



Introduzione alla Strumentazione e al Controllo degli Impianti Chimici

Davide Manca

Lezione **1** di “Strumentazione e Controllo di Impianti Chimici”

Laurea di primo livello in Ingegneria Chimica – Politecnico di Milano



Introduzione al controllo di processo

Un **impianto chimico** è costituito da un insieme ordinato e strutturato di **singole apparecchiature** ove avvengono reazioni e sono condotte operazioni unitarie.

All'interno di tali apparecchiature (reattori, scambiatori di calore, colonne di distillazione, assorbitori, evaporatori, flash, stripper, compressori, turbine, soffianti, pompe, miscelatori, splitter, ...) la **materia prima** viene trasformata in **prodotto finale** passando in genere attraverso una serie di **prodotti intermedi**.

Flussi di materia e di energia caratterizzano il funzionamento delle apparecchiature di impianto.



Introduzione al controllo di processo

Il funzionamento dell'impianto è condizionato da una serie di fenomeni, grandezze, parametri e variabili (sia esterne che interne al processo) che cambiano nel tempo.

Per un'adeguata conduzione dell'impianto occorre controllare il suo funzionamento ed esercirlo secondo le **condizioni operative di progetto** (condizioni nominali) o viceversa condurlo ad operare secondo **regimi alternativi** dipendenti da opportune e specifiche esigenze processistiche.

La conduzione del processo è dettata in genere da linee guida basate su specifiche ed aspetti tecnici, economici, sociali e di legge.



Esigenze di controllo

Sicurezza: la sicurezza degli operatori di campo e di sala controllo nonché di tutti gli addetti (dipendenti e non) e della popolazione limitrofa all'impianto sono l'obiettivo primario del controllo di processo.

- Sicurezza nell'esercizio abituale dell'impianto (controllo e riduzione delle emissioni, *e.g.*, liquide, solide, gassose, odori, rumore)
- Sicurezza per prevenire malfunzionamenti, anomalie, incidenti
- Sicurezza nella gestione dell'evento incidentale (*e.g.*, emissione, dispersione, incendio, esplosione)

Specifiche di produzione: in termine di quantità e qualità del prodotto finale (ma anche, ove possibile, dei sottoprodotti e degli intermedi di processamento)



Esigenze di controllo

Vincoli di legge: relativi alle emissioni ed alla produzione di reflui e scarti di produzione. Normative sullo smaltimento dei rifiuti di processo.

Vincoli operativi: per la corretta conduzione dell'impianto e l'esercizio adeguato delle apparecchiature (*e.g.*, riduzione dell'usura, dei transitori, dei fuori specifica, delle condizioni anomale).

- Nel caso di processi discontinui (batch) il processo produttivo deve seguire una specifica traiettoria operativa che conduce all'ottenimento del prodotto finale

Aspetti economici: il processo per quanto possibile deve soddisfare dei criteri economici legati all'ottimo di produzione. Al contempo la conduzione dell'impianto deve potersi adeguare alle specifiche di mercato che cambiano in base alla richiesta, alla disponibilità delle materie prime ed alla quotazione dei prodotti finali.



Obiettivi del sistema di controllo

Il sistema di controllo (Stephanopoulos, 1984) deve soddisfare le seguenti tre specifiche/necessità:

- **Soppressione dei disturbi esterni sul processo**
- **Assicurazione della stabilità operativa del processo**
- **Ottimizzazione delle prestazioni del processo**

