

MASSIMILIANO VERONESI



REGOLAZIONE PID

TECNICHE DI TARATURA,
SCHEMI DI CONTROLLO,
VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI



NUOVA EDIZIONE

FrancoAngeli

Informazioni per il lettore

Questo file PDF è una versione gratuita di sole 20 pagine ed è leggibile con



La versione completa dell'e-book (a pagamento) è leggibile con Adobe Digital Editions. Per tutte le informazioni sulle condizioni dei nostri e-book (con quali dispositivi leggerli e quali funzioni sono consentite) consulta [cliccando qui](#) le nostre F.A.Q.



I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: www.francoangeli.it e iscriversi nella home page al servizio “Informatemi” per ricevere via e.mail le segnalazioni delle novità o scrivere, inviando il loro indirizzo, a “FrancoAngeli, viale Monza 106, 20127 Milano”.

MASSIMILIANO VERONESI

REGOLAZIONE PID

TECNICHE DI TARATURA,
SCHEMI DI CONTROLLO,
VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

NUOVA EDIZIONE

FrancoAngeli

**Per accedere all'allegato online è indispensabile
seguire le procedure indicate nell'area Biblioteca Multimediale
del sito www.francoangeli.it
registrarsi e inserire il codice EAN 9788835109686 e l'indirizzo email
utilizzato in fase di registrazione**

Progetto grafico di copertina di Alessandro Petrini

5ª edizione. Copyright © 2002, 2021 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore. L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni qui sotto previste. All'Utente è concessa una licenza d'uso dell'opera secondo quanto così specificato:

Indice

Premessa	pag.	9
1. L'anello di regolazione	»	13
1.1 Il problema del controllo	»	13
1.1.1 Terminologia della regolazione	»	14
1.1.2 Impostazioni e algoritmi	»	16
1.1.3 Prestazioni e specifiche	»	17
1.1.4 Funzioni di trasferimento	»	19
1.2 Gli altri componenti dell'anello di regolazione	»	26
1.2.1 Dispositivi di misura	»	26
1.2.2 Dispositivi di comando	»	31
2. L'algoritmo PID	»	35
2.1 Il campo di applicazione	»	35
2.2 Formulazioni e architetture	»	38
2.2.1 Realizzazioni in serie e in parallelo	»	39
2.2.2 Accorgimenti per l'azione derivativa	»	45
2.2.3 Peso sul <i>setpoint</i>	»	48
2.2.4 Formulazione a 2 gradi di libertà	»	51
2.2.5 Retroazione aggiuntiva per processi integrali	»	52
2.2.6 Desaturazione dell'azione integrale	»	52
2.2.7 Commutazione Automatico/Manuale	»	55
3. Tecniche di taratura	»	57
3.1 Regole di Ziegler-Nichols	»	62
3.1.1 Variante di Astrom	»	67
3.2 Cancellazione poli/zeri	»	69
3.3 Metodo di Haalman	»	72
3.4 Formule di Cohen-Coon	»	73
3.5 Tecniche CHR	»	74
3.6 Assegnamento dei poli	»	76

3.7 Ottimo simmetrico	pag.	78
3.8 Approccio a modello interno	»	79
3.9 La taratura SIMC	»	84
3.10 Tarature per reiezione disturbo	»	86
3.11 Tecniche di ottimizzazione	»	89
3.12 Assegnamento di pulsazione critica e margine di fase	»	94
3.13 I metodi “Kappa-Tau” e (A)Migo	»	99
3.14 Analisi di dettaglio di due casi semplici	»	102
4. Architetture di controllo	»	109
4.1 <i>Single-loop</i> semplice	»	109
4.1.1 Uscita a relè con isteresi	»	110
4.1.2 Uscita digitale tempo-proporzionale	»	110
4.1.3 Controllo di servovalvola	»	111
4.1.4 Uscita analogica singola	»	112
4.1.5 Uscita <i>split-range</i>	»	114
4.2 <i>Override</i>	»	116
4.3 <i>Feedforward</i>	»	117
4.4 Compensazione dei tempi morti	»	121
4.5 Controllo di rapporto	»	132
4.6 Controllo in cascata	»	137
4.7 Anelli interagenti	»	142
4.8 PID a parametri variabili	»	147
4.8.1 Controllo PID con supervisore <i>fuzzy</i>	»	150
4.9 Controllo adattativo	»	151
4.10 Strategie generali	»	156
5. Autosintonia	»	157
5.1 Risposta allo scalino	»	158
5.2 Risposta all’impulso	»	164
5.3 Azione proporzionale in anello chiuso	»	166
5.4 Metodo della retroazione a relè	»	168
5.5 Metodo dell’integrale costante	»	172
5.6 Identificazione ai minimi quadrati	»	176
5.7 Autosintonia per anelli in cascata	»	177
5.8 Autosintonia per il compensatore in anello aperto	»	179
5.9 Autosintonia per anelli interagenti	»	183
6. Il monitoraggio delle prestazioni	»	189
6.1 Prestazioni stocastiche	»	190
6.2 Prestazioni deterministiche	»	192

