipienti e tubazioni costituenti il processo.

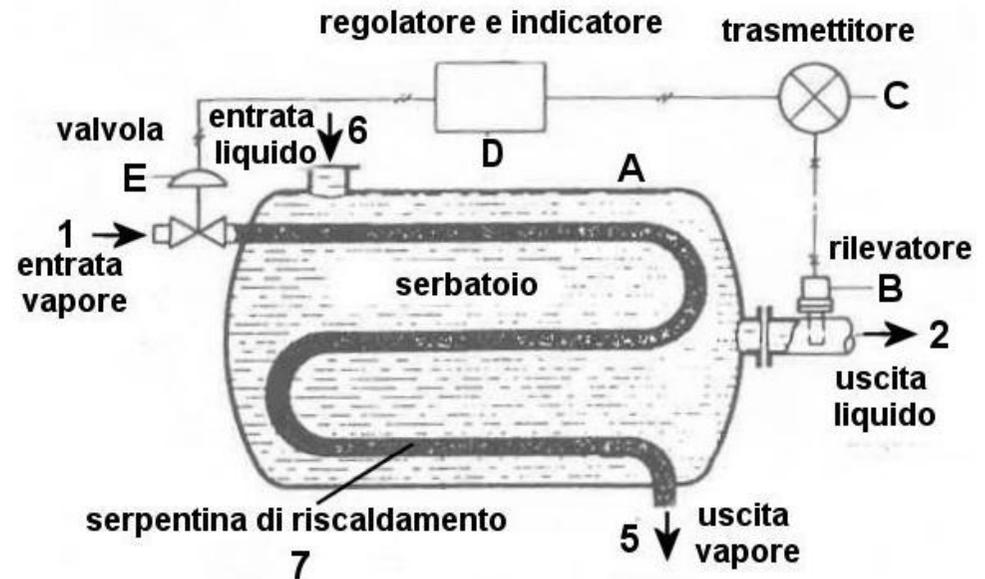
Esempi di regolazione automatica

Regolazione ad anello semplice

Un semplice esempio di regolazione automatica è mostrato nella Figura.

Si tratta di controllare a lato è rappresentato la temperatura di un liquido in uscita da un serbatoio (A).

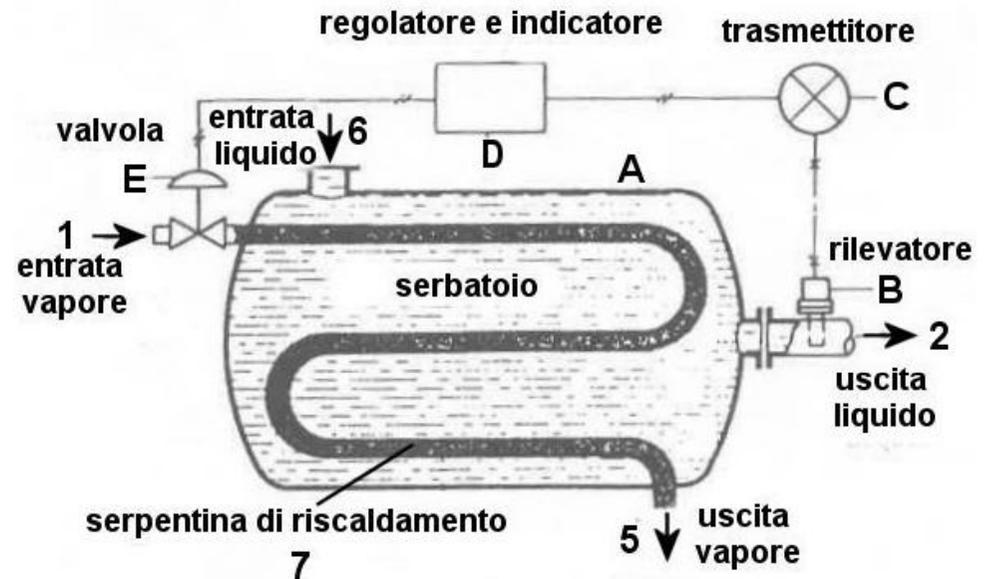
Il controllo avviene regolando la portata di vapore (la cui temperatura è superiore a quella del liquido del serbatoio) che circola nella serpentina di riscaldamento (7) sistemato nel serbatoio.



In un sistema di questo genere, il serbatoio rappresenta il processo, la temperatura è la variabile regolata e la portata di vapore quella manipolata.

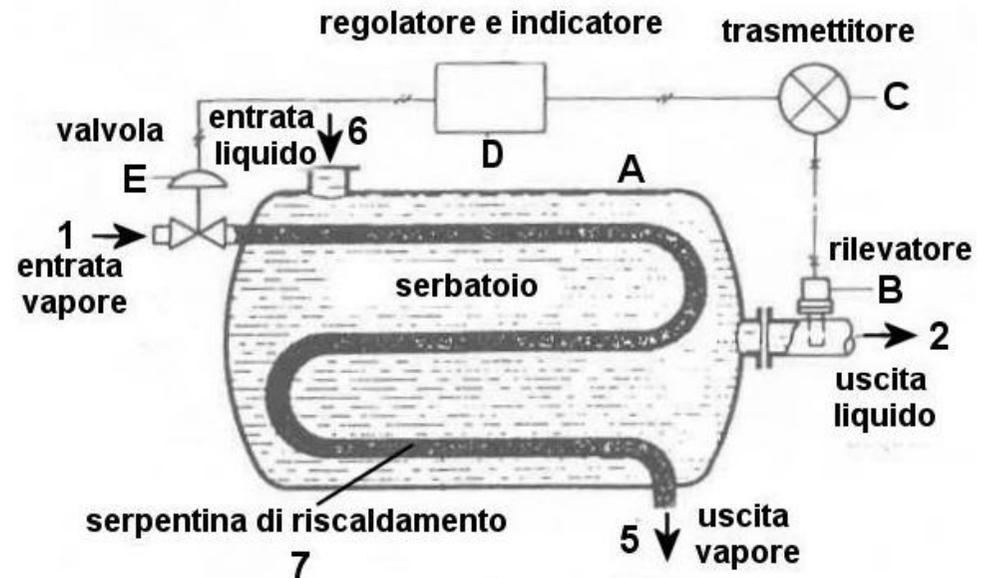
L'elemento di rilevazione della temperatura è il bulbo termometrico (B) posto all'uscita (2) del liquido riscaldato.