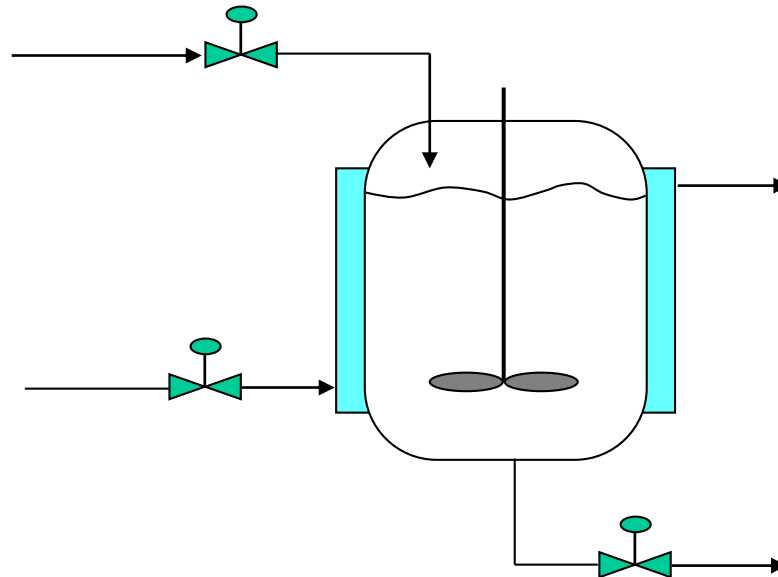
Nell'ultimo punto ricade anche il conseguimento dei set-point di processo che guidano la conduzione e l'ottenimento del prodotto finale secondo la quantità e qualità dettate dalle esigenze di mercato.



Soppressione dei disturbi esterni

Si consideri ad esempio il problema di **mantenimento della temperatura uscente** di un reattore perfettamente miscelato (CSTR) o dell'**altezza di liquido** al suo interno a fronte di disturbi esterni quali:

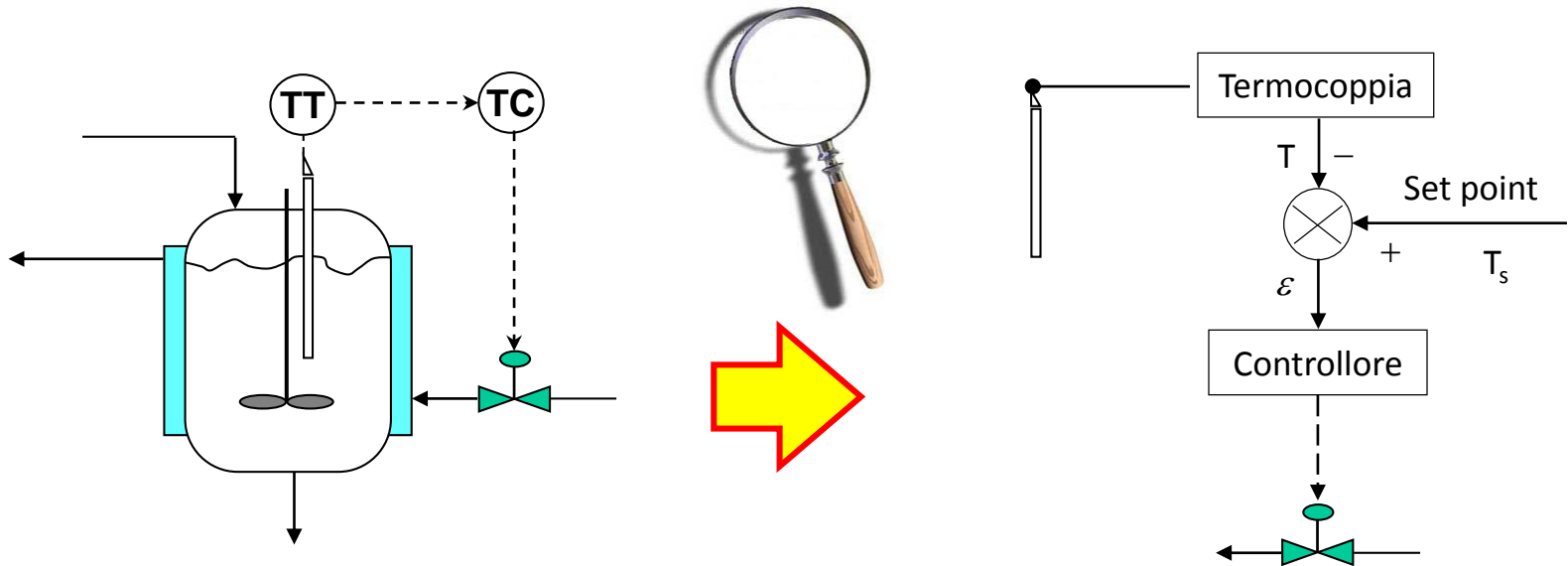
- Portata di alimentazione
- Temperatura di alimentazione
- Fattore di sporcamento della camicia di riscaldamento/raffreddamento



