



Università degli Studi di Parma
Facoltà di Scienze MM. FF. NN.
Corso di Laurea in Informatica

Silvia D'Addezio
Giulio Destri

INTRODUZIONE A SISTEMI, AUTOMI, SCHEMI A BLOCCHI

AREA PROFESSIONAL

Collana "I quaderni di Area Professional"



Licenza Creative Commons Attribution 3.0 Unported– 2010
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

URL originale: http://www.areaprofessional.net/documenti/sistemi_automi.pdf

INTRODUZIONE: IL CONTESTO DEI SISTEMI

Il mondo reale è per sua natura complesso e le organizzazioni umane lo sono in modo particolare. Per potere comprendere e gestire la realtà è indispensabile sviluppare metodologie di **modellazione** della realtà, atte a creare *modelli semplificati* della stessa, evidenziandone le caratteristiche di interesse in relazione allo scopo della analisi e al contesto.

La realtà: sistemi e modelli

Un sistema è un *insieme di elementi distinti, in relazione fra di loro secondo leggi ben precise, che concorrono al raggiungimento di un obiettivo comune, oppure di una evoluzione comune*. I sistemi possono essere classificati in base alla loro origine, per esempio definendo l'esistenza di:

- Sistemi naturali
- Sistemi artificiali
- Sistemi misti.

I sistemi possono essere suddivisi in componenti, ciascuno dei quali ha una sua struttura e può essere un sistema esso stesso. La realtà può quindi essere vista come un macrosistema, suddivisibile in tanti sottosistemi, aventi struttura più o meno complessa.

Per potere capire e padroneggiare la realtà, occorre modellarla. Un **modello**, ossia il prodotto del processo di modellizzazione o modellazione, è una *semplificazione* della realtà, che si ottiene riducendo le caratteristiche in esame e considerando solo quelle utili al fine dello scopo (es. progetto considerato/analisi in corso).

In pratica un modello è una *rappresentazione* del sistema stesso che, pur avendo forma e natura diverse da esso, ne conserva ed evidenzia in modo analogico alcune caratteristiche particolarmente significative per l'analisi. Ad esempio, possiamo considerare i modelli matematici dell'atmosfera usati per le previsioni meteorologiche, i modelli statistico-matematici usati per le previsioni degli andamenti nei mercati azionari, i modelli iconici usati nei progetti degli edifici e dei componenti meccanici (es. CAD).

I modelli ci aiutano a "visualizzare" un sistema come è o come vorremmo che fosse, ci permettono di specificare la struttura o il comportamento di un sistema e *documentano* le decisioni che abbiamo preso nel corso della loro definizione. Per esempio, se consideriamo l'insieme dei parametri che servono a definire e descrivere un cliente nel settore dell'industria cosmetica o nel settore bancario, essi conducono a modelli completamente diversi del cliente, ottimizzati e dipendenti dallo scopo per cui il processo di modellazione viene fatto.

Per potere arrivare ai modelli si possono identificare almeno i seguenti passi:

- Definire l'obiettivo della modellazione
- Identificare il sistema e le parti interessanti ed i suoi confini (boundary)
- Definire i vincoli
- Generare un modello di massima che ponga in evidenza le relazioni fra le parti del sistema
- Formalizzare completamente il sistema, raffinando il modello per passi successivi
- Usare il modello (es. per una simulazione).

Per sistemi reali non banali, spesso non si realizza un solo modello, ma un piccolo insieme di modelli, che possono essere costruiti e studiati separatamente, ma che sono strettamente intercorrelati. Poiché la mente umana può elaborare contemporaneamente solo un numero limitato di cose, se il modello non è ben fatto, si possono avere troppi dettagli, alcuni dei quali sfuggono all'attenzione dell'osservatore, o pochi dettagli, con conseguente mancanza di conoscenza e imprecisione del modello stesso.

Un procedimento analitico che cerca di essere indipendente dal singolo ambiente di applicazione e che tende prevalentemente a costruire un modello universale applicativo in qualsiasi ambito, purché a parità di condizioni, si chiama **Processo di Astrazione**.

L'analisi può essere compiuta in approccio Top-down, compiendo una scomposizione di un sistema per passi successivi in sottosistemi sempre più elementari o in approccio Bottom-up, attraverso la costruzione di un sistema complesso per composizione successiva di sistemi elementari. Molto spesso gli analisti esperti usano entrambi gli approcci sullo stesso sistema reale. Inoltre il modello deve essere valido per il contesto in cui si opera e, nel caso serva come base per un confronto di idee, deve anche essere adattato all'interlocutore del momento e le sue parti denominate con un linguaggio appropriato al contesto della comunicazione. Vanno quindi presi in considerazione aspetti diversi in momenti diversi e a diversi livelli di dettaglio. L'uso dei modelli è stato introdotto ormai da decenni nelle discipline scientifico-economiche, ed è stato codificato nella Teoria dei Sistemi o Scienza dei Sistemi, ove si afferma che "per quanto sia complesso o diversificato il mondo della nostra esperienza, potremo sempre trovare in esso vari tipi di organizzazione, che possono essere descritti per mezzo di principi comuni" [PCE 2002]. L'approccio sistemico si distingue dal più tradizionale approccio analitico, in quanto privilegia l'interazione e la connessione delle differenti componenti di un sistema.

Un modello estremamente utile è il cosiddetto modello a "scatola nera" (black-box), rappresentato in figura 1.1, in cui un osservatore esterno non conosce la struttura interna di un sistema, ma ne rappresenta il comportamento, osservando ciò che entra nel sistema (input) e ciò che ne esce (output).

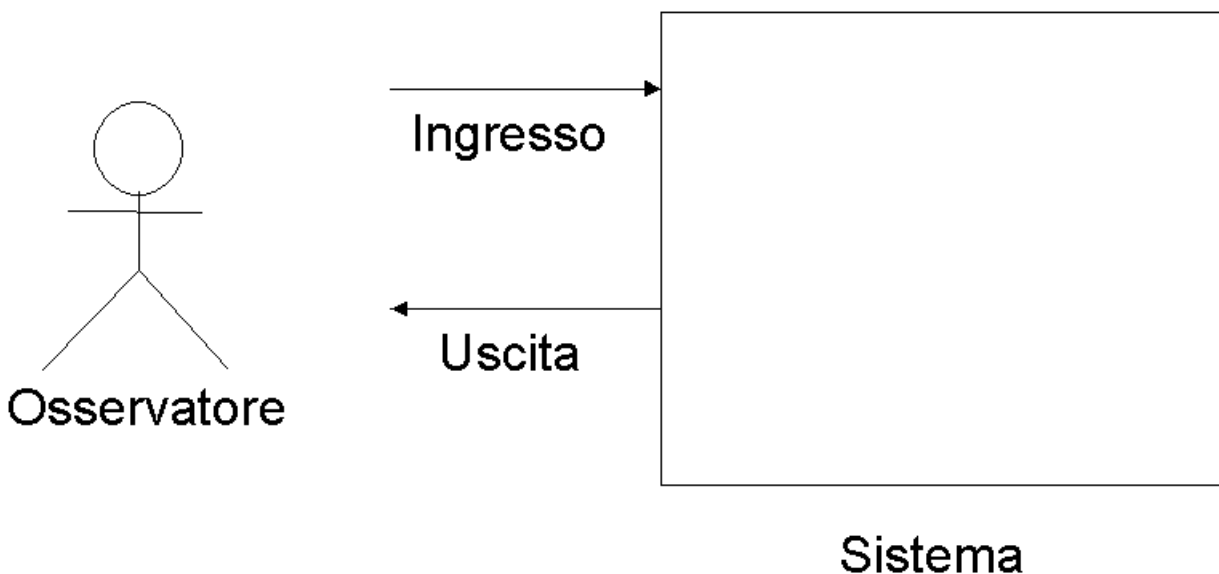


Figura 1.1: Il modello a scatola nera di un sistema, di cui non è nota, o non si intende considerare, la struttura interna, ma solo ciò che entra e ciò che esce, ossia le sue comunicazioni con il mondo esterno.