6.2.1 Prestazioni di reiezione del disturbo	pag.	193
6.2.2 Prestazioni di inseguimento del <i>setpoint</i>	»	195
6.2.3 Prestazioni del compensatore in anello aperto	»	197
7. Strumenti e sistemi di controllo industriali	»	201
7.1 Dall'analogico al digitale	»	201
7.2 I regolatori a microprocessore	»	205
7.2.1 PID discreto	»	206
7.2.2 Schema funzionale	»	214
7.2.3 Pacchetti di <i>loop tuning</i> e simulazione dinamica	»	216
7.3 I sistemi di controllo	»	218
7.3.1 PLC e SCADA	»	220
7.3.2 DCS	»	223
7.4 Sistemi ausiliari a corredo	»	230
7.4.1 Storicizzazione dati	»	230
7.4.2 Gestione allarmi	»	232
7.4.3 Gestione della manutenzione strumentale	»	234
Note conclusive e bibliografiche	»	237
Appendice 1. Il controllo predittivo	»	243
Appendice 2. L'eseguibile PID tutor	»	253

La potenza è nulla senza il controllo

Slogan di una nota marca di pneumatici

Premessa

Una buona tecnica di regolazione risulta spesso determinante al fine di garantire un buon rendimento del processo produttivo e/o una buona qualità del prodotto stesso ed è abbastanza ragionevole ritenere che l'algoritmo PID (Proporzionale-Integrale-Derivativo), nelle sue numerose varianti, gestisca attualmente almeno il 90% degli anelli di regolazione presenti negli impianti.

Le ragioni del suo successo vanno imputate a un rapporto costi/benefici difficilmente raggiungibile con altre tecniche. La sua buona adeguatezza nel controllo di una vasta gamma di processi industriali, in relazione alle spesso poco stringenti specifiche di prestazione e alle modeste caratteristiche degli impianti, ne hanno consentito l'applicazione su larga scala. La possibilità di essere agevolmente realizzato con diverse tecnologie (meccanica, idraulica, pneumatica, elettronica analogica o digitale) gli ha consentito di essere impiegato dagli albori dell'automazione fino ai giorni nostri. La diffusione capillare ha portato in breve i vantaggi economici della standardizzazione (economie di scala per i produttori, costi di progetto e manutenzione e gestione delle scorte per gli utilizzatori), che si sono tradotti poi a loro volta in motivi di largo consumo.

Nonostante questa enorme diffusione, l'algoritmo però risulta tuttora conosciuto e sfruttato solo parzialmente: l'azione derivativa risulta spesso disabilitata e gli altri parametri dell'algoritmo tarati in modo da ottenere prestazioni piuttosto mediocri; per contro il continuo progresso delle tecnologie elettroniche e informatiche metterebbe a disposizione la flessibilità necessaria per realizzare, anche con la strumentazione da quadro, algoritmi e architetture di controllo fino a pochi anni fa esclusivo dominio di complessi sistemi distribuiti.

Tutto ciò risulta parzialmente in contrasto con il fatto che, nei testi didattici sulla materia, solo una breve sezione è dedicata all'algoritmo PID mentre la maggior parte dell'attenzione viene posta su metodologie di controllo più complesse e raffinate ma, per contro, un po' meno utilizzate.

Questo libro invece riprende in un quadro organico la vasta letteratura scientifica e tecnologica in materia (quasi sempre in lingua inglese) e, presentando i fondamenti teorici dell'algoritmo PID e le sue principali applicazioni pratiche

(con particolare riferimento al controllo dei processi continui), fornisce così gli elementi per un approfondimento dedicato. Non mancano peraltro anche alcuni recenti spunti di approfondimento derivanti dagli studi dell'autore.