Il bulbo termometrico è collegato al trasmettitore pneumatico (C) che dà in uscita una pressione d'aria variabile da 3 a 15 a seconda del valore di temperatura assunta dal liquido riscaldato.



Il *regolatore pneumatico* (D) riceve la pressione proveniente dal trasmettitore che rappresenta la variabile regolata e dà in uscita una pressione d'aria compressa modulata da 3 a 15 psi che agisce sul servocomando della valvola.

Il regolatore ha la funzione di indicare e registrare il valore assunto dalla *variabile regolata* (temperatura) e di mantenerla al set-point variando tramite la valvola servocomandata (E) l'entità della portata di vapore (*variabile manipolata*).



In pratica, *un* aumento di temperatura ad di sopra del valore di set-point causerà una reazione del regolatore consistente in una maggiore intensità del segnale di arrivo alla valvola che determina un *maggiore strozzamento* e quindi una *diminuzione della portata di vapore*.

Tipi di regolazione automatica

I regolatori automatici si possono classificare a seconda del *tipo di funzione* che lega la variabile regolata X e l'azione regolante Y , cioè il grado di apertura della valvola.

In genere si può scrivere:

$$Y = f(X, t) \quad \text{o meglio} \quad Y - Y_0 = f(X - X_0, t)$$

dove:

X_0 = valore desiderato (set-point) della variabile regolata

Y_0 = grado di apertura della valvola di regolazione corrispondente a X_0

$X - X_0$ = scostamento della variabile dal set-point

$Y - Y_0$ = variazione del grado di apertura della valvola corrispondente allo scostamento $X - X_0$.

I tipi di regolazione più comune caratterizzati da una particolare forma delle espressioni riportate in precedenza sono:

- regolazione *a due posizioni*
- regolazione *ad azione proporzionale (P)*
- regolazione *ad azione integrale (I)*
- regolazione *ad azione derivativa (D)*
- regolazione *ad azione proporzionale più integrale (P+I)*
- regolazione *ad azione proporzionale più derivativa (P+D)*
- regolazione *ad azione proporzionale più integrale più derivativa (P+I+D)*

La regolazione a due posizioni è una regolazione di tipo *discontinuo*.

Gli altri tipi di regolazione sono di tipo *continuo*.

Regolazione a due posizioni

E' il modo *più semplice* di regolazione ed il primo che sia stato introdotto in ordine di tempo nei processi.

La regolazione a due posizioni è una regolazione di tipo discontinuo dove il regolatore imprime alla valvola di regolazione soltanto due posizioni:

- *massima apertura* (massimo valore della variabile manipolata)
- *completa chiusura* (valore zero della variabile manipolata).

Quindi nella regolazione a due posizioni la valvola passa dalla posizione di massima apertura a quella di completa chiusura o viceversa non appena la variabile regolata si discosta dal set-point.

Se Y è l'azione regolante, cioè la variazione del grado di apertura della valvola, l'equazione del regolatore acquista la forma:

$$Y = Y_1 \quad \text{per } X < X_0$$

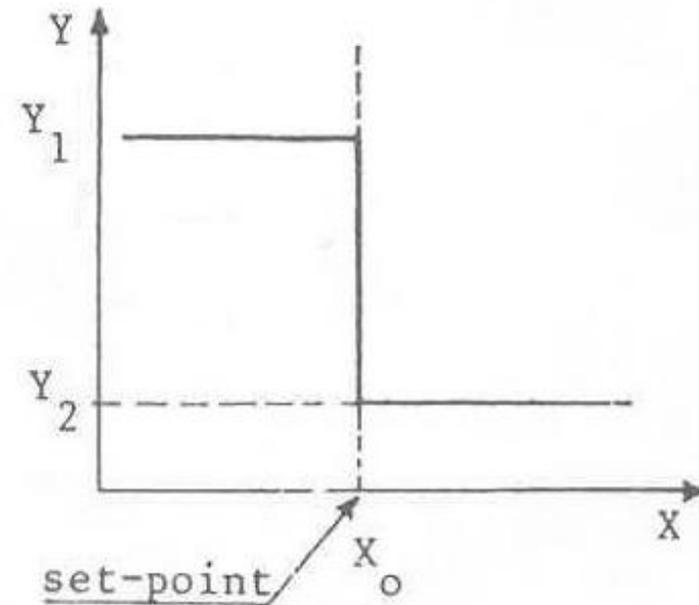
$$Y = Y_2 \quad \text{per } X > X_0$$

dove Y_1 e Y_2 sono rispettivamente le posizioni di massima apertura e di completa chiusura che la valvola può assumere a seconda che la variabile regolata X presenti un valore minore o maggiore del set-point X_0 .

La caratteristica di un regolatore a due posizioni è mostrata nella Figura.

Le posizioni Y_1 e Y_2 possono coincidere, come già detto, con le posizioni di completa apertura o chiusura della valvola o con due posizioni intermedie di apertura o chiusura.

Nel primo caso la regolazione a due posizioni prende il nome di regolazione “*tutto o niente*” oppure “*attacca-stacca*” oppure “*on-off*”.



Caratteristica del regolatore a due posizioni. Effetto del ritardo.

Nel regolatore a due posizioni la valvola si porta alla posizione di massima apertura o chiusura non appena la variabile si scosta dal set-point.

Alla posizione di massima apertura corrisponde un valore della variabile manipolata (per esempio la portata di vapore dell'esempio visto in precedenza) *superiore a quello strettamente necessario* per mantenere la variabile regolata al set-point, mentre l'opposto accade quando la valvola è chiusa.