UN MODELLO GRAFICO PER UN SISTEMA: LO SCHEMA A BLOCCHI

Definizione di Blocco

Un blocco è essenzialmente la rappresentazione grafica di un sistema, rappresentato in figura 2.1, dove la funzione F del sistema, detta **funzione di trasferimento**, esprime il legame fra l'ingresso I del sistema e l'uscita U : $U = F(I)$.

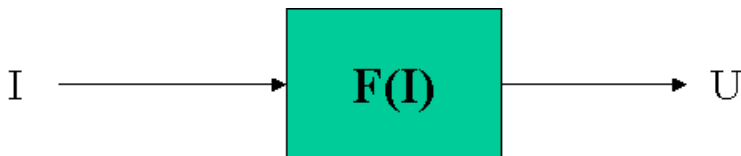


Figura 2.1: la rappresentazione a blocchi.

La funzione indicata in figura 2.1 può essere di qualsiasi tipo, lineare e non. Nella maggior parte dei casi però si usano sistemi lineari e quindi blocchi lineari, in cui la rappresentazione diventa quella di figura 2.2, dove la funzione di trasferimento prende la forma: $U = AI$.



Figura 2.2: la rappresentazione a blocchi lineari.

Schemi a blocchi

Gli schemi a blocchi funzionali sono una rappresentazione grafica del modello matematico di un sistema fisico. Un sistema, quindi può essere rappresentato con una serie di blocchi funzionali la cui struttura può essere più o meno complessa. Con opportuni operazioni basate sull'algebra degli schemi a blocchi si può ridurre lo schema del sistema ad un unico blocco equivalente che rappresenta la funzione di trasferimento del sistema. I simboli e le configurazioni utilizzati negli schemi a blocchi sono i seguenti, con accanto la relativa funzione matematica associata.

Nodo sommatore

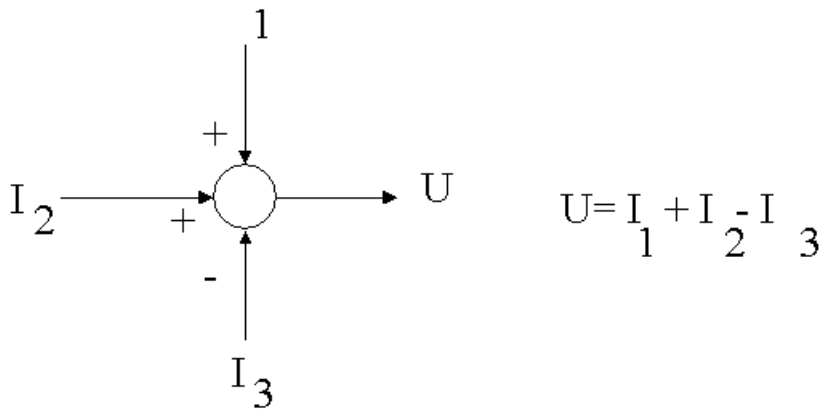


Figura 2.3: il nodo sommatore; i segni con cui i vari rami contribuiscono all'uscita sono indicati graficamente accanto ai rami stessi.

Nodo derivatore o punto di diramazione

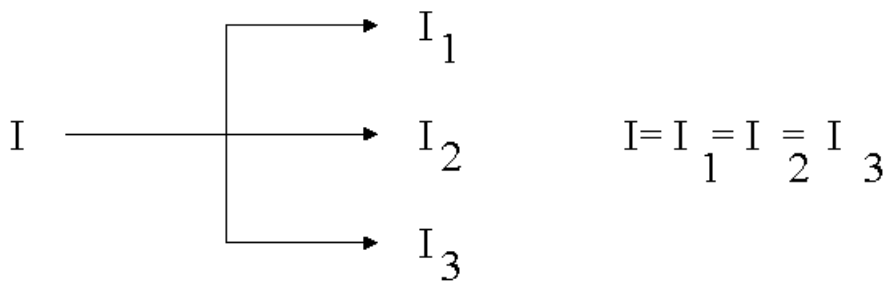
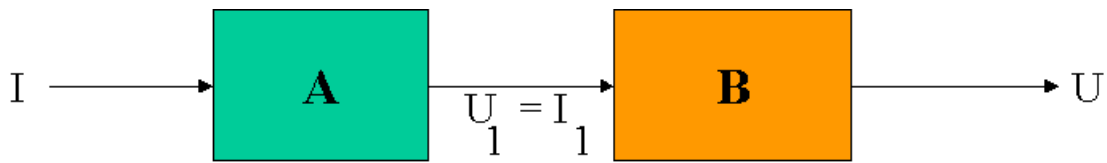


Figura 2.4: il nodo derivatore; si noti che, a differenza delle correnti, qui tutti i valori in uscita sono uguali fra loro.

Blocchi in cascata o in serie



$$U = BI_1 = ABI$$

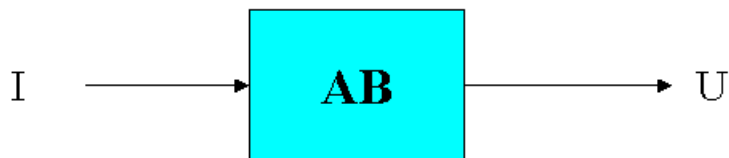
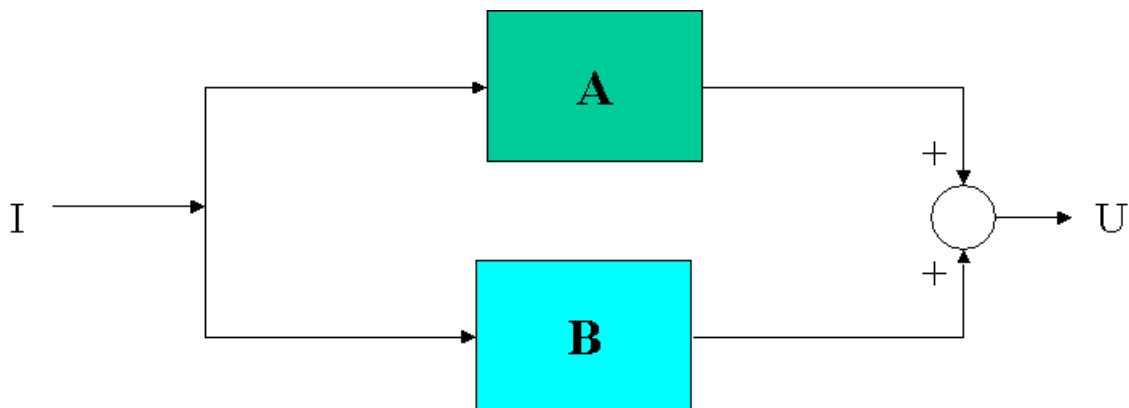


Figura 2.5: due blocchi in cascata sono equivalenti a un blocco con funzione di trasferimento data dal prodotto delle singole funzioni.