Non sono richieste particolari competenze se non una infarinatura sulle basi dell'informatica e dell'automazione, nonché una preparazione matematica generalmente fornita al primo anno delle più comuni facoltà scientifiche, se non già negli ultimi anni della scuola superiore.

Nel Capitolo 1 vengono fornite le basi matematiche necessarie per affrontare la trattazione; inoltre, allo scopo di inquadrare l'argomento in maniera più organica, vengono forniti anche i fondamenti relativamente a dispositivi di misura e comando che, insieme al regolatore PID, costituiscono i componenti dell'anello di regolazione.

Nel Capitolo 2 vengono analizzate nel dettaglio le diverse varianti dell'algoritmo ponendo particolare attenzione agli accorgimenti anti-“carica integrale”, a quelli per un corretto utilizzo dell'azione derivativa e infine alle architetture a due gradi di libertà.

Nel Capitolo 3 vengono prese in rassegna alcune delle innumerevoli tecniche di taratura dei parametri con l'ausilio di numerose simulazioni al calcolatore; particolare enfasi viene posta sul dualismo tra le prestazioni di inseguimento del *set-point* e quelle di reiezione del disturbo sul carico, nonché su quello tra robustezza e reattività del controllore.

Nel Capitolo 4, vengono presentate le più tipiche applicazioni nelle quali il PID figura spesso come componente di una architettura di controllo più complessa (controllo di rapporto, controllo in cascata, controllo adattativo, disaccoppiamento).

Nel Capitolo 5 vengono discusse le principali metodologie di auto-sintonia, basate sulle diverse tecniche di riconoscimento del sistema a partire dalla rilevazione del comportamento del processo da controllare. Contributi recenti sono riportati in merito all'autosintonia per schemi di controllo in cascata e per anelli interagenti.

Nel capitolo 6 si tratta del monitoraggio delle prestazioni, un tema al quale la ricerca in automatica ha dedicato numerose investigazioni nell'ultimo decennio a causa della sua rilevanza emersa proprio in ambito industriale.

Infine, il Capitolo 7 costituisce una introduzione a strumenti e sistemi di controllo digitale, dal semplice regolatore a microprocessore al complesso sistema di controllo distribuito. È questo infatti il contesto tecnologico nel quale l'algoritmo PID viene attualmente implementato.

Interessante anche la digressione (in Appendice) concessa al controllo predittivo che, pur non essendo basato sull'idea del PID, rappresenta una tecnica utilizzata nelle applicazioni più avanzate, tipicamente nel settore petrolchimico.

Un'ulteriore appendice è dedicata all'eseguibile **PIDTutor**, abbinato all'acquisto del volume. Si tratta di un semplice eseguibile, concepito dall'autore e, dalla III edizione, realizzato da Cristian Paganessi nell'ambito della sua tesi di laurea, che riprende alcuni degli argomenti trattati nel testo insieme con articoli e contributi disponibili per gli approfondimenti.

Il testo è pertanto adatto a studenti e professionisti che intendano approfondire la conoscenza delle tecniche di regolazione basate sull'algoritmo PID, vero e proprio componente base per ogni sistema di controllo.

La crescente diffusione dei processi "batch", determinando l'impiego ripetuto di medesimi macchinari e/o parti di impianto per scopi diversi, aumenta l'importanza delle condizioni transitorie nel processo e con esse l'esigenza di farle durare il meno possibile e gestirle al meglio. Sull'altro fronte, l'avvento dei bus di campo (*fieldbus*) ha introdotto un grado di libertà in più nell'architettura dei sistemi di controllo, consentendo all'algoritmo PID di essere implementato direttamente a bordo dei dispositivi di comando e di misura. Queste tendenze, unitamente a quelle sempre presenti di ottimizzazione e massimizzazione dell'efficienza produttiva, determinano una crescente necessità di integrare sempre più la progettazione del processo e del controllo e si è inteso, con il presente volume, fornire la preparazione necessaria per affrontare queste nuove sfide.

I ringraziamenti dell'autore vanno innanzi tutto a YOKOGAWA Italia, il cui interessamento per i contenuti trattati nel libro ne ha reso possibile la pubblicazione della prima edizione.