Soppressione dei disturbi esterni

Obiettivo: controllo di temperatura. Si potrà operare sulla regolazione della portata di fluido riscaldante per mantenere la temperatura uscente dal reattore (pari alla temperatura interna del reattore, sotto le ipotesi di perfetta miscelazione *i.e.* CSTR) al valore desiderato.

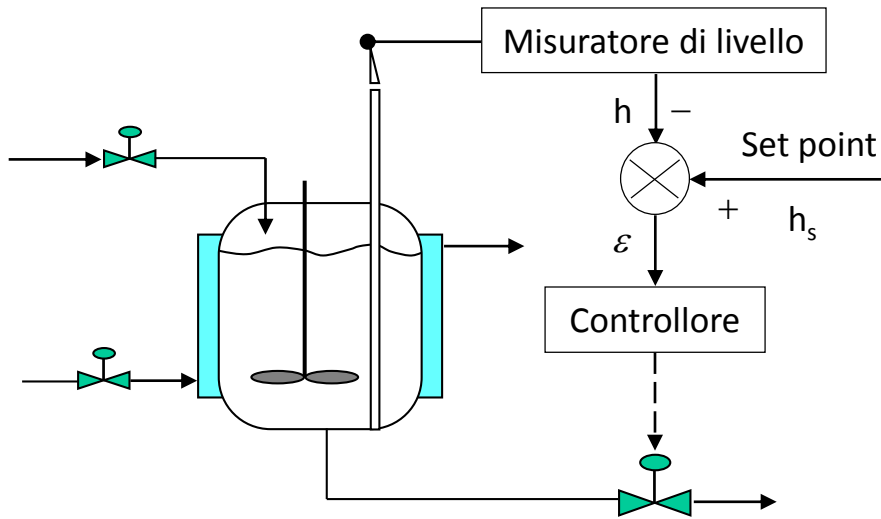
Obiettivo: controllo di livello. Si potrà regolare la portata uscente dal reattore per mantenere il livello del reattore al valore assegnato (*i.e.* set point).



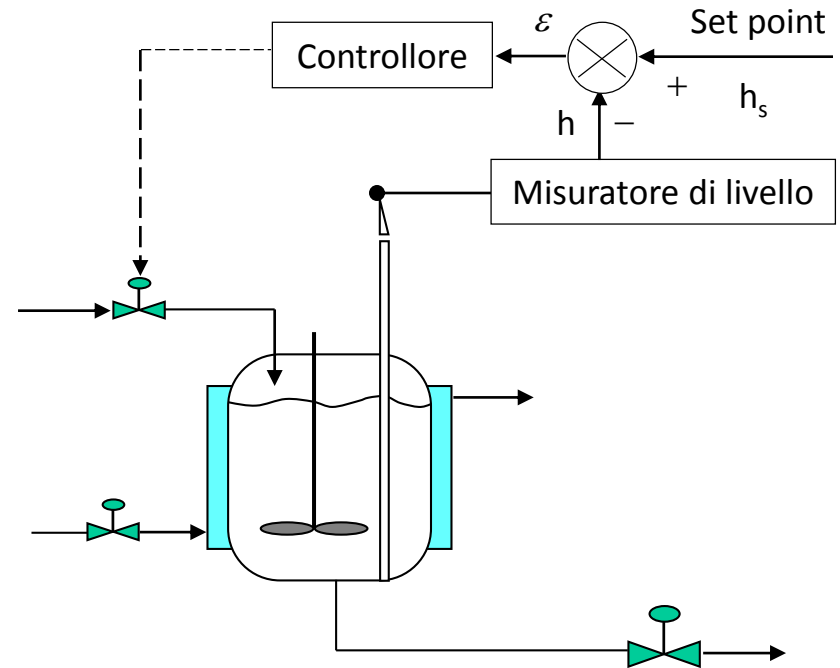
Controllo di temperatura in retroazione (feedback)