Blocchi in parallelo



$$U = AI + BI = (A+B)I$$

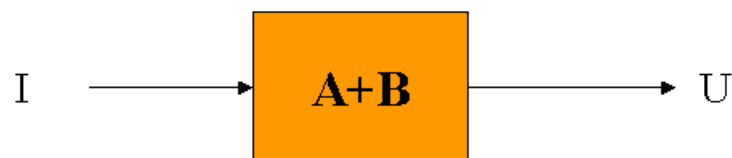
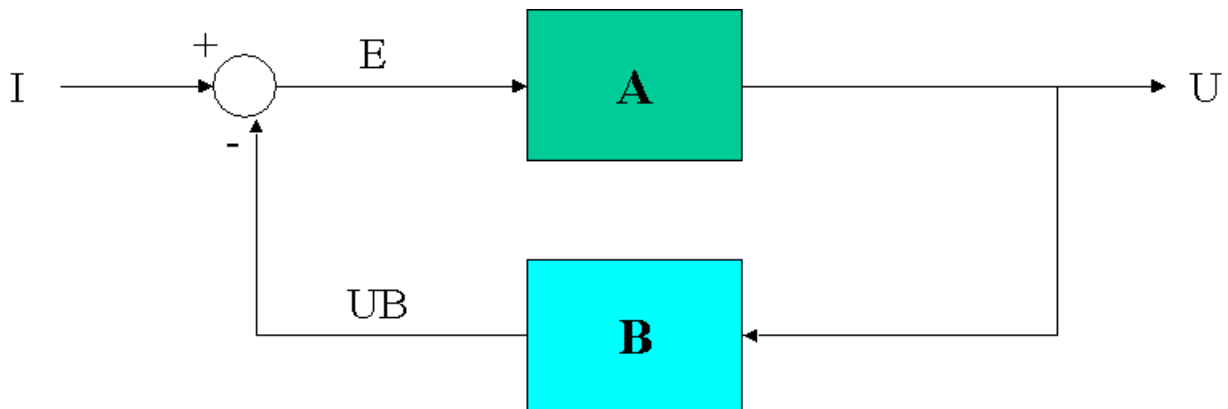


Figura 2.6: due blocchi in parallelo sono equivalenti a un blocco con funzione di trasferimento data dalla somma delle singole funzioni.

Blocchi in retroazione



$$E = I - BU$$

$$U = EA = (I - BU)A = AI - ABU$$

$$U + ABU = AI$$

$$U(1 + AB) = AI$$

$$U = AI/(1 + AB)$$

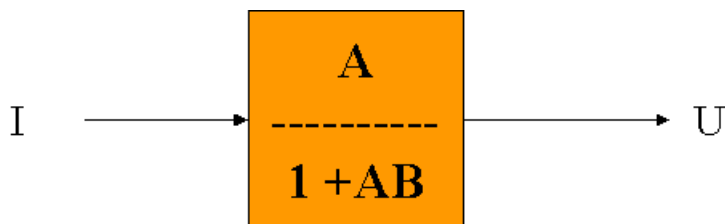


Figura 2.7: due blocchi in retroazione sono equivalenti a un blocco con funzione di trasferimento data dalla formula. NOTA: il segno al denominatore dipende dal segno della retroazione, se questa è negativa, come in figura, esso è positivo, se questa è positiva, esso è negativo (regola pratica: invertire il segno della retroazione).

Operazioni di algebra dei blocchi

Spostamento di un nodo derivatore

Nella semplificazione di uno schema a blocchi complesso si può avere la necessità di spostare un punto di diramazione in avanti o indietro. Queste operazioni non devono in alcun modo interferire con l'uscita, il che significa che devono essere inseriti opportuni correttivi come mostrato sotto.

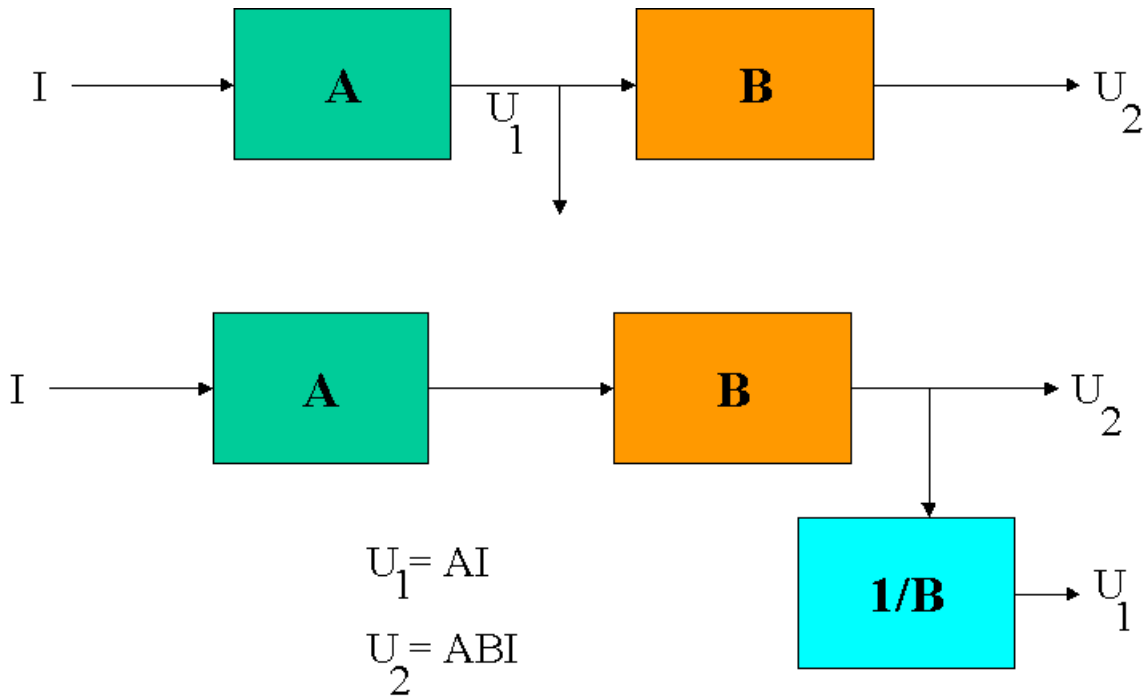


Figura 2.8: spostamento in avanti di un nodo derivatore, le uscite rimangono invariate