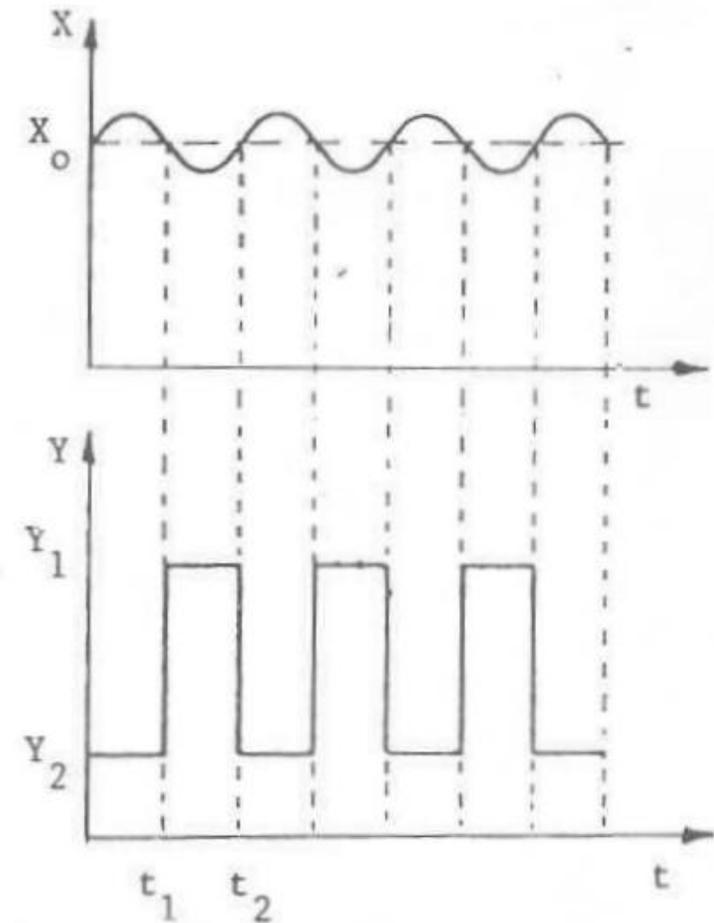
Se non vi è ritardo tra l'azione regolante e lo scostamento della variabile regolata, quest'ultima oscillerà con frequenza infinitamente grande ed ampiezza infinitamente piccola attorno al set-point.

Nella pratica il ritardo indurrà un andamento della variabile regolata X e l'azione regolante Y in funzione del tempo t come quello indicato nella Figura.

Quando all'istante t_1 la variabile X scende al di sotto del valore X_0 la valvola si porta alla posizione di massima apertura Y_1 , ma la sua azione, per effetto del ritardo, non si fa sentire subito.

La variabile X continua a diminuire sempre più lentamente fino a raggiungere un minimo, quindi aumenta e ripassa per il valore X_0 all'istante t_2 .

A questo punto la valvola si chiude, ma il suo effetto si fa sentire ancora in ritardo; la variabile X continua allora a crescere etc., etc.



E' chiaro che all'aumentare del ritardo aumenta la ampiezza della oscillazione e diminuisce la frequenza.

Caratteristica del regolatore a due posizioni con zona differenziale

Generalmente nei regolatori a due posizioni si fa in modo che i valori di massima apertura e chiusura (o minima apertura) della valvola non vengano assunti esattamente non appena la variabile regolata X si discosta dal set-point X_0 , ma quando la X assume valori al di fuori di un certo intervallo X_1 e X_2 detto “zona differenziale” del regolatore.

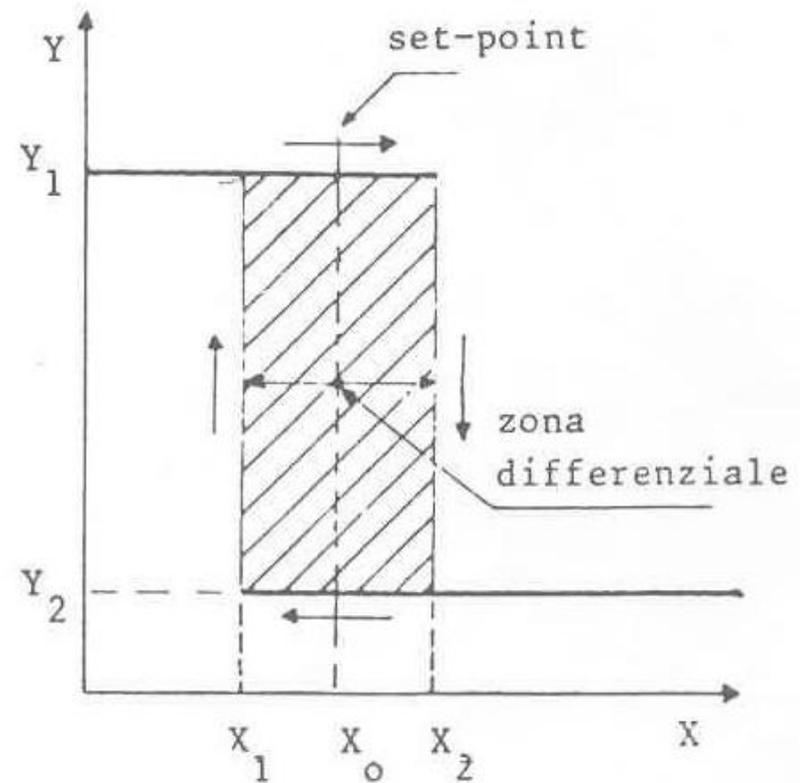
L'equazione del regolatore a due posizioni con zona differenziale assume la forma:

$$Y = Y_1 \quad \text{per } X < X_1$$

$$Y = Y_2 \quad \text{per } X > X_2$$

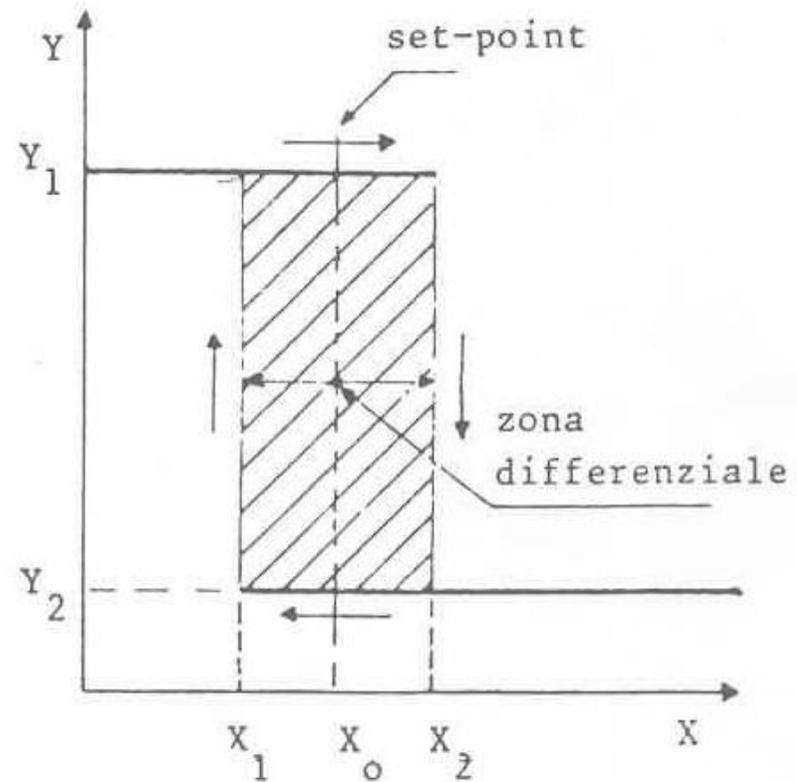
La caratteristica di un regolatore a due posizioni con zona differenziale è mostrata nella Figura.

La zona differenziale è generalmente attorno allo 0.5 - 1 % dell'ampiezza della scala.



Come si vede, la valvola si porta alla posizione di chiusura Y_2 solo quando la variabile X sale sopra il valore X_2 mentre si porta alla posizione di massima apertura Y_1 quando X scende al di sotto di X_1 .

Ampliando la zona differenziale diminuisce la frequenza degli interventi del regolatore che di conseguenza è sottoposto ad una minor usura.



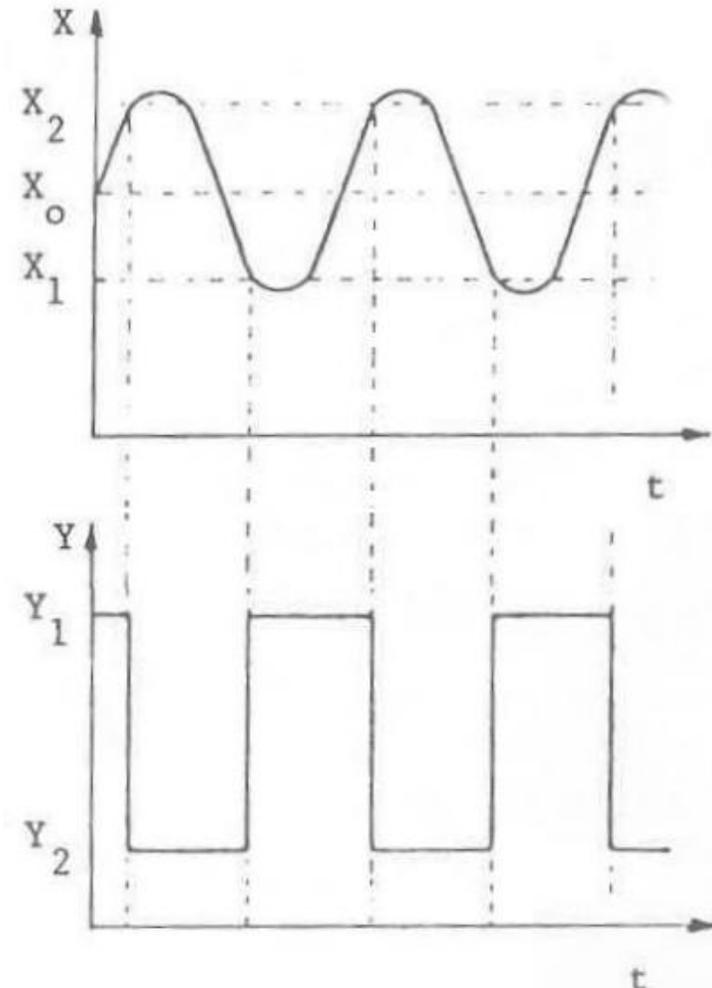
Effetto del ritardo nel regolatore a due posizioni con zona differenziale

L'andamento della variabile regolata X e dell'azione regolante Y in funzione del tempo t per un regolatore a due posizioni con zona differenziale.

Quando la variabile X supera il valore X_2 la valvola si porta alla posizione di chiusura o minima apertura Y_2 .

Tuttavia l'effetto di questa azione, sempre a causa del ritardo, non si fa sentire subito e quindi la variabile X continua ad aumentare sia pure più lentamente fino a raggiungere un massimo e quindi comincia a scendere.

Quando la variabile X scende al di sotto di X_1 la valvola si porta alla posizione di massima apertura. Per effetto del ritardo la variabile X continua a scendere, passa attraverso un minimo, etc., etc.



Applicazioni della regolazione a due posizioni

La regolazione a due posizioni viene applicata comunemente perchè è *semplice e poco costosa* ed applicabile alla maggior parte dei processi.

Questo tipo di regolazione è consigliabile quando si può *sopportare una oscillazione* della variabile regolata attorno al punto di regolazione e quando vi siano piccole variazioni di carico oppure variazioni moderate ma lente.

Regolazione ad azione proporzionale

In questo tipo di regolazione *l'azione regolante* della valvola è *proporzionale* allo *scostamento* della variabile regolata dal punto di regolazione.

L'espressione analitica di un regolatore ad azione proporzionale è:

$$Y - Y_0 = - K_p (X - X_0)$$

dove:

X_0 = valore predeterminato della variabile regolata

Y_0 = valore del grado di apertura della valvola corrispondente a X_0

X = valore assunto dalla variabile regolata

Y = valore del grado di apertura della valvola corrispondente a X

K_p = coefficiente di proporzionalità.

Esso è preceduto da segno negativo perchè ad ogni aumento di X deve corrispondere una diminuzione del grado di apertura della valvola.

Dall'equazione

$$Y - Y_0 = - K_p (X - X_0)$$

si ricava, derivando rispetto al tempo t:

$$\frac{dY}{dt} = - K_p \frac{dX}{dt}$$

cioè la velocità di apertura o chiusura della valvola (dY/dt) è proporzionale alla velocità con cui la variabile regolata X si scosta dal set point.