Soppressione dei disturbi esterni

Per quanto riguarda la **regolazione del livello del reattore** ci sono due alternative di controllo in retroazione (**feedback**):



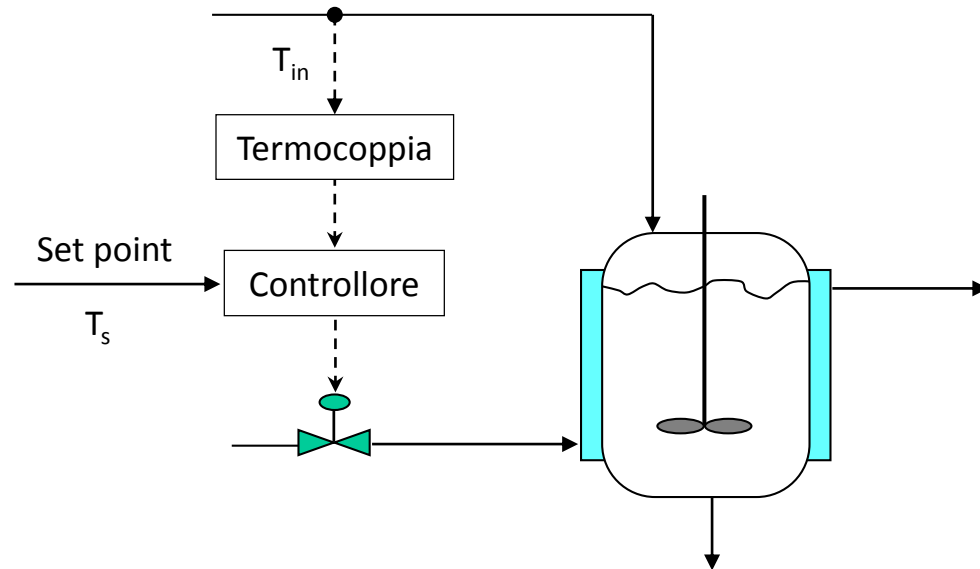
Controllo di livello #1 in retroazione (**feedback**)



Controllo di livello #2 in retroazione (**feedback**)

Soppressione dei disturbi esterni

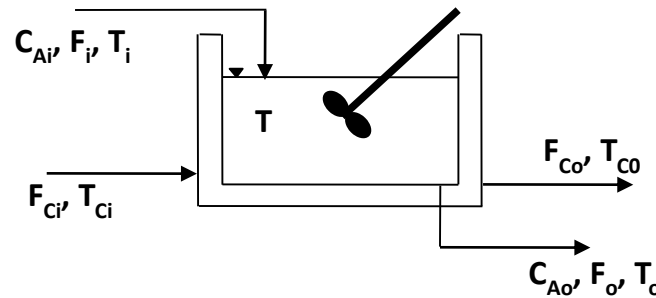
Focalizzando l'attenzione nuovamente sul **controllo di temperatura** del reattore è possibile proporre una tipologia alternativa detta in anteazione (**feedforward**):