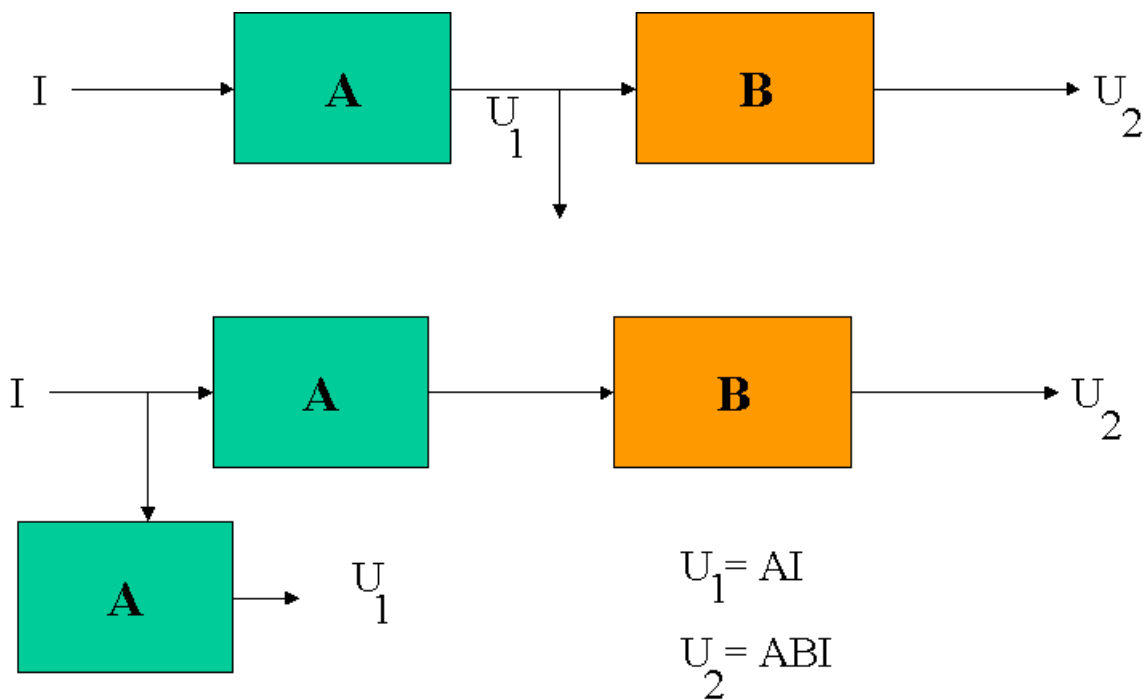
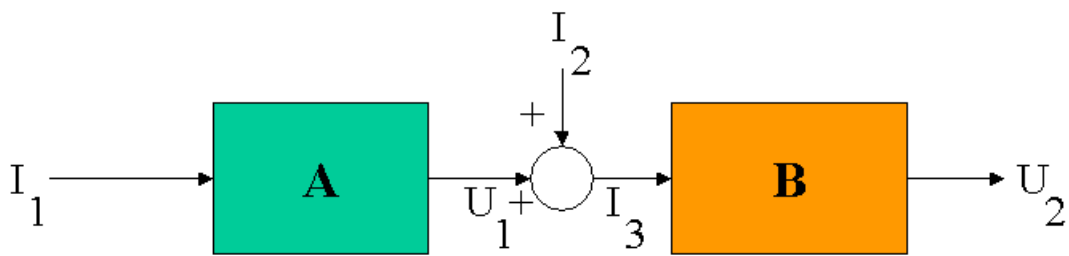


Figura 2.9: spostamento all'indietro di un nodo derivatore, le uscite rimangono invariate.

Spostamento di un nodo sommatore

Come nel caso precedente, anche per i nodi sommatore, a volte, è necessario effettuare uno spostamento in avanti o all'indietro al fine della semplificazione dello schema a blocchi generale. Queste operazioni non devono in alcun modo alterare l'uscita o le uscite del sistema.



$$U_1 = AI_1$$

$$U_2 = B(U_1 + I_2) = \mathbf{B}(AI_1 + I_2)$$

Figura 2.10: la configurazione iniziale, con un nodo sommatore in mezzo a due blocchi. L'uscita complessiva del sistema (U_2) è espressa dalla formula.

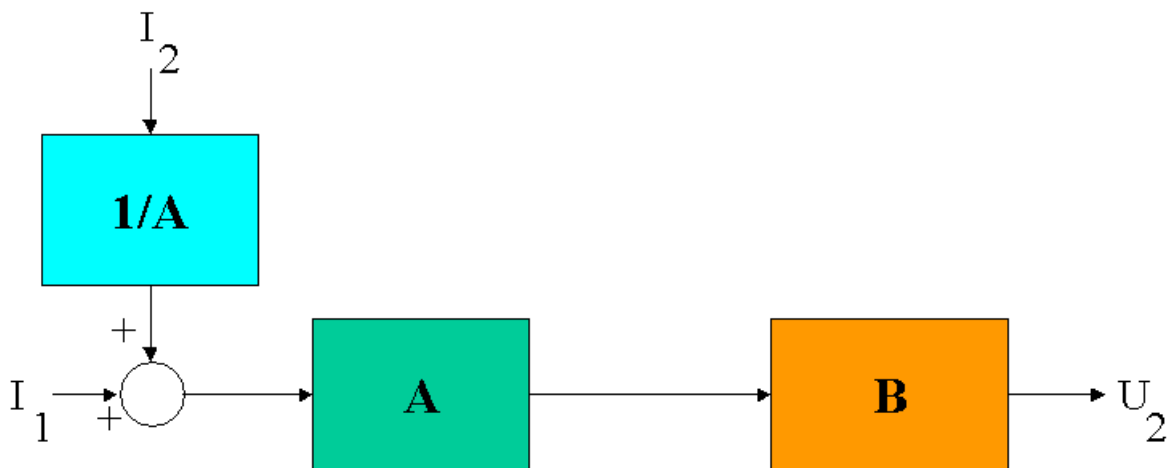


Figura 2.11: spostamento all'indietro (prima del blocco A) del nodo sommatore nella configurazione di figura 10.