Quindi se la deviazione della variabile dal set-point avviene *rapidamente* altrettanto *rapidamente* avviene l'azione correttiva.

Caratteristica di un regolatore ad azione proporzionale

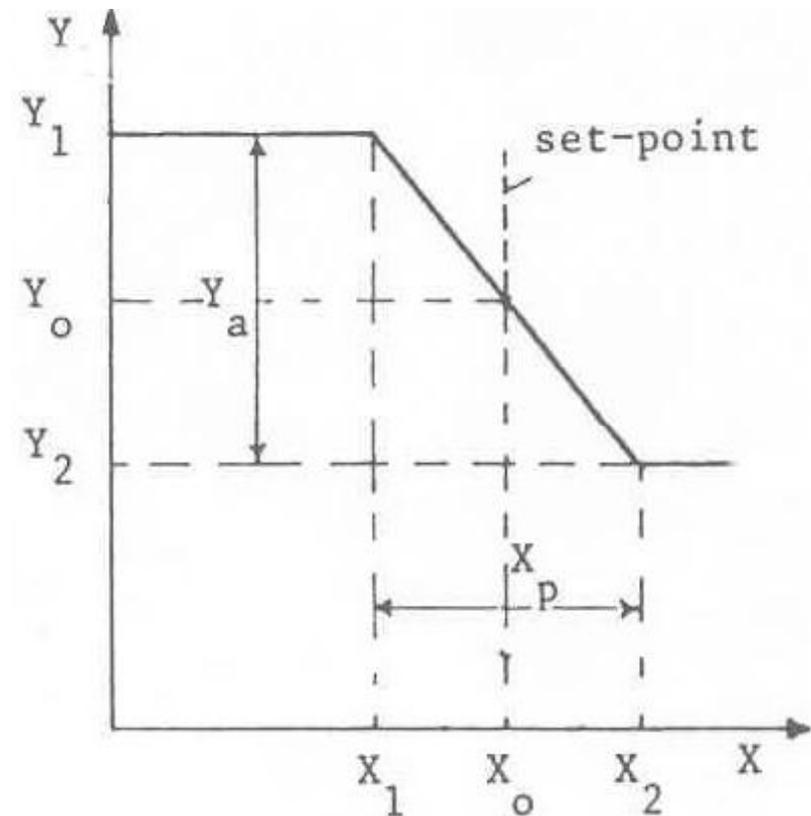
La Figura rappresenta la caratteristica di un regolatore ad azione proporzionale.

$$Y - Y_0 = - K_p (X - X_0)$$

L'intervallo X_1 - X_2 ossia la distanza X_p tra i due valori della X per i quali la valvola di regolazione assume le due posizioni estreme si chiama *banda proporzionale*.

Detto intervallo può essere simmetrico rispetto al punto X_0 oppure no.

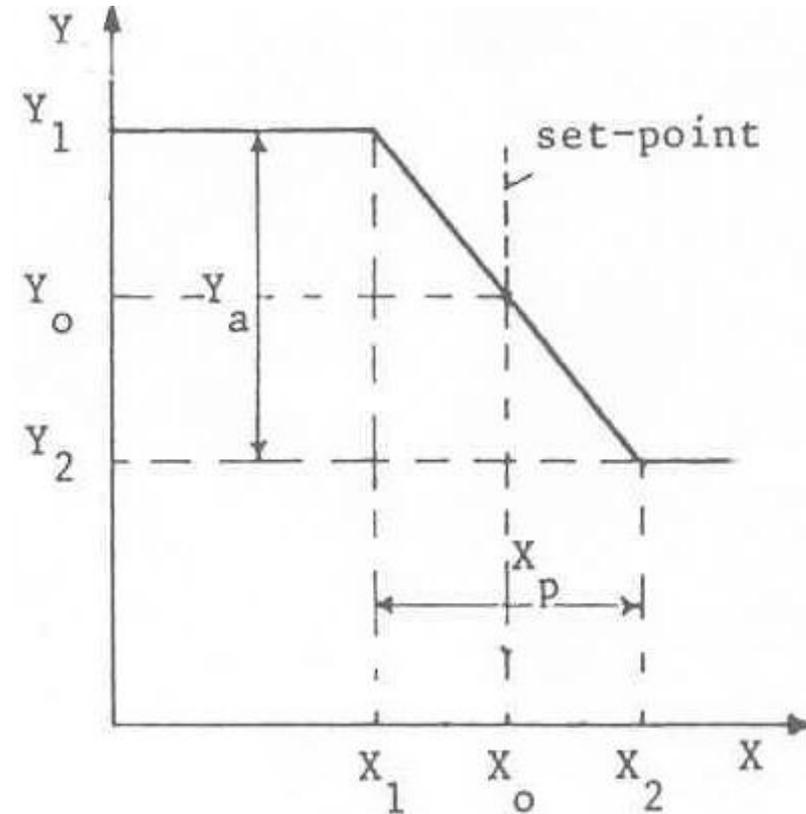
L'intervallo Y_1 - $Y_2 = Y_a$, rappresenta il campo di variabilità dell'azione regolante, cioè lo spostamento della valvola, e si chiama *banda d'azione*.



Il significato fisico della costante K_P è dato allora dal rapporto tra la banda d'azione Y_a e la banda proporzionale X_P e può essere preso come una misura della *sensibilità* dello strumento.

Più piccola è la banda proporzionale maggiore è la sensibilità.

Se la banda proporzionale è *stretta* basta una minima variazione della variabile X per fare compiere alla valvola una escursione molto *ampia*.



Un regolatore con banda proporzionale *uguale a zero* diventa di tipo *on-off*.

Cioè non appena la variabile X si scosta dal set-point la valvola si porta in una delle due posizioni estreme.

