
Controlli Automatici T-1

Ingegneria dell'Automazione – Anno Accademico 2009/2010

Laboratorio di Modellistica e Simulazione L-A

Ingegneria dell'Automazione – Anno Accademico 2009/2010

Roberto Diversi

Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica (DEIS)

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Telefono: 051 2093770

`roberto.diversi@unibo.it`

<http://sting.deis.unibo.it/sting/members/diversi/>

Introduzione ai controlli automatici

Automatica: settore scientifico che studia i metodi e le tecnologie per il trattamento dell'informazione (dati e segnali) finalizzato all'**automazione**, ossia alla pianificazione, alla gestione ed al controllo, effettuati in maniera automatica, degli impianti, dei processi e dei sistemi dinamici in genere.

Automazione ed automatica \implies l'intervento dell'uomo è assente (o parziale).

Esempi di applicazione: processi industriali di produzione (sia continua sia manifatturiera), macchine operatrici automatiche, sistemi robotizzati, sistemi di trasporto, sistemi per la produzione energetica, sistemi avionici, sistemi di natura ambientale.

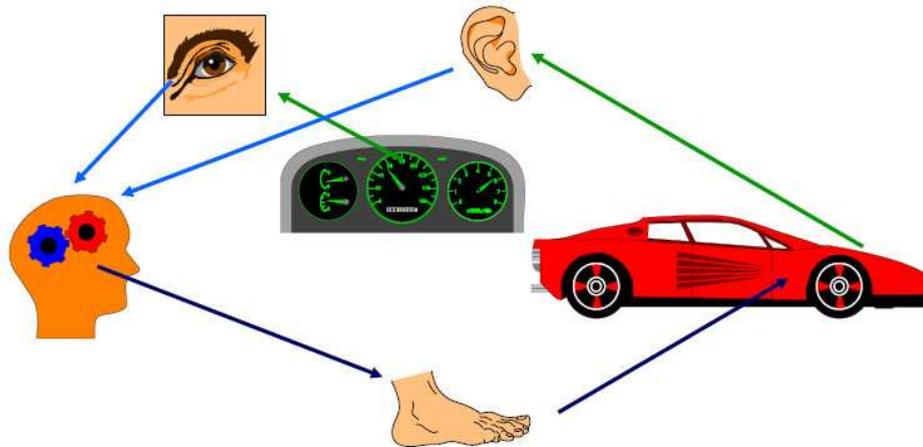
Controllo: azione su un sistema (macchina, impianto, etc.) per modificarne (migliorarne) il comportamento.

Controllo manuale: l'azione di controllo è effettuata dall'uomo (es. guidare l'automobile).

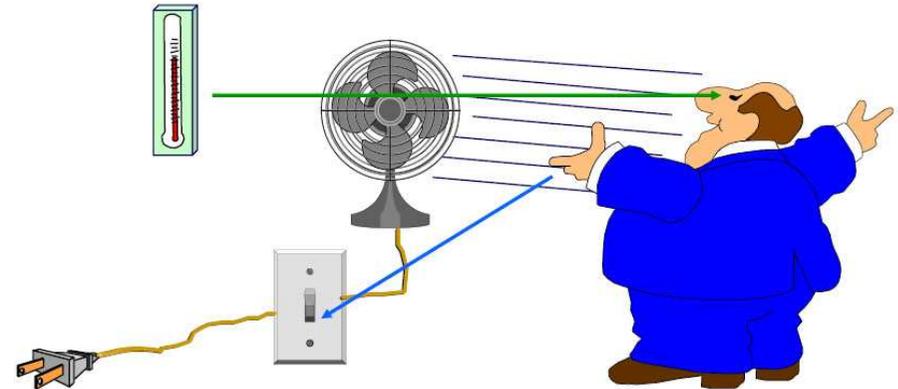
Controlli automatici: disciplina dell'automatica che studia i dispositivi che consentono di variare automaticamente le grandezze liberamente manipolabili di un sistema per imporgli il comportamento (l'andamento nel tempo) desiderato.

Esempio: temperatura di una stanza regolata da un termostato.