Un ringraziamento doveroso quanto sincero, va all'amico e compagno nella ricerca Antonio Visioli, senza la cui collaborazione il presente volume non avrebbe potuto essere realizzato. Egli ha revisionato le mie bozze, scovando alcune imprecisioni e fornendo validi spunti di approfondimento; anche suo, in particolare, il contributo riguardante il controllo predittivo. Soddisfatto del risultato, ha poi deciso di includere il presente volume tra quelli di ausilio alla didattica, per i suoi insegnamenti nella Facoltà di Ingegneria dell'Università di Brescia, con la quale mi onora di collaborare tenendo qualche seminario proprio sulla regolazione PID e sui sistemi di controllo utilizzati nell'industria.

Un affettuoso ringraziamento va infine anche a mia moglie Lucia, per la gentile comprensione con la quale ha pazientemente tollerato qualche ora di troppo da me trascorsa al calcolatore.

1. L'anello di regolazione

*Aequam memento rebus
in arduis servare mentem**

1.1 Il problema del controllo

L'obiettivo di un'azione di regolazione (o di controllo) può essere definito come quello di cercare di portare un sistema a comportarsi in un modo desiderato sulla base delle misure del suo stato attuale e agendo in modo opportuno (si veda la figura 1.1).

L'oggetto dell'azione di controllo può appartenere a diversi contesti (meccanico, biologico, socio-economico) ma in genere le applicazioni più tipiche si trovano nell'ambito dei processi industriali.

Generalmente, dovendo formalizzare il problema, l'obiettivo viene espresso da un insieme di valori di riferimento di certe variabili (variabili da controllare) mentre le azioni si attuano conferendo certi valori ad altre variabili (variabili di controllo) sulla base dell'errore evidenziato dal confronto tra obiettivo e situazione attuale.

Il sistema da controllare viene spesso descritto con l'ausilio di un modello matematico desunto dalle leggi fisiche che ne esprimono il comportamento. Dato che in generale si tratta di equazioni differenziali i modelli impiegati sono sistemi dinamici. In alternativa è possibile desumerne uno in forma discreta (equazioni alle differenze) attraverso tecniche di identificazione parametrica a partire dai dati misurati.

Il controllore deve comunque, a ogni istante e sulla base dell'informazione disponibile, determinare il valore da attribuire alle variabili di controllo in modo tale che l'andamento delle variabili controllate sia, malgrado l'influenza di disturbi imprevedibili, il più possibile simile a quello desiderato.

La presenza di incertezza nella modellizzazione e di disturbi non misurabili nel sistema da controllare spesso impone che l'obiettivo possa essere raggiunto solo attraverso lo schema della retroazione (*feedback*) illustrato in figura 1.2. La

* "Ricorda di mantenere l'equilibrio nelle difficoltà", Orazio, *Odi*, II, 3, 1-2.

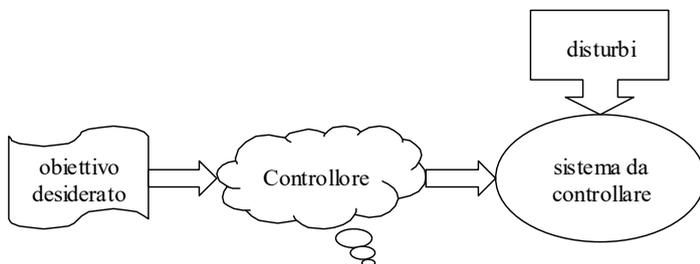


Figura 1.1 – Il problema del controllo

misura dell’effetto sortito risulta infatti essenziale al fine di determinare il miglior valore successivo della variabile di controllo.

Lo scopo di un buon sistema di controllo è quello di portare a zero l’errore a regime e di ottenere ciò nel minor tempo possibile, limitando al massimo l’entità degli scostamenti della variabile controllata intorno al valore di riferimento e cercando di contenere anche le oscillazioni della variabile di controllo, che si ripercuotono sugli organi di comando.

Un sistema di controllo dovrebbe essere inoltre in grado di garantire sia un buon raggiungimento degli obiettivi che una buona reiezione dei disturbi nel più ampio ventaglio possibile di situazioni operative ovvero per il più ampio intervallo di valori dei parametri che descrivono il processo da controllare. La “robustezza” di una legge di controllo è una misura proprio della capacità di far fronte alle diverse condizioni di lavoro garantendo le prestazioni desiderate.