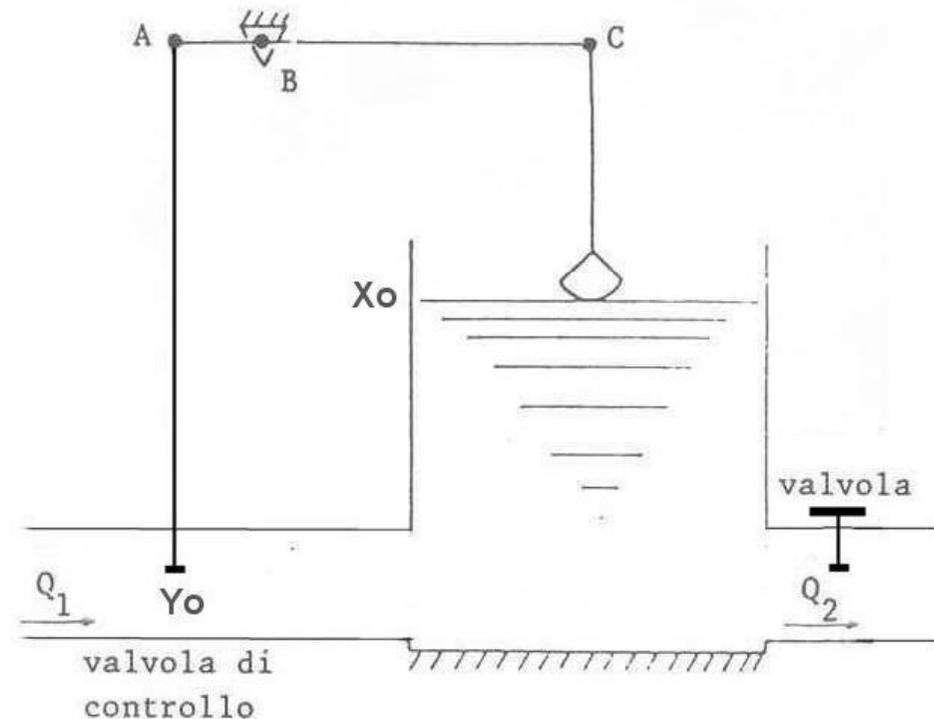
Principio di funzionamento del regolatore ad azione proporzionale.

Lo schema funzionale di un regolatore ad azione proporzionale per un caso di regolazione di livello di un liquido in un serbatoio è mostrato nella Figura. Spostando il fulcro B a destra o a sinistra si varia K_p .

Per mantenere il livello a X_o il grado di apertura della valvola di controllo deve essere Y_o .

Se la portata Q_2 in uscita è uguale a quella in ingresso Q_1 il livello resta costante.

Se si apre la valvola posta sull'uscita del serbatoio la portata Q_2 aumenta, il livello diminuisce e la valvola di controllo deve aprire per fare giungere una portata Q_1 di alimentazione maggiore contrastando così la diminuzione di livello.



L'off-set nel regolatore ad azione proporzionale.

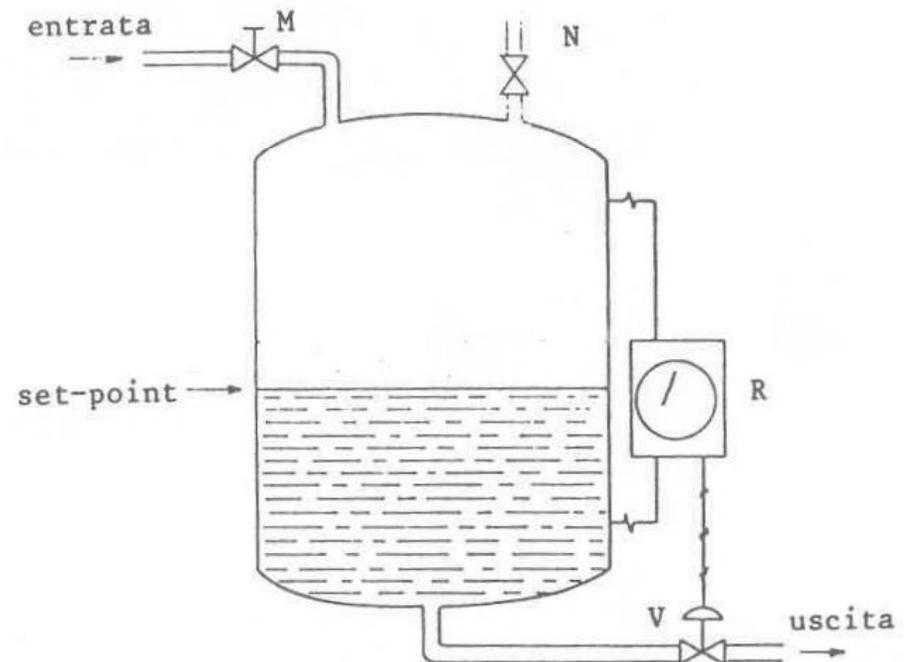
Nel sistema di regolazione mostrato in Figura il livello viene mantenuto costante attraverso la valvola di controllo posta sull'uscita del serbatoio.

Per questo scopo la portata entrante, cioè il carico dell'impianto (che supponiamo essere ad esempio 500 L/h) deve essere uguale alla portata in uscita, regolata dalla valvola servocomandata V.

Supponiamo di creare una perturbazione portando la portata in entrata a 600 L/h operando sulla valvola manuale M.

Se la valvola V mantenesse invariato il proprio grado di apertura il serbatoio si riempirebbe completamente.

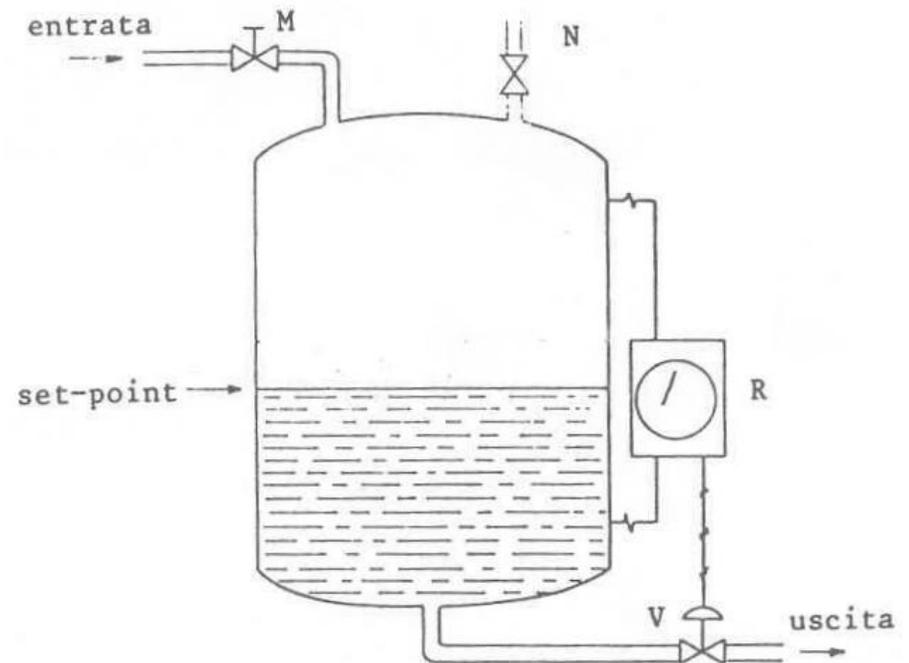
Invece il regolatore proporzionale, mano a mano il livello cresce aumenta in modo proporzionale l'apertura della valvola per contrastare l'aumento del livello.