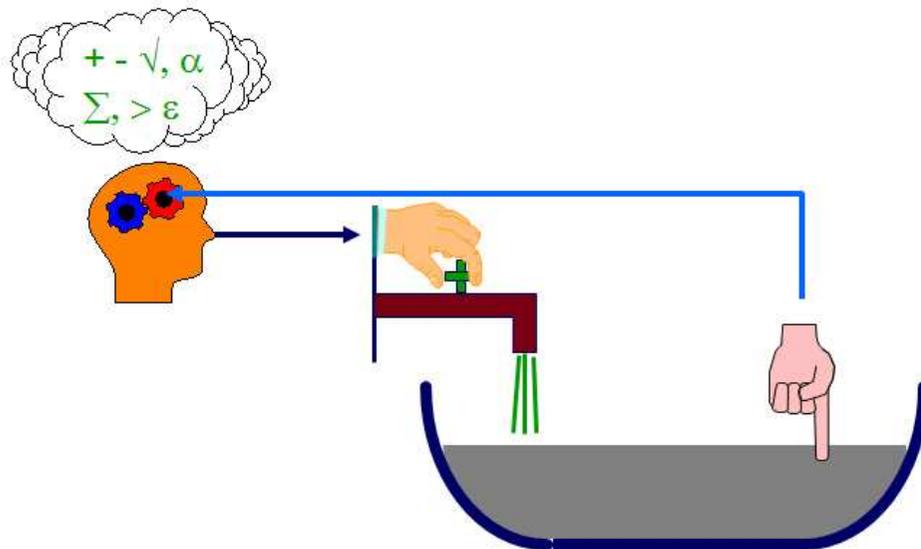
Esempi di controllo manuale



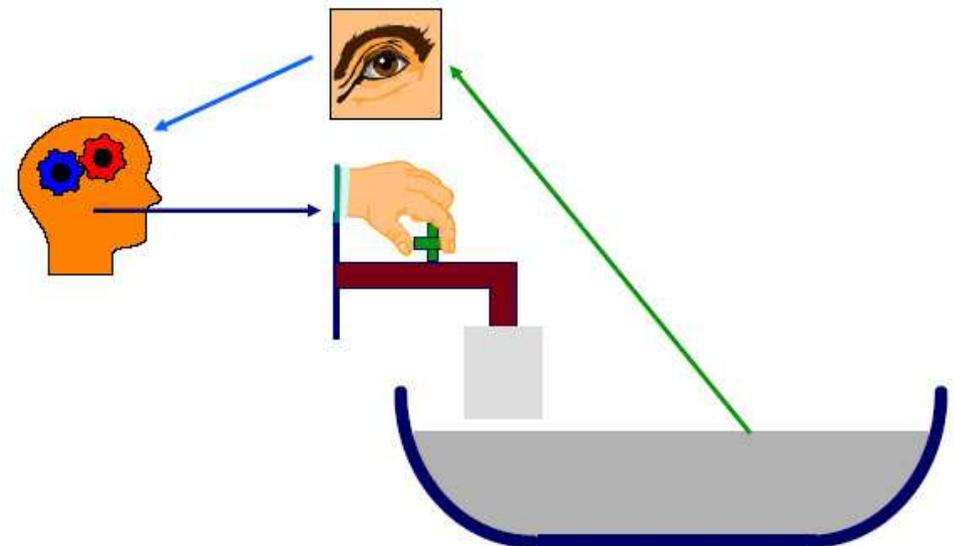
Controllo di posizione e velocità



Controllo di temperatura

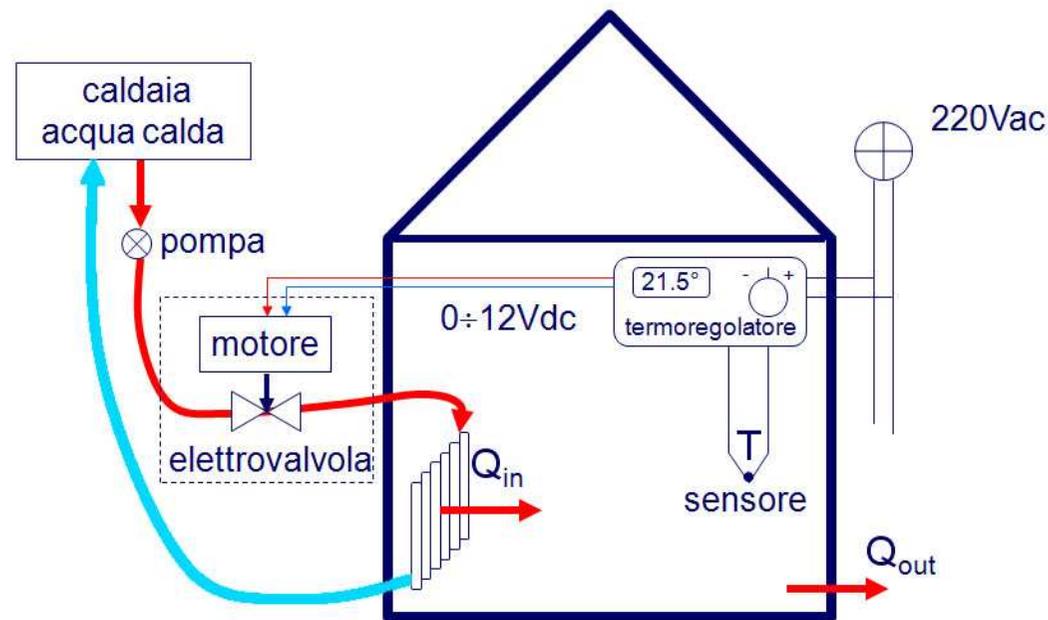


Controllo di temperatura



Controllo di livello

Controllo automatico della temperatura di un'aula

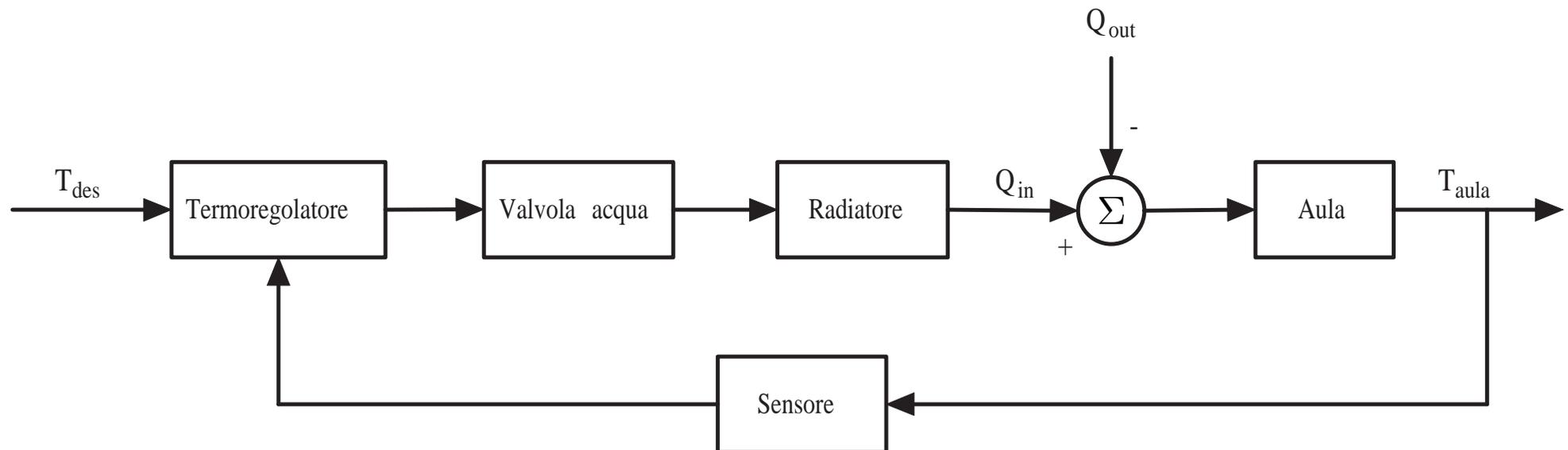


Obiettivo: mantenere la temperatura dell'aula T ad un valore desiderato agendo sulla potenza termica Q_{in} immessa dai radiatori. È inevitabile che una parte della potenza termica (Q_{out}) venga ceduta all'esterno dell'aula.