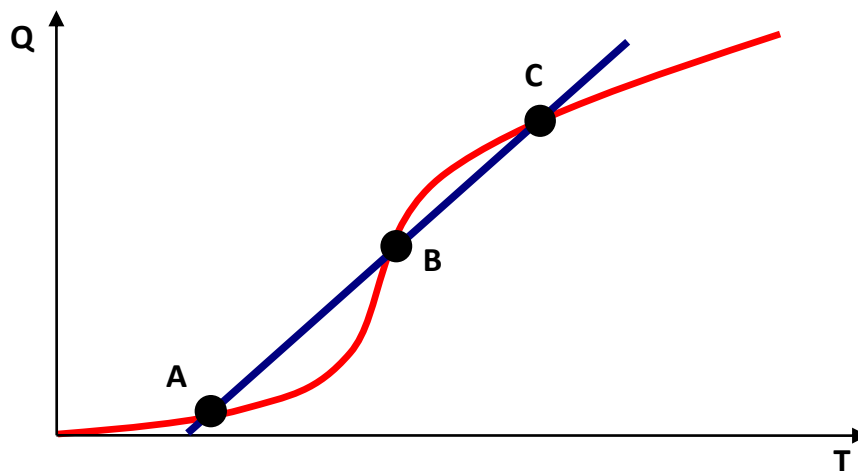
Controllo di temperatura in anteazione (feedforward)

Stabilità operativa di processo

È data una reazione esotermica $A \rightarrow B$ in un reattore CSTR incamiciato con liquido di raffreddamento:



Il diagramma della potenza termica liberata dalla reazione esotermica (in rosso) e sottratta dalla camicia di refrigerazione (in blu) in funzione della temperatura operativa T è:



La **sigmoide** rappresenta il calore di reazione liberato.

La **retta** rappresenta il calore sottratto dalla camicia.

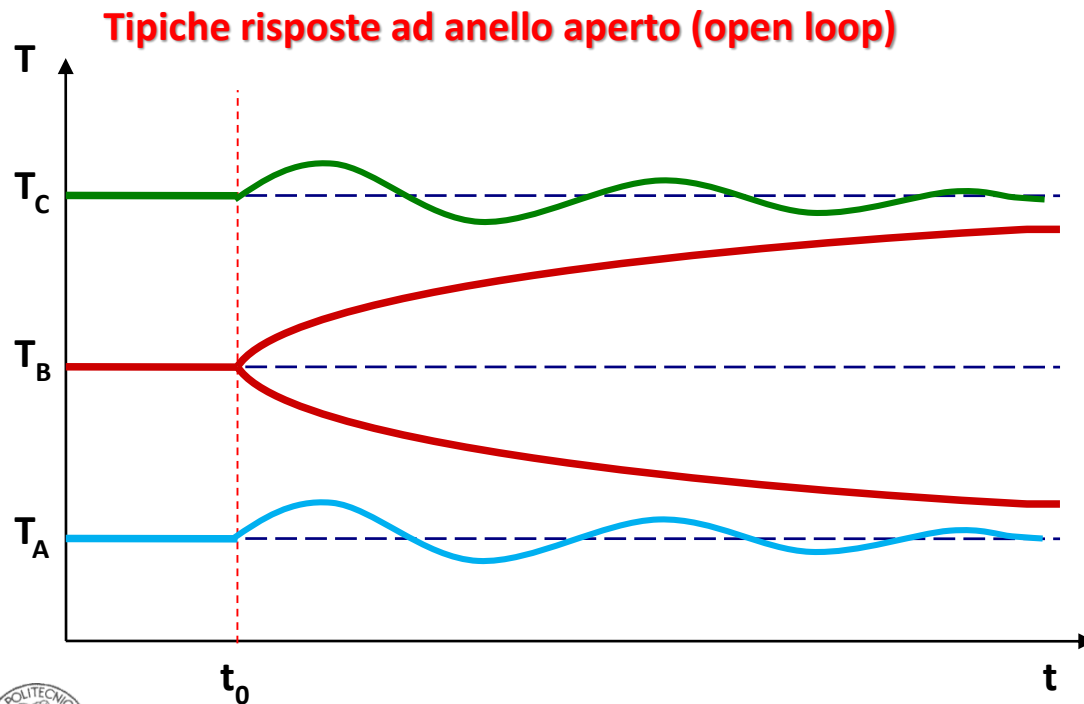
Stabilità operativa di processo

Il punto **A** è in genere di spegnimento o bassa resa.