Ad un certo punto e precisamente quando attraverso di essa passeranno 600 L/h il livello cesserà di crescere stabilizzandosi però ad un *valore superiore a quello primitivo* (cioè quando le due portate in ingresso ed uscita erano pari a 500 L/h) e rimanendovi finchè non interverrà una nuova variazione di carico.

Quindi il regolatore ad azione proporzionale *non è in grado* di riportare la variabile regolata X al set-point qualora lo scostamento della variabile stessa dal set-point sia dovuta ad una variazione *permanente* del carico.

Questo *scostamento del livello* è proporzionale alla variazione permanente del carico e prende il nome di *off-set*.



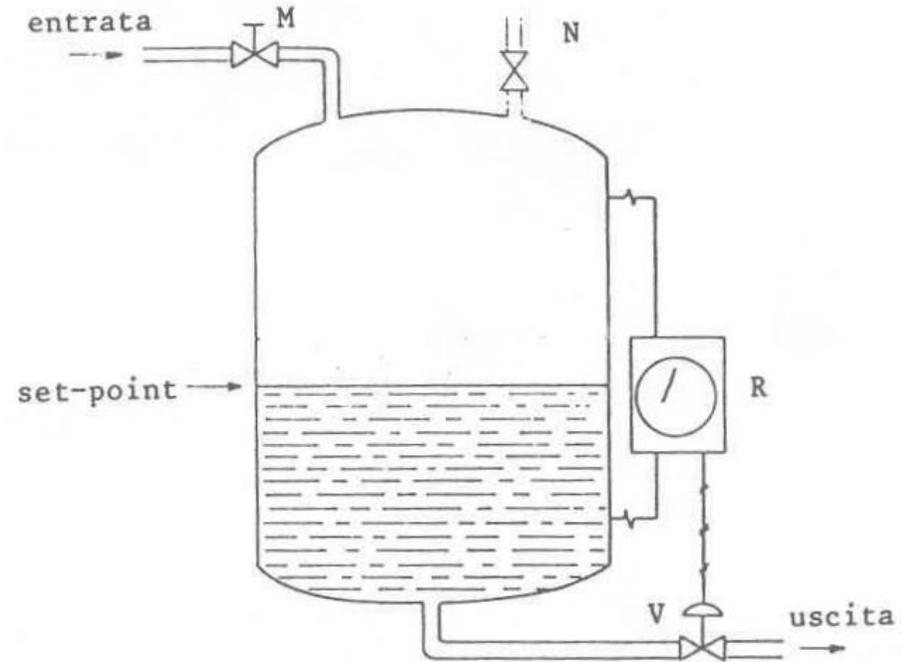
Se la variazione del carico fosse invece legata ad un disturbo *accidentale* il problema dell'off-set *non esisterebbe*.

Se la variazione del carico fosse invece legata ad un disturbo *accidentale* il problema dell'off-set *non esisterebbe*.

Questo provoca una maggiore apertura della valvola con conseguente aumento della portata in uscita che si mantiene superiore a quella in ingresso (500 L/h) fino a quando non è stata smaltita la quantità di liquido improvvisamente versata.

Quando ciò è avvenuto il livello ritorna a *coincidere* con il valore di set-point e si ristabiliscono le condizioni iniziali.

Il regolatore ad azione proporzionale ha così dimostrato di reagire in maniera efficace ad una variazione improvvisa e di breve durata delle condizioni normali (di equilibrio del processo)



Generalmente per qualsiasi perturbazione, provocata per esempio da una variazione del carico o da altre cause, l'azione di regolazione intesa a ripristinare le condizioni di equilibrio del processo si *stabilizza* soltanto *dopo un certo tempo* più o meno lungo.