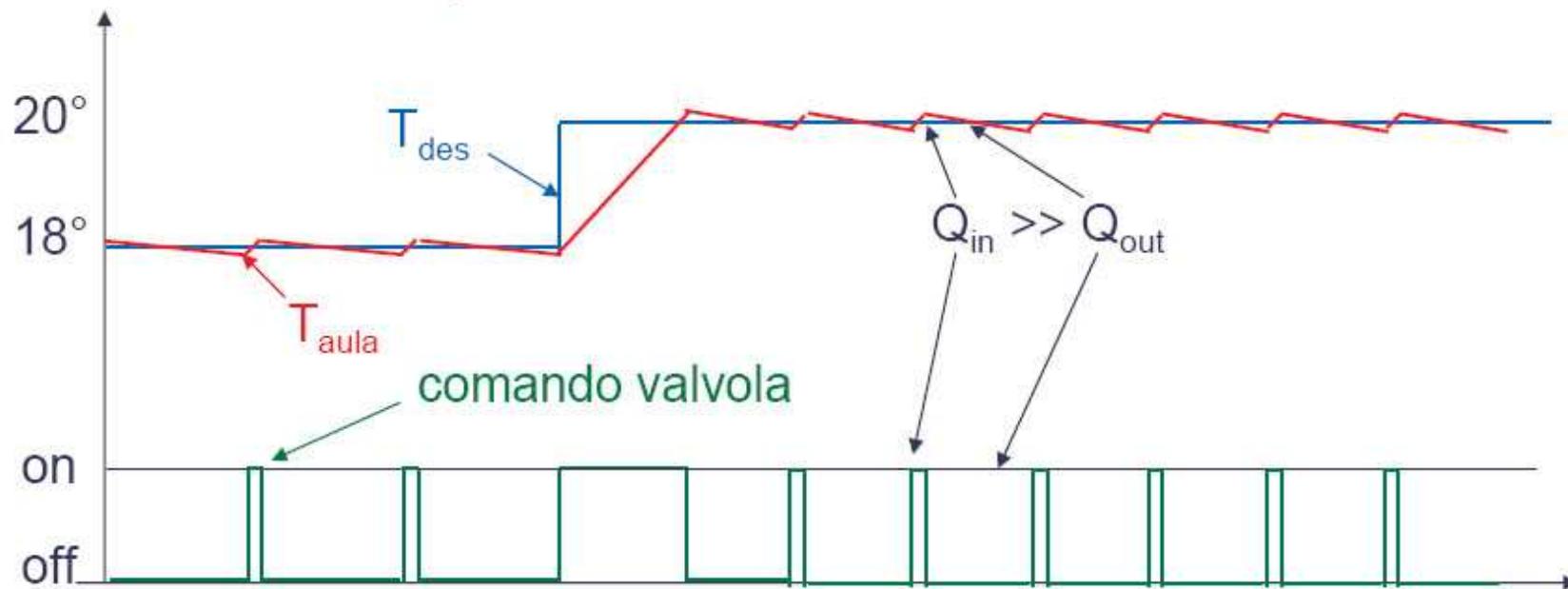
Funzionamento: una caldaia centralizzata, esterna al nostro sistema, produce acqua calda ad una temperatura adeguata. L'acqua viene convogliata con tubazioni ad un radiatore collocato nell'aula. Il circuito dell'acqua calda è sezionato da una valvola che si apre o si chiude mediante comando elettrico \Rightarrow elettrovalvola.

L'elettrovalvola è comandata da un controllore elettronico collocato all'interno dell'aula che apre/chiude l'ettrovalvola sulla base della misura della temperatura dell'aula rilevata da un sensore.