1.1.1 Terminologia della regolazione

La simbologia della regolazione che si trova nella letteratura accademica è diversa da quella abitualmente in uso in ambito industriale, ma i concetti sono ovviamente gli stessi. Nel corso di questo testo si farà uso indistintamente delle due notazioni, adatte rispettivamente a descrivere schemi concettuali di controllo o strutture di regolazione su impianti reali (si veda la figura 1.3).

La variabile da controllare, indicata generalmente con y , si simboleggia con PV (*Process Variable*, ovvero il valore della variabile di processo) mentre il relativo valore di riferimento y° diventa SV (*Setpoint Value*); la variabile di controllo u è infine l’omologo di MV (*Manipulated Variable*, ovvero variabile manipolabile).

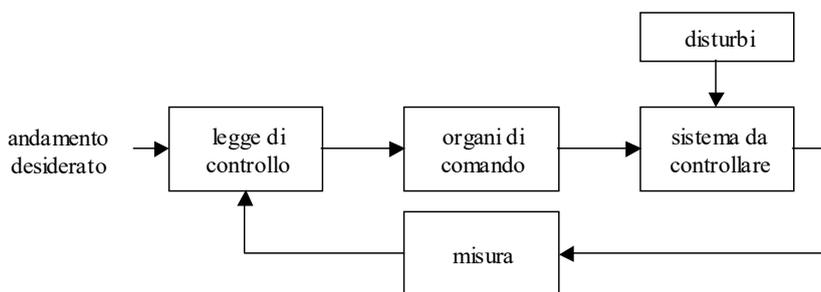


Figura 1.2 – Lo schema della retroazione

È inoltre opportuno spiegare brevemente il significato di acronimi che si incontrano frequentemente nei diagrammi P&ID (*Process and Instrumentation Diagram*), utilizzati in ambito industriale, sui quali sono riportati sia l'impianto (serbatoi, tubi, valvole) che gli strumenti deputati al controllo (misuratori, regolatori, indicatori). In genere un regolatore è generalmente indicato con una sigla XIC ove:

X = lettera che indica il tipo di variabile controllata (F per *Flow*, P per *Pressure*, T per *Temperature*, ecc.)

I = *Indicator* (non sempre presente)

C = *Controller*

Per quanto riguarda l'analisi delle prestazioni di un sistema di controllo, in riferimento alla figura 1.4, rimangono inoltre comunemente in uso i seguenti termini:

- ◇ Regime (*steady-state*): situazione corrispondente all'equilibrio del sistema da controllare.
- ◇ Transitorio (*transient*): situazione temporanea di passaggio da uno stato di equilibrio a un altro.
- ◇ Tempo morto (*dead time*) θ : tempo necessario per osservare un significativo scostamento della variabile da controllare dalla banda di rumore in seguito a una variazione della variabile di controllo.
- ◇ Tempo di salita (*rise time*) T_s : tempo necessario perché la variabile da controllare si sposti dal 10% al 90% del valore di regime.

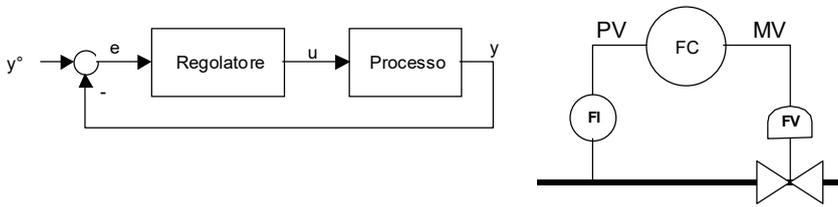


Figura 1.3 – Schema a blocchi e P&I Diagram

- ◇ Tempo di assestamento (*settling time*) T_a : tempo necessario perché la variabile da controllare rimanga sufficientemente prossima al *setpoint* (entro una banda usualmente fissata a $\pm 2\%$).
- ◇ Tempo di risposta: somma del tempo morto e del tempo di assestamento.
- ◇ Sovraelongazioni (*overshoot*): scostamenti della variabile da controllare dal *setpoint* durante il transitorio.
- ◇ Rapporto di decadimento (*decay ratio*): rapporto tra le ampiezze delle prime due sovravelongazioni successive.