Il punto **C** è spesso non adatto per il corretto funzionamento del catalizzatore o per i materiali del reattore o per la bassa selettività della reazione.

Il punto **B** è spesso quello ottimale a livello processistico ma è instabile.

- **A** e **C** sono STABILI
- **B** è INSTABILE

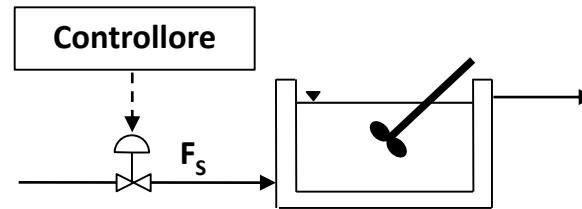


A fronte di disturbi, ad esempio sul calore sottratto in camicia, i punti di funzionamento **A** e **C** sono stabili mentre **B** diverge verso **A** o **C**.

Spesso è necessario operare in **B** che è instabile e quindi introdurre un sistema di controllo che mantenga il processo a cavallo del punto **B**.

Ottimizzazione delle prestazioni di processo

Si consideri un reattore discontinuo (batch) caratterizzato da due reazioni endotermiche consecutive: $A \rightarrow B \rightarrow C$ ove il prodotto è B ed il sottoprodotto è C. Il calore è fornito tramite vapore.



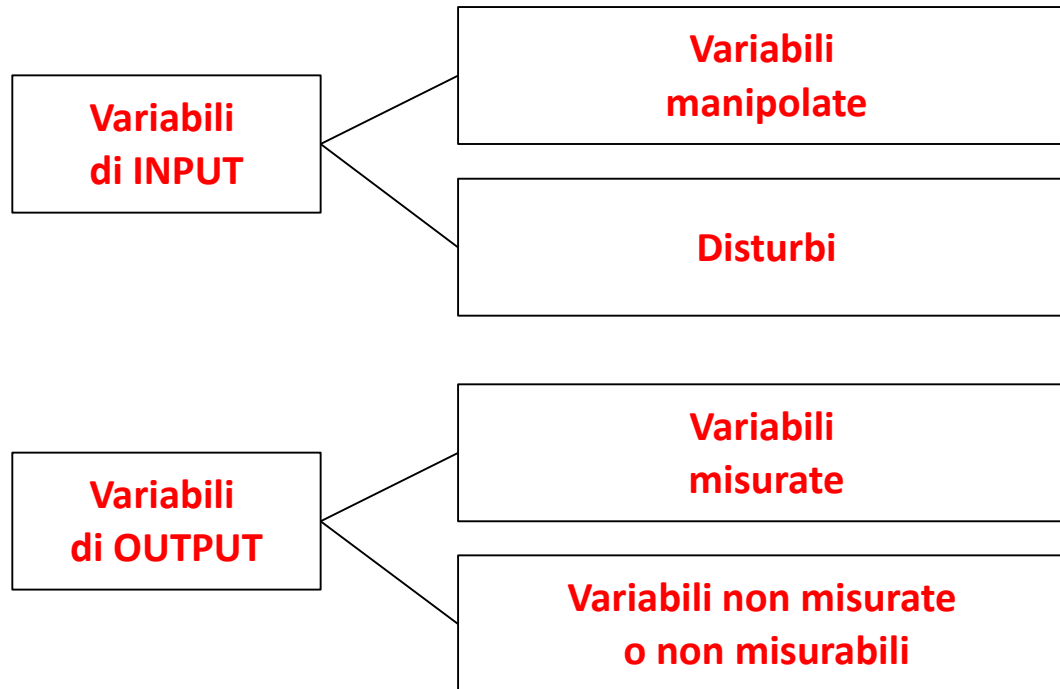
Si desidera determinare la portata di vapore $F_s(t)$ che massimizza Φ ovvero il guadagno:

$$\text{Max } \Phi = \text{Ricavo vendita di B} - \left[c_s \int_0^{t_{TOT}} F_s(t) dt \right] - \text{Costo acquisto di A}$$

Il valore $F_s(t)$ dovrà appartenere al range $[F_s^{min}(t), \dots, F_s^{max}(t)]$ ed il problema consiste nella determinazione della traiettoria ottimale (**optimal trajectory, optimal control**).

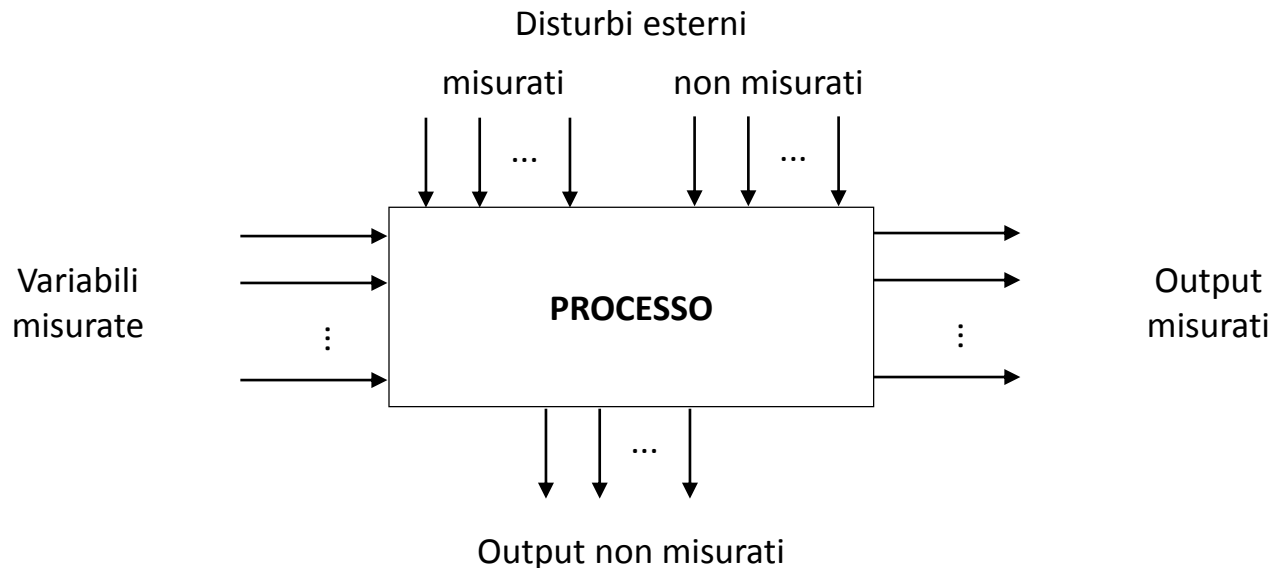
Secondo questo approccio il sistema di controllo non respinge i disturbi (disturbance rejection) bensì controlla il reattore in un'**ottica economica**. Si noti che più passa il tempo più si produce B e quindi si inizia a produrre anche C. Se si eccede con F_s allora c'è il rischio di sottrarre più B per ottenere C di quanto A sia convertito a B.