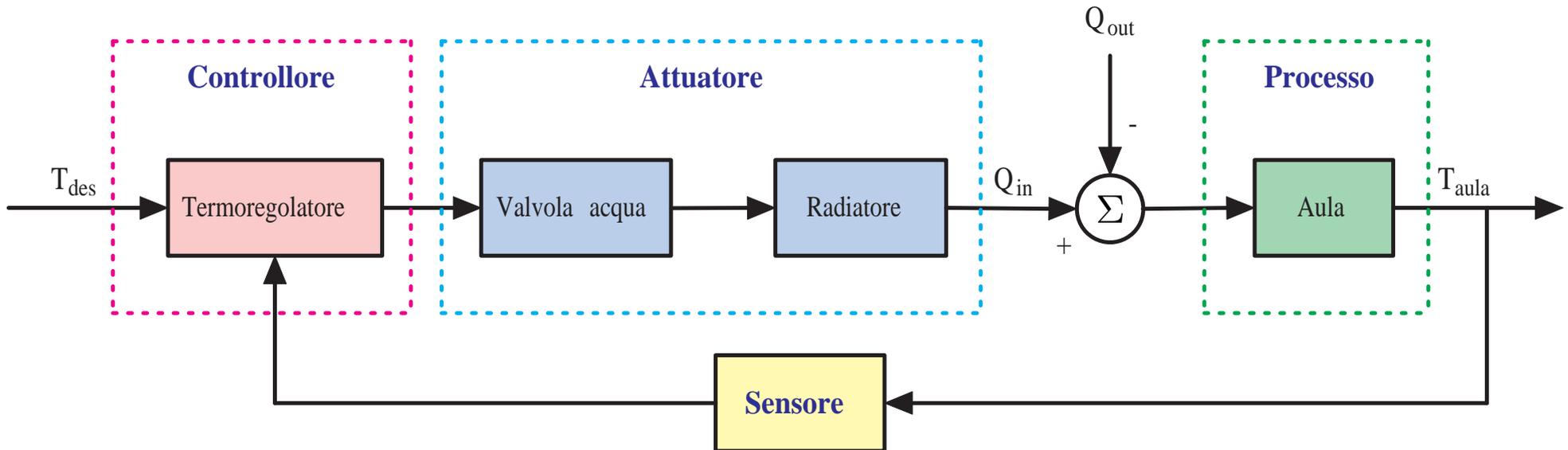
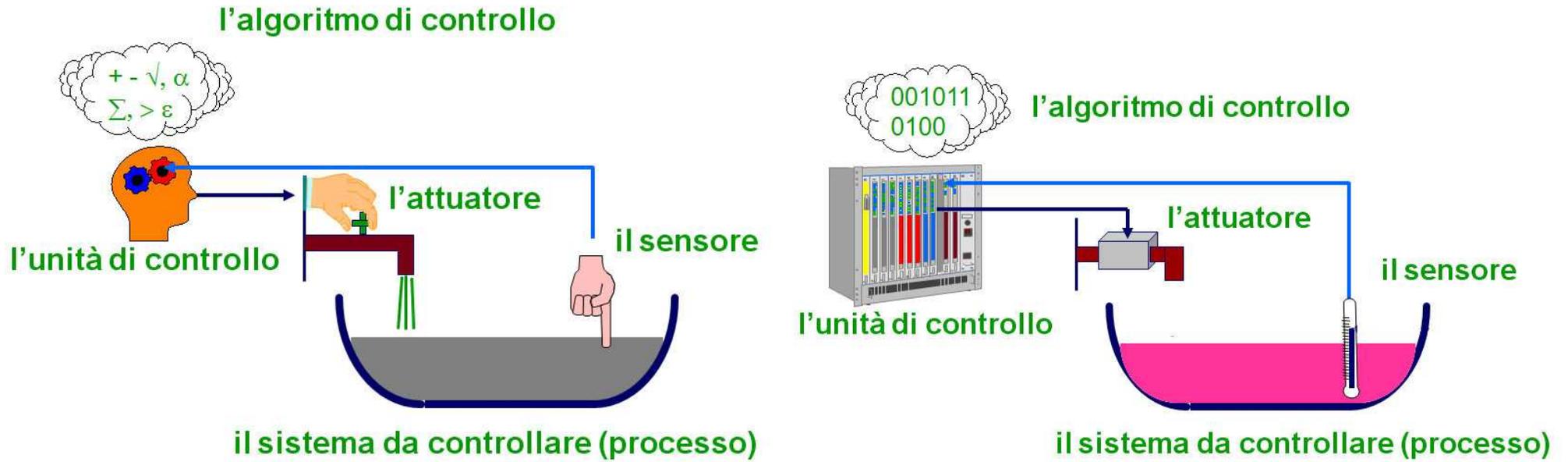
Soluzione più sofisticata: l'apertura/chiusura della valvola sono proporzionali alla tensione applicata \Rightarrow elettrovalvola proporzionale. Se la temperatura è inferiore a quella desiderata è necessario far arrivare più acqua calda al radiatore e quindi aprire di più l'elettrovalvola (tensione maggiore). Se la temperatura è invece troppo alta occorrerà aprire di meno l'elettrovalvola (tensione minore).