1.1.2 Impostazioni e algoritmi

Benché le prime applicazioni pratiche della retroazione possano essere fatte risalire all’inizio del XVII secolo (incubatrice di Van Drebbel) e forse anche al I secolo dopo Cristo (vaso di Erone), la nascita di una vera e propria teoria del controllo può essere identificata con la pubblicazione (1868) da parte di James Clerk Maxwell dell’articolo “On governors” nel quale il famoso fisico analizzava la regolazione di velocità a sfere rotanti concepita un’ottantina di anni prima da James Watt per le macchine a vapore.

Da allora, la teoria ha proposto numerosi approcci al problema, basati sull’analisi in frequenza del comportamento del sistema in anello chiuso, su metodi statistici di minimizzazione dell’errore (controllo predittivo), su metodi analitici di ottimizzazione (controllo ottimo e lineare-quadratico).

L’impostazione “classica” del problema si basa su relazioni ingresso-uscita dei sistemi dinamici che descrivono il comportamento dei processi e dei regolatori. Tali descrizioni vengono modellizzate dalle funzioni di trasferimento associate ai vari blocchi, ricavate da opportune trasformazioni delle equazioni differenziali in gioco. Un’impostazione “moderna” del problema fa invece ricorso a una modellistica ingresso-stato-uscita nel dominio del tempo più adatta a incorporare equazioni di vincolo e ottimizzazioni di funzionali.

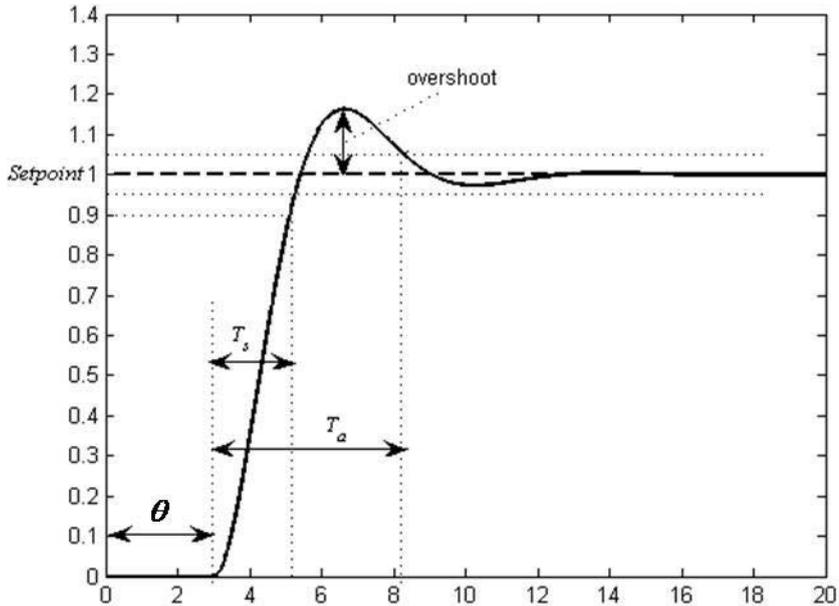


Figura 1.4 – Significato della terminologia utilizzata

Tuttavia l'idea di base è sempre quella di confrontare un *setpoint* prefissato (o predetto) con l'andamento delle variabili da controllare e di elaborare opportunamente tale errore secondo una legge (o algoritmo) di controllo determinata sulla base delle caratteristiche (statiche e dinamiche) del sistema da controllare e di opportune specifiche da soddisfare.

1.1.3 Prestazioni e specifiche

Le prestazioni prescritte a un sistema di controllo sono svariate e non sempre possono essere soddisfatte contemporaneamente. È bene pertanto individuare quali risultano essere le più stringenti e importanti per il processo sotto controllo e orientare gli sforzi progettuali verso di esse.

Le più tipiche sono le seguenti.