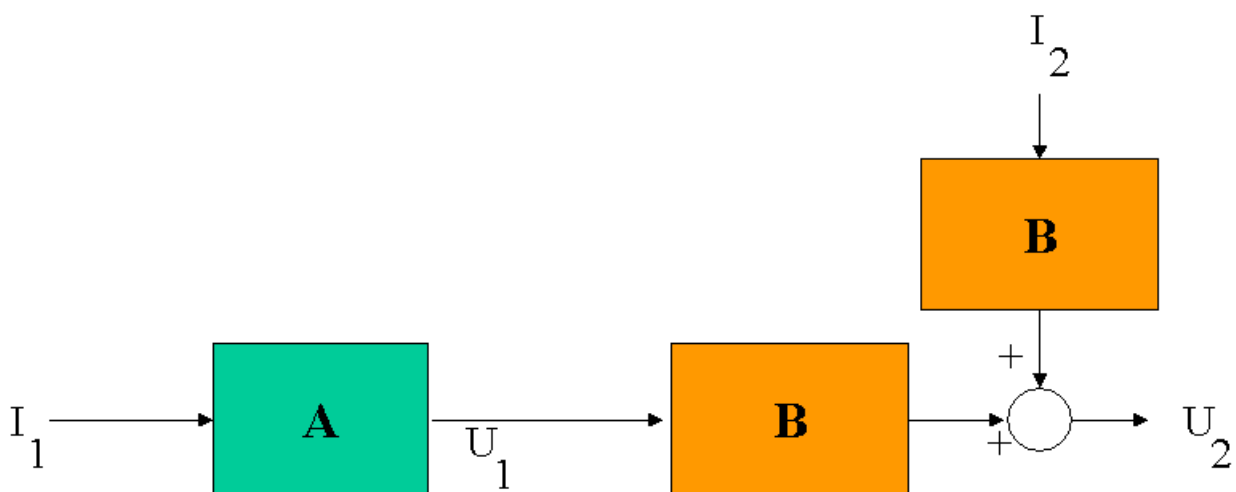


Figura 2.12: spostamento in avanti (dopo il blocco B) del nodo sommatore nella configurazione di figura 10.

SISTEMI E CONTROLLI

Il controllo e la regolazione

I concetti di regolazione e di retroazione sono strettamente legati al controllo. Per fare un esempio, consideriamo il sistema di riscaldamento di un appartamento che ha il termostato regolato su 22 °C: quando l'ambiente ha superato la temperatura prestabilita di 2 °C, la caldaia si spegne automaticamente, e quando, dopo un po', la temperatura scende di due sotto i 22 °C la caldaia si riaccende. Se la temperatura rilevata all'interno dell'appartamento resta in questo intervallo di quattro gradi, la caldaia resta accesa.

Si deduce che ci deve essere un meccanismo che rileva il valore della temperatura (l'uscita del sistema) e, in base a questo, prende una decisione e agisce sul sistema "caldaia". Se la temperatura rilevata è troppo alta, in ingresso si agisce sul gas, riducendo le fiammelle della caldaia. Se la temperatura rilevata è troppo bassa, si agisce sempre sul flusso di gas, questa volta per aumentarlo.

Per **controllo di un processo** si intende **l'insieme di azioni che tendono a governare il comportamento del sistema controllato in modo che venga raggiunto l'obiettivo anche in presenza di disturbi esterni.**

In altre parole, il sistema controllore dovrà produrre valori in uscita che serviranno a mantenere una certa relazione tra ingressi e risposte, anche se nel sistema intervengono disturbi esterni o fattori di deterioramento.

Possiamo distinguere fundamentalmente due tipi di sistemi di controllo:

- sistemi a catena aperta;
- sistemi a catena chiusa.

Diciamo subito che, tra i due, i sistemi a catena chiusa (con retroazione, per intenderci) consentono

di tenere sotto controllo l'evoluzione del sistema in maniera più affidabile e con un maggior margine di precisione.

Sistema a catena aperta

Il sistema a catena aperta è costituito semplicemente da un blocco che effettua il controllo sulla grandezza in ingresso e produce un valore in uscita, come mostrato in figura 1: qualsiasi disturbo o evento non previsto deve essere risolto all'interno del blocco stesso.



Figura 3.1: sistema in catena aperta

Poiché il sistema non ha la capacità di adattare le proprie reazioni e il successivo comportamento ai nuovi eventi, questo tipo di architettura può funzionare quando la grandezza da controllare non ha bisogno di garantire dei margini molto bassi di errore per un corretto funzionamento, oppure se si è sicuri che l'errore rimarrà praticamente costante. Se si suppone che non esistano variazioni dell'influenza del disturbo sul comportamento

del sistema controllato, allora si può dire che il sistema a catena aperta offre prestazioni equivalenti al sistema a catena chiusa; in caso contrario, le prestazioni di un sistema controllato che realizzi una catena chiusa sono decisamente superiori.

In altre parole, un sistema a catena aperta è senza memoria: se si verifica la necessità di modificare la sequenza dei valori immessi in ingresso, è necessario l'intervento di un elemento esterno (generalmente un uomo che controlla l'andamento) che corregga il tiro. Per questi motivi, l'uso di un sistema a catena aperta in ambito di automazione industriale ha scarsa applicazione.

Prendiamo come esempio di catena aperta il sistema di condizionamento della temperatura. La posizione della manopola di regolazione della temperatura (il valore in ingresso al sistema), poiché non ha la possibilità di essere corretta, deve garantire che la temperatura selezionata venga mantenuta nel tempo. Ovviamente, la temperatura dell'ambiente non sarà esattamente quella selezionata: molti fattori ambientali possono causare variazioni anche notevoli. Nel caso in cui il valore rilevato nell'ambiente si discosti molto da quello selezionato è necessario un intervento diretto dell'uomo che dovrà agire nuovamente sulla manopola. In un sistema a catena aperta, perciò, il fattore temporale è piuttosto rilevante.

L'intervento che nell'esempio precedente viene fatto dall'uomo per riportare l'andamento del sistema verso valori desiderati, nei sistemi a catena chiusa viene svolto in maniera automatica da un sistema che ha lo scopo specifico di effettuare un controllo dell'andamento.

Sistemi a catena chiusa

Nei sistemi a catena chiusa come potete vedere anche dalla figura 2, il controllo è effettuato dal sistema in retroazione mediante il calcolo dello scarto tra il segnale acquisito in uscita (valore di riferimento) e il valore posto in ingresso al sistema. Questo scarto consente di definire un eventuale margine di scostamento del comportamento del sistema da quello desiderato.

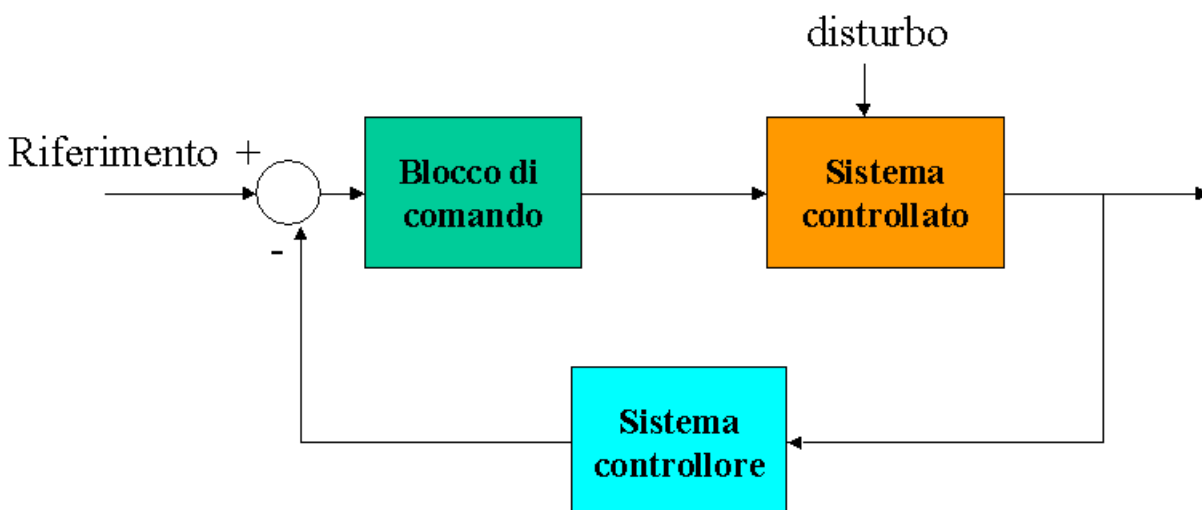


Figura 3.2: Sistema in catena chiusa

L'esigenza di avere un controllore deriva sostanzialmente dalla presenza di disturbi che rendono necessaria la correzione del comportamento del sistema stesso. Le indicazioni fornite dal sistema controllore e reinserite in ingresso mediante il blocco sommatore in