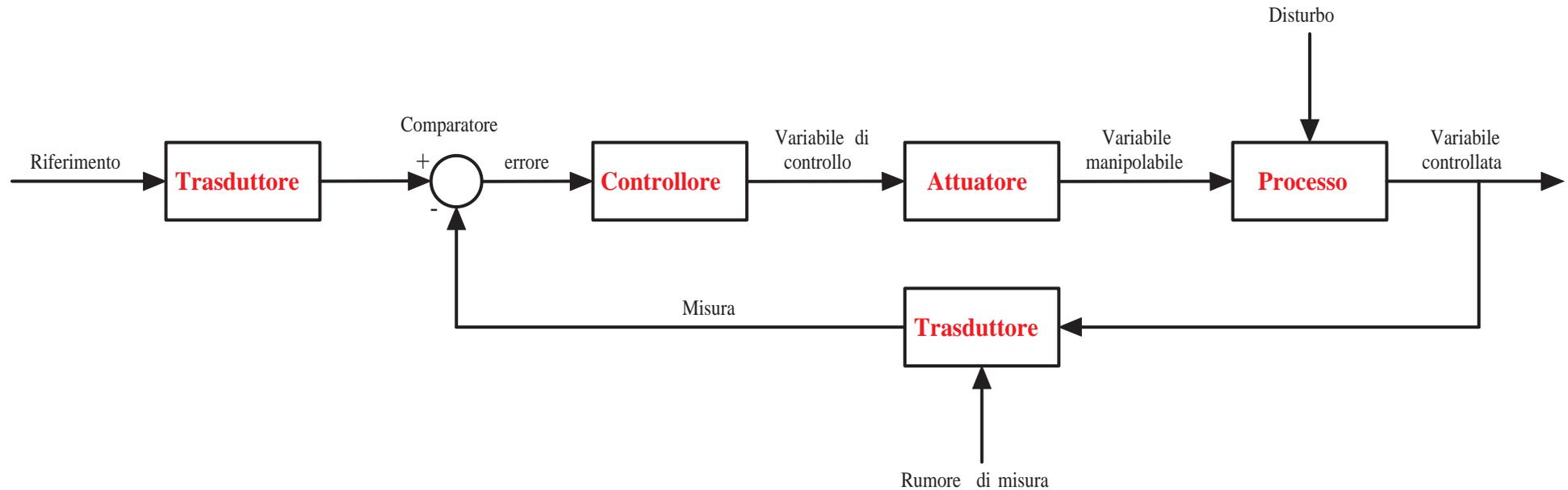


Soluzione più economica: se è accettabile un certo scostamento di temperatura in più o in meno (ad esempio 1°C) si può utilizzare un regolatore/sensore con uscita a due livelli (termostato) ed una elettrovalvola on/off più semplice ed economica. In questo caso, se è troppo freddo la valvola è completamente aperta se è troppo caldo è completamente chiusa. Tale soluzione è quella normalmente adottata per il riscaldamento delle abitazioni, dove il termostato comanda l'apertura della valvola del gas della caldaia e l'accensione del bruciatore. Andamenti tipici della temperatura dell'aula e del comando della valvola sono riportati nella figura seguente.



Elementi principali di un sistema di controllo

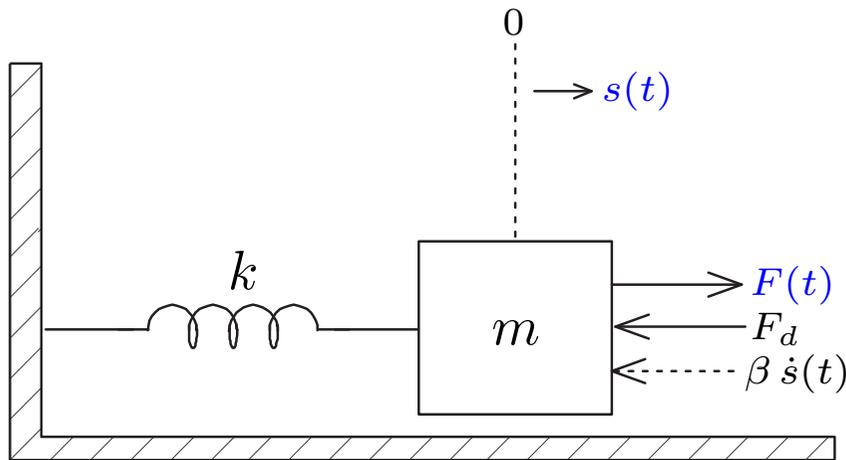




- **Sistema (processo)** del quale si vuole controllare l'uscita (*variabile controllata*) agendo su ingresso manipolabile (*variabile manipolabile*). Il sistema è influenzato anche da ingressi non manipolabili e spesso anche non misurabili (*disturbi di processo*).
- **Controllore (regolatore)**. Genera la *variabile di controllo* in base ad una legge di controllo il cui obiettivo è far assumere alla variabile controllata l'evoluzione nel tempo “migliore” possibile. La “bontà” di tale evoluzione viene valutata in base a specifiche sulle quali si basa il progetto della legge di controllo.

- **Attuatore.** Dispositivo che provvede a modificare la variabile manipolabile in base al valore della variabile di controllo, operando anche una adeguata amplificazione di potenza. All'interno dell'attuatore avviene una trasformazione di energia da un certo tipo (elettrico, meccanico, termico, ecc.) ad un altro.
- **Trasduttore dell'uscita (sensore).** Dispositivo che misura la variabile controllata e la converte in un'altra di diversa natura fisica adatta per la trasmissione a distanza dell'informazione (es. tensione o corrente elettrica, pressione). La misura può essere affetta da rumore.
- **Trasduttore dell'ingresso (filtro di ingresso).** Converte il *segnale di riferimento* o *set point* in un segnale di tipo diverso (in genere elettrico) adatto per la successiva manipolazione da parte del controllore. In alcuni casi può anche modificare il segnale di riferimento per migliorare la risposta del sistema.
- **Comparatore.** Calcola la differenza tra il segnale di riferimento e l'uscita del sensore (*misura*) fornendo al controllore il segnale *errore*.

Controllo in catena aperta (ad azione diretta) e in retroazione



$F(t)$: forza motrice

F_d : forza di disturbo

$\beta \dot{s}(t)$: forza di attrito viscoso

$s(t), \dot{s}(t)$: posizione e velocità del corpo

0 : origine del sistema di riferimento

$s(t) = 0 \Rightarrow$ molla a riposo

Il corpo di massa m è vincolato ad un riferimento fisso tramite una molla lineare di costante elastica k . Durante il moto, il corpo è soggetto ad una forza di attrito viscoso. Si vuole mantenere il corpo nella posizione (variabile controllata) $s(t) = \bar{s}$ agendo sulla forza motrice (variabile di controllo).

A regime (corpo fermo) si ha:

$$F = k s + F_d.$$

Controllo in catena aperta: la variabile di controllo dipende solo dal varole desiderato di quella controllata e dai parametri del modello del sistema (k ed F_d in questo caso). Ponendo $F = k \bar{s} + F_d$ si ottiene un errore a regime nullo: $e = \bar{s} - s = 0$.

Problema: la forza di disturbo può essere non nota, la costante elastica può essere nota con incertezza. In tali condizioni, ponendo $F = k' \bar{s}$ ($k' \neq k$) si ha, a regime:

$$e = \bar{s} - s = \bar{s} - \frac{F - F_d}{k} = \frac{\Delta k}{k} \bar{s} - \frac{F_d}{k} \quad \Delta k = k' - k$$

$\implies e$ può essere molto grande!