Classificazione delle variabili di processo



Classificazione delle variabili di processo

- Le variabili di **INPUT** denotano l'effetto dell'ambiente circostante sul processo.
- Le variabili di **OUTPUT** denotano l'effetto del processo sull'ambiente circostante.
- Si hanno inoltre variabili di **PROCESSO o INTERNE** che descrivono il funzionamento e le caratteristiche delle unità di processo interne all'impianto. Tali variabili possono essere intensive o estensive.
- **Variabili di stato**: rappresentano l'insieme minimo di variabili di processo necessarie per definire in modo univoco lo stato (condizione) di un sistema.



Progettazione della struttura di controllo

- Definizione degli obiettivi di controllo
 - Soppressione dei disturbi esterni che agiscono sul processo
 - Assicurazione della stabilità operativa del processo
 - Ottimizzazione delle prestazioni del processo
 - Una combinazione dei punti precedenti
- Selezione delle misure
 - Per monitorare il processo e conoscerne l'evoluzione dinamica
 - Disponibilità di misure primarie (misure dirette)
 - Disponibilità di misure secondarie (inferenziazione di grandezze non misurabili)
 - variabili di processo non misurabili direttamente
 - strumenti di misura non affidabili o troppo costosi
 - tempi di ritardo nella misura



Progettazione della struttura di controllo

- Selezione delle variabili manipolate (variabili di input da modificare per conseguire l'obiettivo del sistema di controllo)
- Selezione della configurazione di controllo (struttura di controllo)
 - connessione delle misure disponibili alle variabili manipolate tramite la logica di controllo
 - SISO
 - MIMO
 - controllo in retroazione (feedback)
 - controllo in anteazione (feedforward)
 - controllo inferenziale (basato su misure secondarie)
- Progettazione del controllore
 - Logica di regolazione delle variabili manipolate in funzione delle misure effettuate e degli obiettivi del sistema di controllo (*e.g.*, setpoint, traiettorie di processo, limiti inferiori e superiori delle variabili controllate, ...)



Cenni alla struttura hardware

- Ogni struttura di controllo è caratterizzata dai seguenti elementi hardware:
 - Il **processo** chimico/industriale
 - Singola apparecchiatura
 - Sottosezione di impianto
 - Impianto completo
 - **Strumenti di misura** per quantificare il valore delle variabili controllate, delle variabili misurate e dei disturbi. Rappresentano il collegamento del sistema di controllo con la realtà
 - termocoppie, misuratori di livello, flussimetri, gascromatografi, ...
 - **Trasduttori** per trasformare la misura fisica in segnale elettrico (con informazione analogica o digitale) adatto al trasferimento verso la sala controllo
 - **Linee di trasmissione** per portare il segnale dallo strumento di misura al sistema di controllo. Possono comprendere la presenza di amplificatori di segnale intermedi.



Cenni alla struttura hardware

- **Controllore**: contiene la logica di controllo ed opera calcoli volti a determinare il valore delle variabili manipolate sulla base delle misure ricevute dal campo
- **Attuatore**: è l'elemento fisico che implementa sul campo le scelte del controllore (es. apertura/chiusura valvole, interruttori on/off, ...)
- **Sistemi di memorizzazione** dei dati misurati in campo

Un ruolo di significativa semplificazione alla realizzazione di un sistema di controllo è svolto dai **sistemi digitali** (*i.e.* **computer**) che agevolano la trasmissione, memorizzazione, elaborazione del segnale nonché l'implementazione dell'azione di controllo.



Bibliografia

- Luyben W., Luyben M., “Essentials of Process Control”, McGraw-Hill, New York, (1997)
- Luyben, W., Tyréus B. & Luyben, M. “Plantwide Process Control”, McGraw-Hill, New York, (1998)
- Magnani G., “Tecnologie dei Sistemi di Controllo”, McGraw Hill, Milano, (2000)
- Ogunnaike B., H. Ray, “Process Dynamics, Modeling, and Control”, Oxford University Press, (1994)
- **Stephanopoulos G., “Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice”, Prentice-Hall, Englewood Cliff, (1984)**