genere non vanno imposte immediatamente in ingresso nel sistema controllato, ma finiscono in ingresso in un altro blocco, che fisicamente esegue le azioni (i comandi) per la correzione dell'andamento del sistema. Questo blocco ha spesso necessità di esistere, in quanto la natura fisica del segnale in ingresso non sempre è direttamente compatibile con il sistema da controllare: per esempio, un segnale di natura elettrica che deve essere tradotto in un'azione di natura meccanica.

I sistemi di controllo a catena chiusa possono essere classificati nel modo seguente:

- **regolatori**: l'uscita del sistema deve essere mantenuta costante (per esempio il termostato);
- **servosistemi**: l'uscita del sistema deve seguire nel tempo delle evoluzioni predeterminate; nel caso di grandezze di natura cinematica, il servosistema prende il nome di *servomeccanismo*.

Il forno è un tipico sistema di regolazione: la temperatura impostata deve essere mantenuta costante

mediante un meccanismo che ne rilevi il valore tramite un termostato.

Un esempio di servosistema, invece, è un amplificatore che trasforma la natura del segnale elettrico, mantenendone, però, il tipo di andamento: il segnale viene modificato in uno dei suoi parametri ma mantiene le caratteristiche fondamentali. Servomeccanismi sono il servosterzo, il servofreno, il sistema di trasmissione delle automobili in generale oppure il timone di una nave.

I problemi che devono essere previsti in fase di progettazione di un sistema di controllo sono sostanzialmente:

- **disturbi imprevedibili** imputabili a cause esterne;
- **disturbi derivanti da variazioni** dei parametri e imputabili all'invecchiamento dei dispositivi (generalmente, i sistemi teorici sono considerati invarianti; nella realtà, però, il fenomeno va considerato);
- **il tempo di ritardo** della risposta dal momento della sollecitazione in ingresso.

Un buon sistema di controllo, quindi, dovrà rispondere in tempi rapidi, con un basso margine di errore calcolato all'ingresso di ogni retroazione, rilevando e reagendo agli eventuali disturbi in breve tempo.

Facciamo ancora alcune considerazioni sulla retroazione. Il controllo, come si può immaginare, prevede sempre una retroazione negativa, in quanto il nostro obiettivo è di oscillare, il più vicino possibile, intorno al valore di riferimento, operando continue correzioni in eccesso oppure in difetto.

La retroazione positiva fa sì che l'uscita vada ad aggiungersi al valore di riferimento; quindi useremo una retroazione di tipo positivo quando il nostro obiettivo sarà di regolazione della crescita, piuttosto che di controllo. Pertanto, se il nostro obiettivo sarà di fare descrivere al segnale una curva di valori di un certo tipo, anziché di raggiungere un valore preciso di riferimento, potremo utilizzare una retroazione positiva.

Stabilità dei sistemi

Per potere comprendere i concetti relativi alla stabilità dei sistemi occorre definire alcuni concetti di base.

Tipi di ingressi

Solitamente un ingresso si può suddividere fra le categorie riportate nel seguito.

Ingresso a gradino (ideale)

Il valore dell'ingresso I passa bruscamente da zero a un valore di riferimento. Un esempio di questo tipo di ingresso è dato dall'accensione (chiusura) di un interruttore, o dalla pressione del tasto corrispondente ad una determinata lettera sulla tastiera. Il grafico dell'ingresso è rappresentato in figura 3.

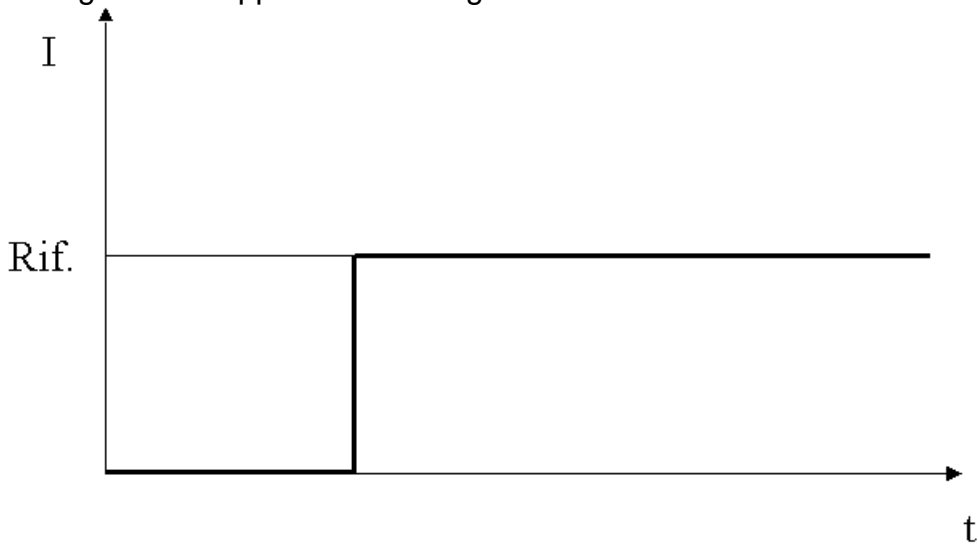


Figura 3.3: Ingresso a gradino (ideale).

Ingresso a rampa lineare

In questo tipo di ingresso il valore di I aumenta linearmente passando da zero ad un massimo (idealmente anche infinito). Un esempio di questo ingresso è dato dal volume di una radio.