Controllo in retroazione: la variabile di controllo dipende anche dal valore corrente della variabile controllata, che si suppone di poter misurare. Ad esempio, si può aggiungere un termine proporzionale all'errore ponendo $F = k' \bar{s} + K_p (\bar{s} - s) = k' \bar{s} + K_p e$. A regime:

$$e = \bar{s} - \frac{F - F_d}{k} = \frac{\Delta k \bar{s} - K_p e - F_d}{k}$$

dalla quale si ottiene

$$e = \frac{\Delta k}{k + K_p} \bar{s} - \frac{F_d}{k + K_p}.$$

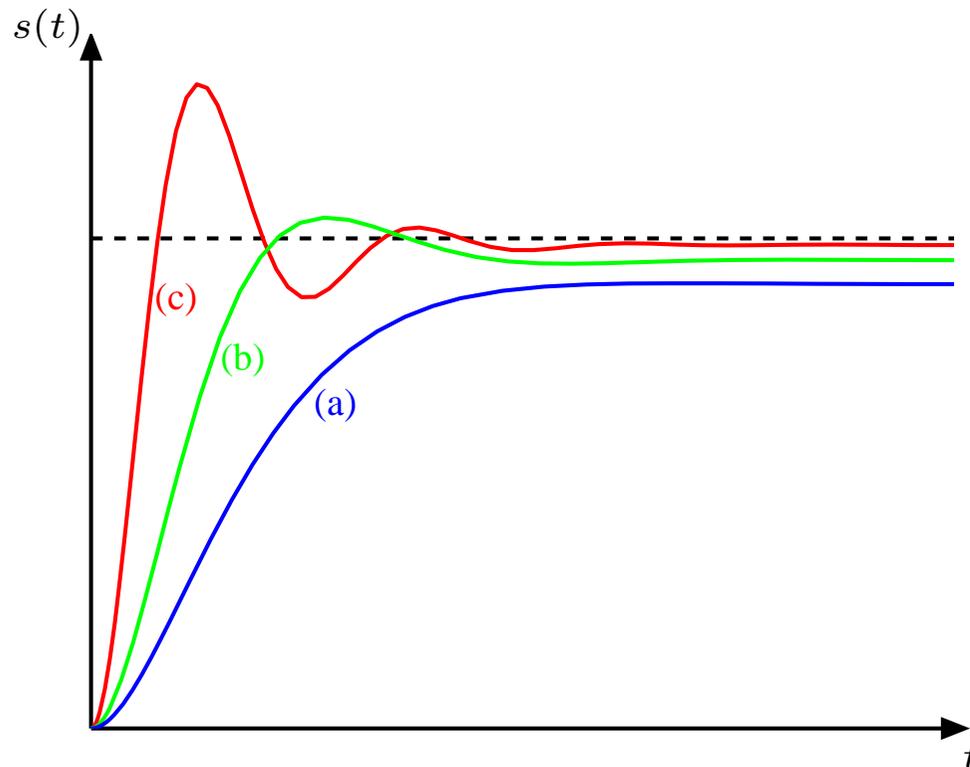
All'aumentare del guadagno K_p l'errore si riduce sempre di più \implies la retroazione è robusta rispetto a disturbi ed errori di modello.

Nota: l'errore può essere reso piccolo a piacere ma non nullo.

Cosa accade durante il transitorio? Applicando la seconda legge della dinamica:

$$m \ddot{s}(t) = -k s(t) - \beta \dot{s}(t) + F(t) - F_d.$$

Possibili andamenti di $s(t)$ sono i seguenti:



- (a): controllo ad azione diretta,
controllo in retroazione con $K_p = 1$
- (b): controllo in retroazione con $K_p = 10$
- (c): controllo in retroazione con $K_p = 50$

Osservazione: la retroazione può portare ad un comportamento non soddisfacente durante il transitorio e, addirittura, all'instabilità del sistema \implies occorre un compromesso tra prestazioni dinamiche e prestazioni statiche (a regime).

Progetto di un sistema di controllo

● **Riformulazione matematica del problema di controllo**

- definizione dei segnali corrispondenti alle grandezze fisiche interessate dal controllo
- determinazione di un modello matematico del sistema da controllare
- analisi del sistema (ad es. tramite *simulazione*)
- definizione delle specifiche di progetto

● **Sintesi della legge di controllo**

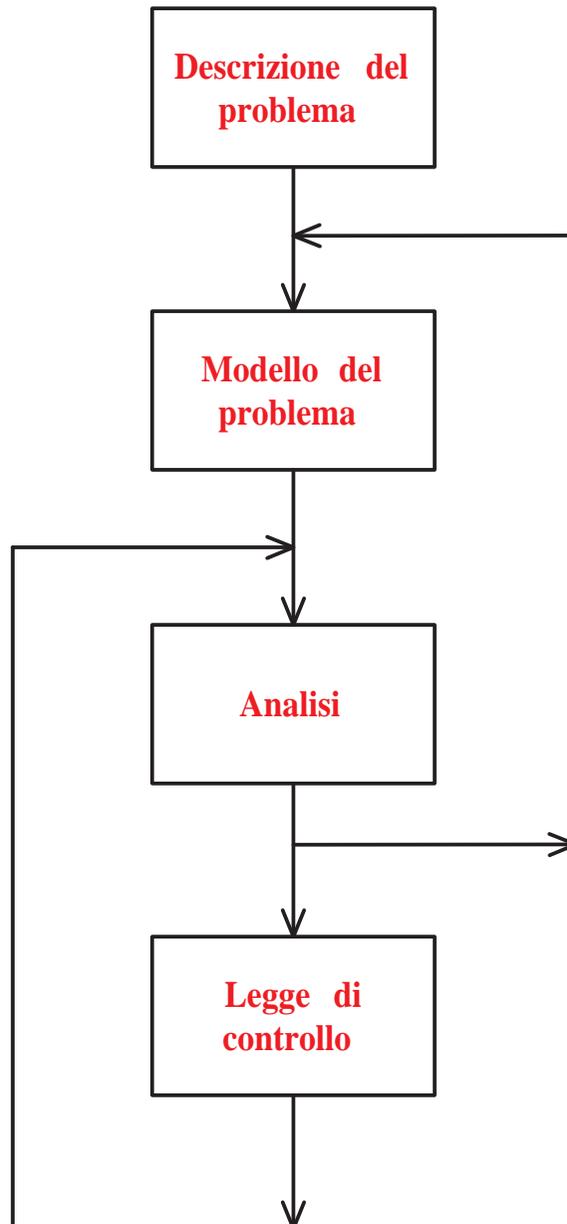
- determinazione del modello matematico del controllore (basata sul modello del sistema e sulle specifiche)
- analisi del sistema controllato (ad es. tramite *simulazione*)