- ◆ Stabilità: è necessario che il regolatore sia in grado di smorzare le oscillazioni del processo e di costituire, insieme con esso, un sistema stabile in anello chiuso.
- ◆ Errore nullo a regime: è necessario che il regolatore faccia sì che la variabile di processo eguagli, a regime, il *setpoint* impostato.
- ◆ Rapidità di risposta alle variazioni di *setpoint*: è presumibile ritenere che il regolatore sia in grado di abbreviare il più possibile i tempi di raggiungimento del nuovo equilibrio e di mantenerlo nonostante l'azione di disturbo rappresentata da altre variabili che influenzano la variabile da controllare.
- ◆ Rapidità di risposta ai disturbi sul carico: è opportuno che il regolatore sia in grado di far fronte con prontezza ed efficacia a eventuali disturbi additivi in ingresso al processo (che quindi hanno un effetto simile a quello della variabile di controllo).
- ◆ Scarse e limitate sovraelongazioni: è preferibile che il regolatore sia in grado di contenere il più possibile ampiezza e frequenza delle oscillazioni della variabile di processo attorno al *setpoint* durante il transitorio.
- ◆ Robustezza contro le non linearità: è auspicabile che il regolatore sia in grado di fornire prestazioni non troppo degradate a fronte del comportamento tipicamente non lineare degli organi di comando.
- ◆ Robustezza contro le variazioni parametriche: è opportuno che il regolatore sia in grado di fornire prestazioni non troppo degradate a fronte di variazioni dei parametri descrittivi del processo (densità, calori specifici, punto di lavoro, ecc.).
- ◆ Robustezza contro il rumore: è necessario che il regolatore sia in grado di filtrare sufficientemente il rumore che affligge le misure in modo da prendere provvedimenti a fronte di effettive variazioni del segnale e non per colpa dei disturbi.
- ◆ Moderazione nelle variazioni della variabile di controllo: è preferibile che il regolatore generi un andamento non troppo oscillante per la variabile di controllo in modo da non sollecitare troppo bruscamente gli organi di comando che andrebbero altrimenti incontro a precoce usura.

Tutte queste specifiche possono essere quantificate attraverso l'imposizione di opportuni vincoli nel progetto della legge di controllo. Per far ciò è necessario però pagare un duro prezzo in termini di formalizzazione matematica del problema in esame.

1.1.4 Funzioni di trasferimento

La teoria del controllo ha proposto, nel corso dei decenni, numerosi strumenti matematici utili per l'analisi dei sistemi dinamici sia in ambito deterministico che stocastico. I più impiegati risultano essere senz'altro quelli basati sulla trasformazione secondo Laplace delle equazioni che descrivono il comportamento dinamico del sistema. In particolare, un sistema viene comunemente descritto mediante la sua funzione di trasferimento, definita come il rapporto tra la trasformata di Laplace dell'uscita corrispondente a condizioni iniziali nulle e la trasformata di Laplace dell'ingresso.

La trasformazione di Laplace delle variabili in gioco consente di riscrivere le equazioni differenziali come semplici equazioni algebriche (estremamente più maneggevoli) ma nella variabile complessa "s".

Non essendo scopo di queste pagine addentrarsi nei dettagli di questo utile strumento matematico (si veda per esempio [Bolzern, Scattolini, Schiavoni] per un corso completo di fondamenti di automatica), basti qui ricordare che valgono le seguenti relazioni:

- ◆ Definizione (in relazione a un segnale $x(t)$): $\Lambda[x(t)] = \int_0^{+\infty} x(t)e^{-st} dt$
- ◆ Trasformata dell'impulso: $\Lambda[imp(t)] = 1$
- ◆ Trasformata dello scalino: $\Lambda[sca(t)] = 1/s$
- ◆ Trasformata della rampa: $\Lambda[ram(t)] = 1/s^2$
- ◆ Trasformata dell'esponenziale: $\Lambda[e^{at}] = 1/(s-a)$
- ◆ Trasformata del coseno: $\Lambda[\cos(\omega t)] = s/(s^2 + \omega^2)$
- ◆ Trasformata del seno: $\Lambda[\sin(\omega t)] = \omega/(s^2 + \omega^2)$
- ◆ Trasformata della derivata: $\Lambda\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = s \cdot \Lambda[x(t)] - x(0)$
- ◆ Trasformata dell'integrale: $\Lambda\left[\int_0^t x(\tau) d\tau\right] = \frac{1}{s} \cdot \Lambda[x(t)]$
- ◆ teorema del valore iniziale: $x(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot \Lambda[x(t)]$
- ◆ teorema del valore finale: $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Lambda[x(t)]$

Normalmente, per maggiore praticità, si indica $X(s) = \Lambda[x(t)]$ e si può anche dimostrare che $\Lambda[e^{at}x(t)] = X(s-a)$.

La relazione tra l'ingresso u e l'uscita x di un sistema da controllare può generalmente essere espressa tramite una equazione differenziale, spesso lineare e del primo ordine come per esempio

$$\frac{dx(t)}{dt} = ax(t) + bu(t)$$