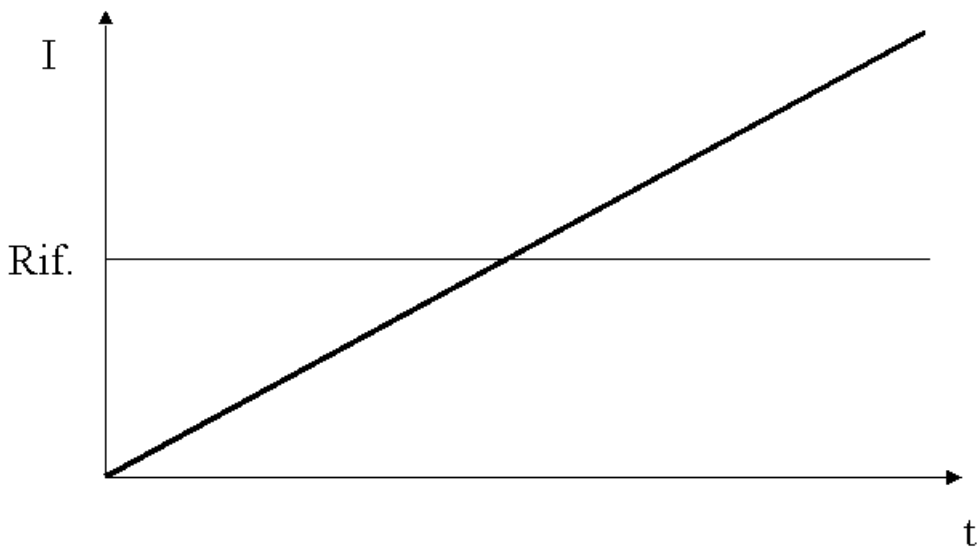


Figura 3.4: Ingresso a rampa lineare.

Ingresso a rampa parabolica

In questo tipo di ingresso il valore di **I** tende esponenzialmente a un valore di riferimento.

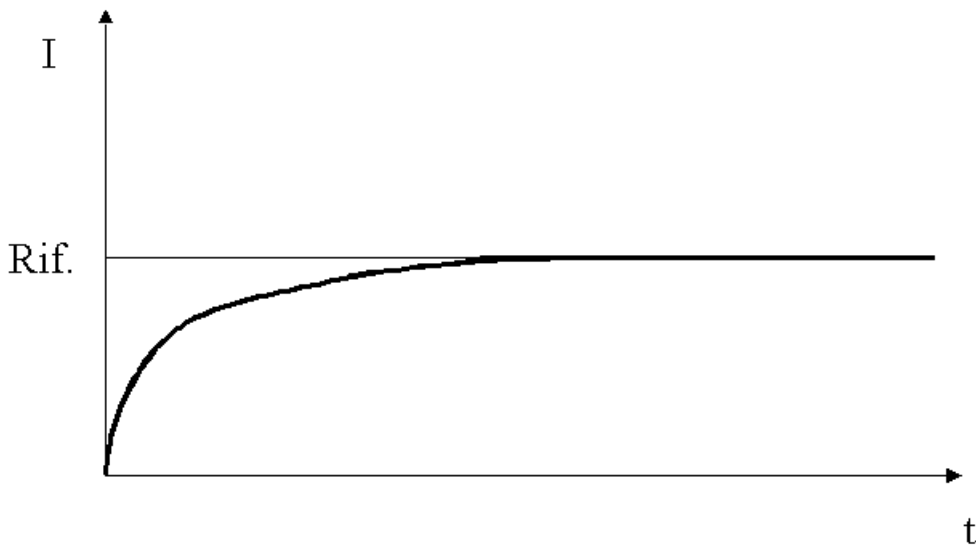


Figura 3.5: Ingresso a rampa parabolica

Tipi di uscite

Le risposte dei sistemi agli stimoli, ossia agli ingressi, dei tipi mostrati sopra non sempre ne seguono l'andamento, anzi molto spesso sono nettamente diverse. Le figure seguenti mostrano alcuni esempi di risposte possibili ad un ingresso a gradino.

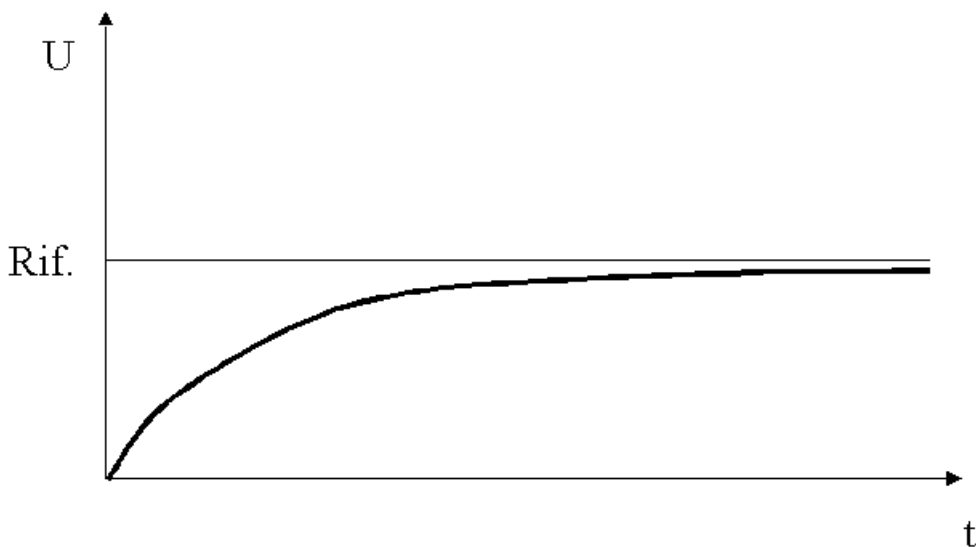


Figura 3.6: Uscita con risposta a un gradino di tipo esponenziale (tende asintoticamente a un valore).

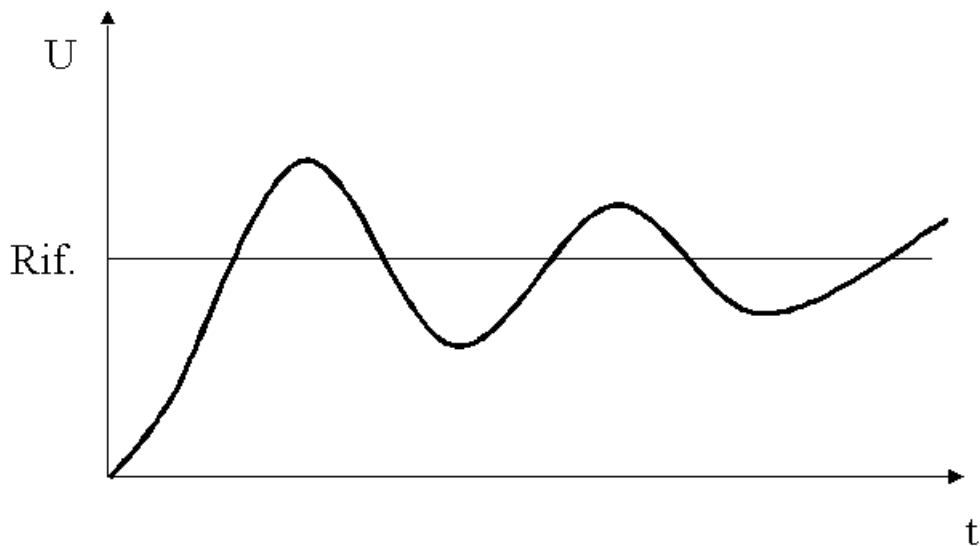


Figura 3.7: Risposta a un gradino di tipo oscillatorio smorzato.