● **Realizzazione del sistema fisico che implementa il controllo**

- scelta di sensori ed attuatori
- realizzazione del controllore
- catena di acquisizione ed attuazione

Osservazione: la sintesi viene spesso effettuata per tentativi, modificando eventualmente modello del sistema e specifiche.

Analisi del problema e progetto della legge di controllo



Modello del problema di controllo:

- modello matematico del sistema da controllare
- specifiche (che descrivono le esigenze imposte dal progettista)

Applicazioni dei controlli automatici

● Settori ingegneristici industriali

- settore manifatturiero: linee di assemblaggio (automobili, elettrodomestici), robot e macchine per la lavorazione ed il confezionamento
- settore chimico: petrolchimico, materie plastiche, cementifici
- settore energetico: centrali elettriche, sistemi di distribuzione dell'energia
- settore trasporti ed aeronautico: veicoli spaziali ed aerei, treni e metropolitane, navi

● Settori ingegneristici non industriali

- autoveicoli: servosterzo, servofreno, ABS, controllo di assetto, controllo dell'iniezione
- elettronica di consumo: macchine fotografiche, videocamere, telefoni cellulari, lettori di CD e DVD, periferiche per computer
- elettrodomestici: lavatrici, lavastoviglie, frigoriferi
- domotica: controllo remoto delle attività domestiche (favorito dallo sviluppo dei sistemi di comunicazione)

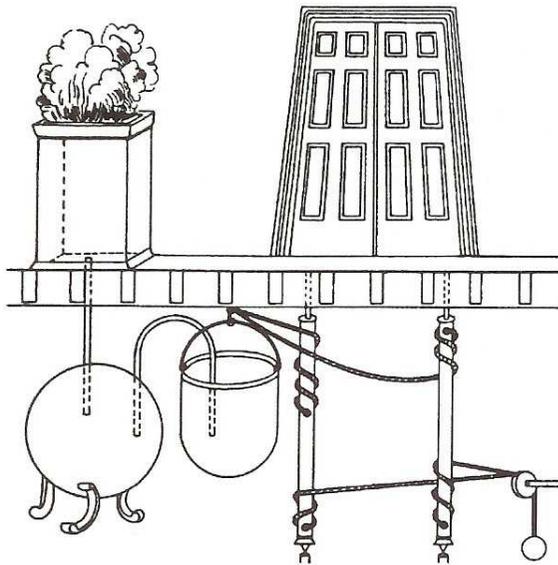
● Aree di sviluppo in settori non ingegneristici

- apparecchiature biomediche
- sistemi biologici
- ambiente e territorio
- sistemi socio–economici
- mercati finanziari
- marketing

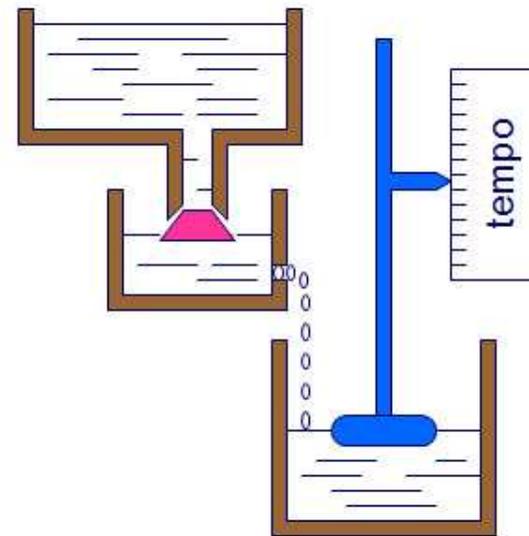
Esistono anche sistemi di controllo naturali. Ad esempio, all'interno del corpo umano vi sono “controllori naturali” che provvedono a: mantenere costante la temperatura corporea, mantenere costante la pressione arteriosa, fare in modo che il ritmo del battito cardiaco sia il più adeguato alle condizioni di sforzo cui l'organismo è sottoposto, consentire movimenti complessi delle varie parti del corpo senza perdita dell'equilibrio da parte dell'individuo, ...

Breve storia dei controlli automatici

- I primi dispositivi di controllo (ad azione diretta) erano utilizzati soprattutto per produrre stupore e meraviglia (Stratone di Lampsaca, III secolo a.C., Erone di Alessandria, I secolo d.C.). Un esempio è rappresentato dal ricettacolo della divinità.
- I primi dispositivi di controllo in retroazione documentati riguardano il controllo di livello, utilizzato anche nell'orologio ad acqua di Ctesibio (III secolo a.C.). Il meccanismo, utilizzato ancora oggi, è quello della valvola a galleggiante.