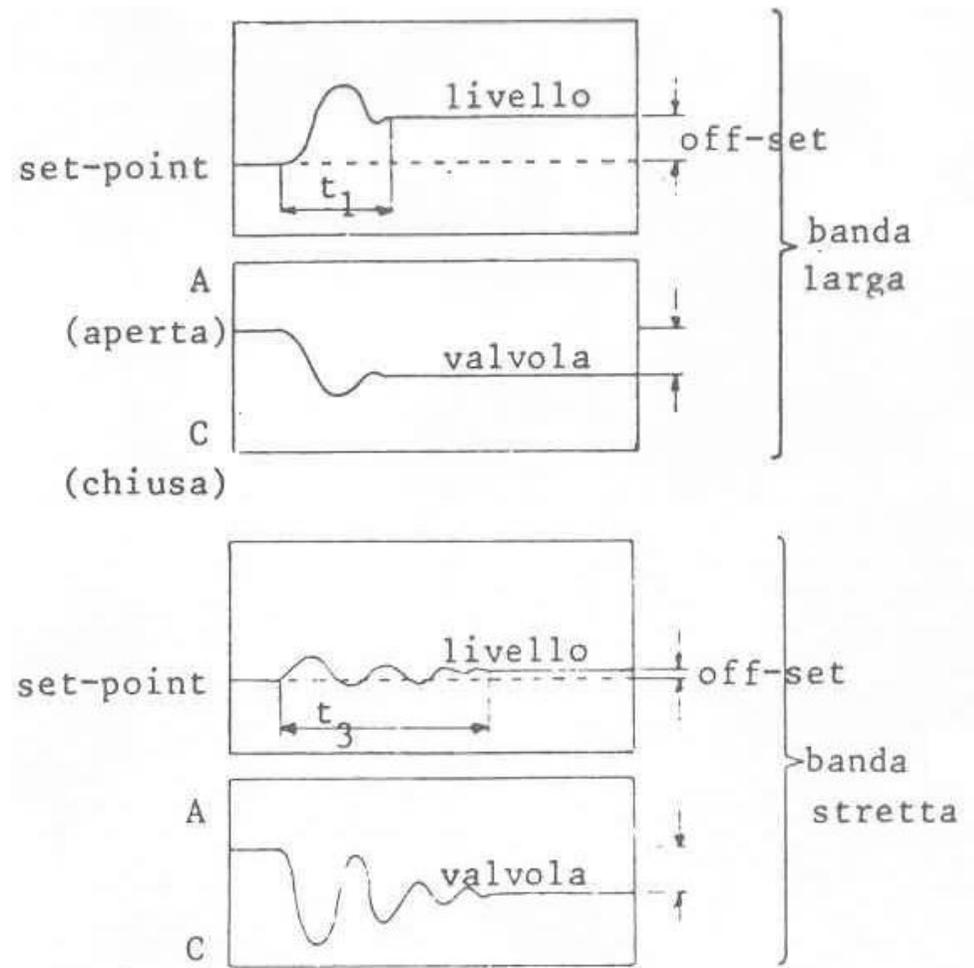
Durante tale periodo la variabile compie un certo numero di *oscillazioni smorzate*, la cui ampiezza e frequenza dipendono dalla banda proporzionale scelta per il regolatore.

Dalla Figura si può notare come l'off-set vada diminuendo man mano che diminuisce la banda proporzionale e come vada aumentando il tempo necessario alla stabilizzazione della variabile.

Inoltre al diminuire della banda proporzionale aumenta la instabilità del controllo fino ad arrivare alla generazione di *oscillazioni persistenti* qualora si restringa la banda oltre un certo limite.

In pratica si dovrà scegliere un valore di banda proporzionale per cui si ha il massimo di stabilità con il minimo di off-set.

In pratica si dovrà scegliere un valore di banda proporzionale per cui si ha il massimo di stabilità con il minimo di off-set.



Applicazioni della regolazione ad azione proporzionale.

La regolazione ad azione proporzionale è pertanto indicata in quei processi dove si verificano variazioni di carico *piccole e poco frequenti* e dove sia *tollerabile l'off-set*.

Infatti il principale svantaggio della regolazione ad azione proporzionale è proprio rappresentato dall'off-set.

In certi casi, come ad esempio il controllo di livello, l'off-set può non costituire un serio problema, ma può diventarlo nel caso del controllo di altre variabili.

Per riportare la variabile al valore di set-point occorre *spostare manualmente* il set-point di una quantità pari all'off-set.

Questo intervento è chiaramente possibile quando le variazioni di carico *non sono frequenti*, altrimenti l'operatore deve continuamente intervenire per il riassetto manuale e così si perde il vantaggio rappresentato dalla automaticità del funzionamento.

Regolazione ad azione integrale

Nella regolazione ad azione integrale la velocità di spostamento della valvola ($v = dY/dt$) è proporzionale allo scostamento della variabile dal set-point ($X - X_0$).

L'espressione analitica di un regolatore ad azione integrale è quindi:

$$\frac{dY}{dt} = -K_i (X - X_0)$$

Dove K_i è una costante di proporzionalità.

Dall'esame di questa equazione appare evidente che con il regolatore ad azione integrale si *riesce ad eliminare* il problema dell'off-set.

Infatti per tutto il tempo durante il quale perdura lo scostamento la valvola di regolazione continua a muoversi e si ferma ($dY/dt = 0$) solo quando il valore della variabile X coincide con quello di set -point X_0 .

Purtroppo il controllo integrale non è un controllo stabile e porta a continue oscillazioni della variabile attorno al set-point.

In pratica l'azione integrale non è mai utilizzata da sola ma viene combinata ad esempio con l'azione proporzionale.

Si ottiene così un regolatore ad azione proporzionale più integrale (P+I) che presenta due importanti vantaggi.

Il primo è quello di avere un controllo stabile ossia di eliminare le oscillazioni della variabile attorno al set-point; il secondo è quello di eliminare completamente l'off-set.

In pratica l'azione integrale viene accoppiata all'azione proporzionale proprio per eliminare l'off-set e di conseguenza sostituisce l'operazione di riassetto manuale tipica della regolazione proporzionale.

Per ottenere un controllo ancora più efficace l'azione integrale viene combinata con l'azione proporzionale più derivativa (P+D).

Regolazione ad azione derivativa.

In questo tipo di regolazione, l'azione regolante Y è proporzionale alla *velocità di variazione* della variabile X .

L'espressione analitica di un regolatore derivativo diventa:

$$Y - Y_0 = - K_d \frac{d(X - X_0)}{dt}$$

dove K_d è una costante di proporzionalità.

Questa equazione mostra che il regolatore ad azione derivativa avverte solo le variazioni della variabile regolata e *non è in grado* di correggere uno scostamento stabile.

Infatti se $X - X_0$ rimane costante la sua derivata rispetto al tempo è nulla, per cui $Y - Y_0 = 0$.

Quindi la regolazione derivativa *non è adatta* per mantenere la variabile al suo valore di set-point, in quanto il regolatore cessa di intervenire quando lo scostamento si è *stabilizzato*.

Per questo motivo la regolazione derivativa non viene mai usata da sola

Regolazione ad azione proporzionale + integrale + derivativa (P+I+D).

Il regolatore P+I+D presenta tutti i vantaggi delle tre azioni singole e viene adoperato nei più delicati processi di regolazione automatica potendo rispondere a *qualsiasi tipo di scostamento* della variabile dal set-point.

Infatti facendo riferimento alla solita regolazione di livello si ha che, nel caso di una perturbazione:

- *l'azione proporzionale* contrasterebbe l'innalzamento del livello
- *l'azione derivativa* ridurrebbe l'ampiezza dello scostamento
- *l'azione integrale* riporterebbe il livello al suo valore prefissato.