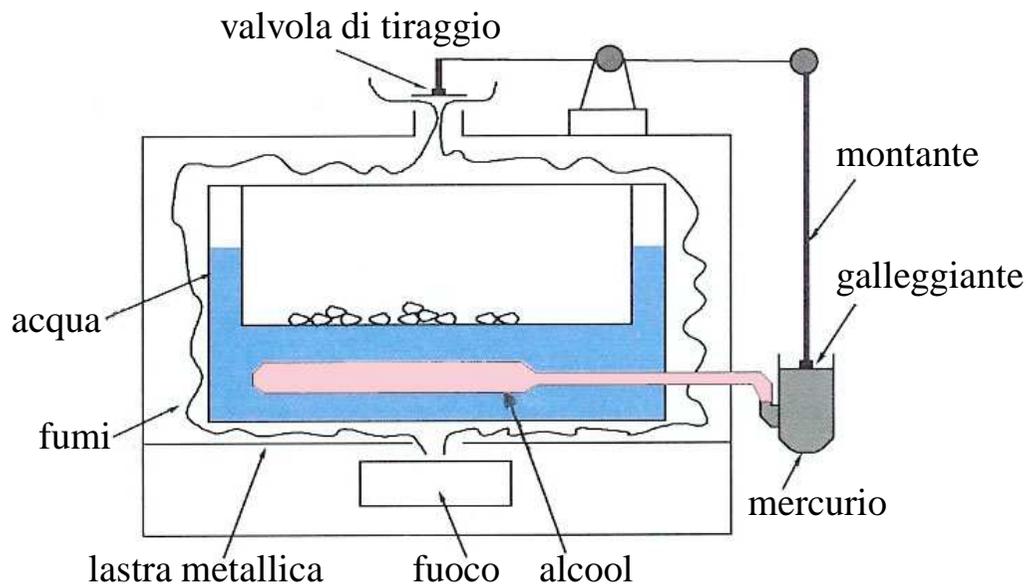


Ricettacolo della divinità

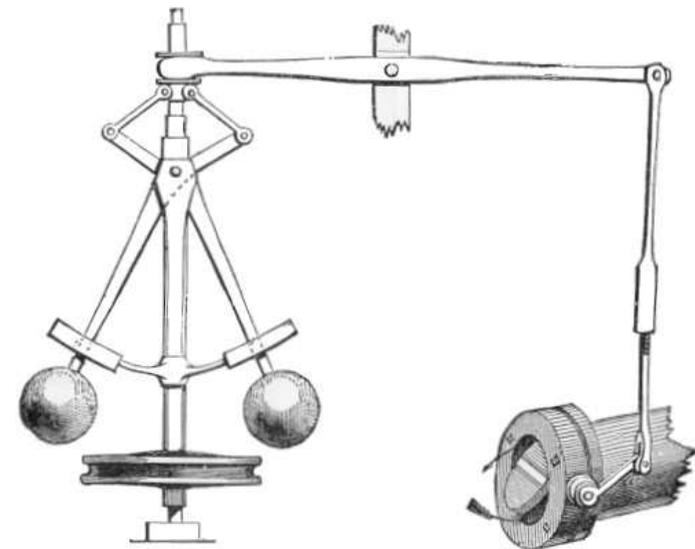


Orologio ad acqua

- Il primo sistema di controllo in retroazione dell'età moderna è, molto probabilmente, il regolatore di temperatura per incubatrice inventato da Cornelis Drebbel (1620). Forse, per la prima volta la retroazione viene realizzata intenzionalmente.
- Nel XVIII secolo assume una certa importanza il problema del controllo della velocità, prima per i mulini a vento e poi per la macchina a vapore. Il dispositivo più famoso è certamente il regolatore a sfere rotanti progettato, tra gli altri, da James Watt (1788).



Incubatrice per uova



Regolatore a sfere rotanti

- In seguito si svilupparono le prime teorie del controllo, basate su modelli descritti da equazioni differenziali. Tra i vari contributi si possono ricordare quelli di G.B. Airy (1840), J.C. Maxwell (1868), E.J. Routh (1877), A.M. Lyapunov (1893). In particolare, venne studiata a fondo la stabilità dei sistemi dinamici.
- Un altro importante capitolo nella storia dei controlli è quello relativo allo studio dei sistemi di pilotaggio automatico e di controllo di assetto. Da ricordare il contributo di E. Sperry che nel 1914 progettò un autopilota utilizzando i giroscopi.
- Una pietra miliare dello sviluppo dei controlli automatici è l'invenzione dell'amplificatore con retroazione negativa da parte di H.S. Black (1927). Tale invenzione consentì di risolvere in maniera soddisfacente il problema della costruzione di linee telefoniche per lunghe distanze. Per evitare un'eccessiva attenuazione del segnale era necessario amplificarlo periodicamente senza introdurre rumori e distorsioni intollerabili.
- Per quanto riguarda le metodologie basate sulla risposta frequenziale decisivi furono i contributi di Nyquist (1932) e Bode (1938).

- Nel 1948 W.R. Evans propone il metodo del luogo delle radici, applicabile sia nella progettazione sia nell'analisi della stabilità.
- Verso la fine degli anni '50 nasce la teoria del controllo moderno, basata sui modelli nello spazio degli stati. Importanti sono stati i contributi di L.S. Pontryagin (1956), R. Bellman (1957) e soprattutto R.E. Kalman (1960). Lo sviluppo di tale teorie venne stimolato dalla conquista dello spazio negli anni '60 e '70.

Occorre ricordare che un grande impulso per lo sviluppo dei controlli automatici fu l'avvento dei calcolatori elettronici (primi anni '50) che rese applicabili molte teorie già consolidate sul piano formale. Successivamente ha avuto una grande importanza lo sviluppo dei microprocessori (seconda metà anni '70) e dei DSP (seconda metà anni '80) che hanno consentito una diffusione generalizzata dei sistemi di automazione industriale e l'introduzione di sistemi di controllo in una moltitudine di apparati anche al di fuori delle applicazioni industriali.