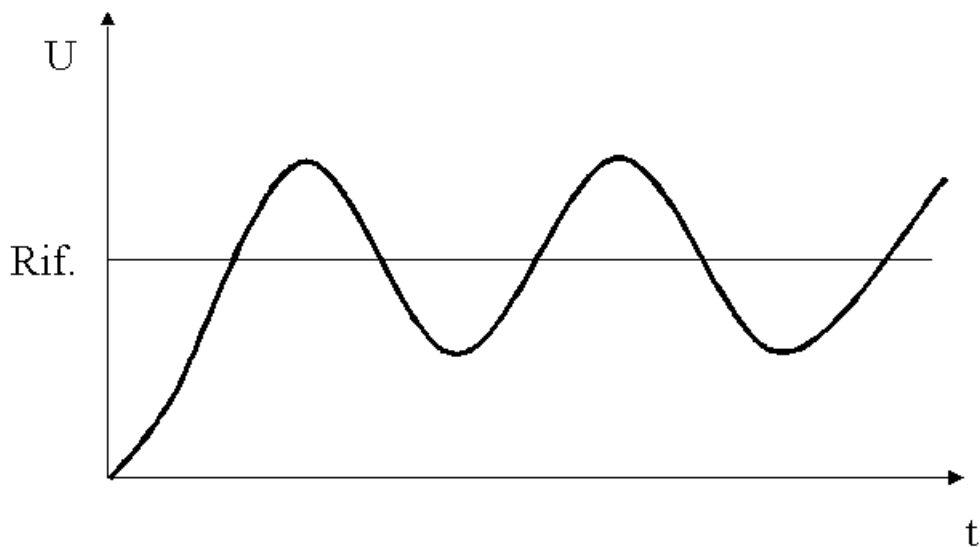


Figura 3.8: Risposta a un gradino di tipo oscillatorio.

Errore assoluto e relativo

Considerando il valore U_r dell'uscita di riferimento (ossia quella che desidereremmo che il sistema avesse), e U_e , l'uscita effettivamente misurata, si definiscono

Errore assoluto
$$E_a = | U_r - U_e |$$

Errore relativo
$$E_r = \frac{E_a}{U_r}$$

L'errore assoluto, in una catena di controllo in retroazione, non è altro che l'uscita del nodo sommatore di una retroazione negativa. Per capire i due concetti pensiamo a una differenza di temperatura di un grado rispetto al previsto. Se ci troviamo in una stanza la cui temperatura dovrebbe essere di 20°C questa differenza è piuttosto sensibile, mentre se ci troviamo in un altoforno la cui temperatura dovrebbe essere di 1000°C ecco che l'errore dovuto a tale differenza è trascurabile. In pratica l'errore relativo ci dice quanto è rilevante l'errore assoluto relativamente al contesto, ossia al sistema che stiamo considerando.

Periodo transitorio e condizioni a regime

Nei sistemi, specialmente quelli di tipo elettrico, normalmente, dopo che è stato applicato un certo stimolo, prima che l'uscita si stabilizzi sul valore di riferimento corrispondente a tale stimolo passa un certo tempo, detto **transitorio iniziale**.

Dopo questo periodo transitorio il sistema sarà in **condizioni di regime** e quindi potranno su di esso essere svolte le misurazioni, espresse le valutazioni e considerarlo quindi utile o no.

Tempi di risposta

Dato un sistema la cui uscita dopo il transitorio si stabilizza su un valore di riferimento, si definiscono i tempi di risposta come segue.

Tempo di ritardo (T_r) è il tempo impiegato dall'uscita del sistema per raggiungere la metà del valore di riferimento.

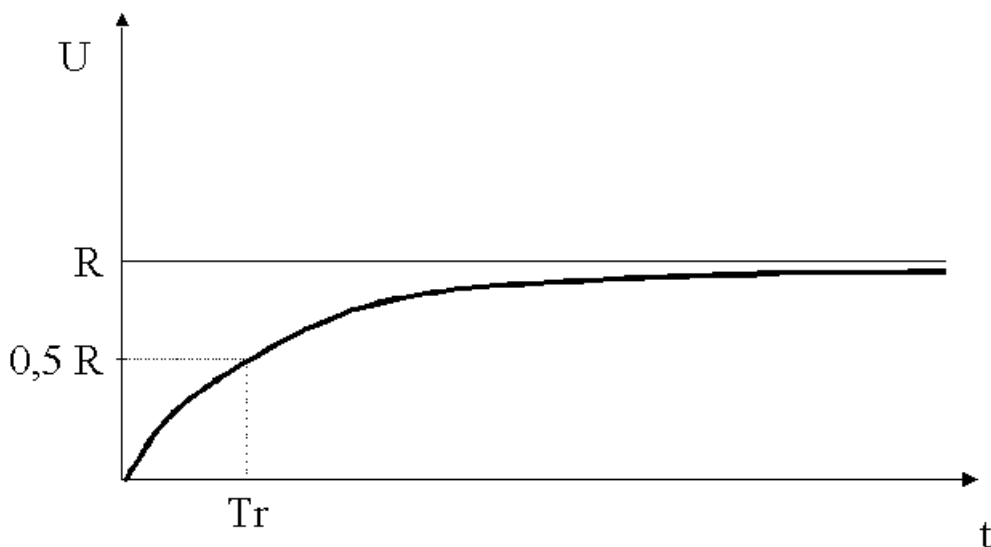


Figura 3.9: tempo di ritardo.

Tempo di salita (T_s) è il tempo impiegato dall'uscita del sistema per passare dal 10% al 90% del valore di riferimento.

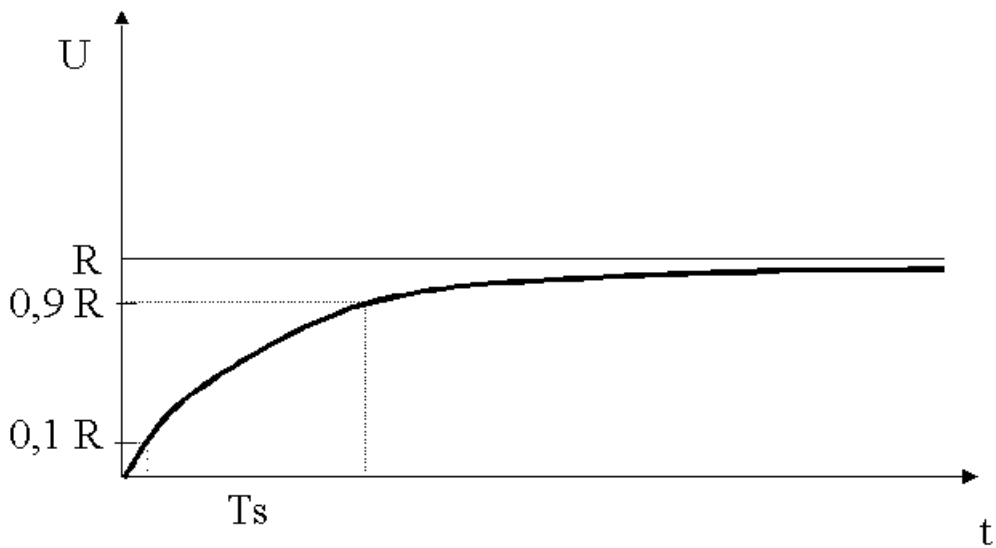
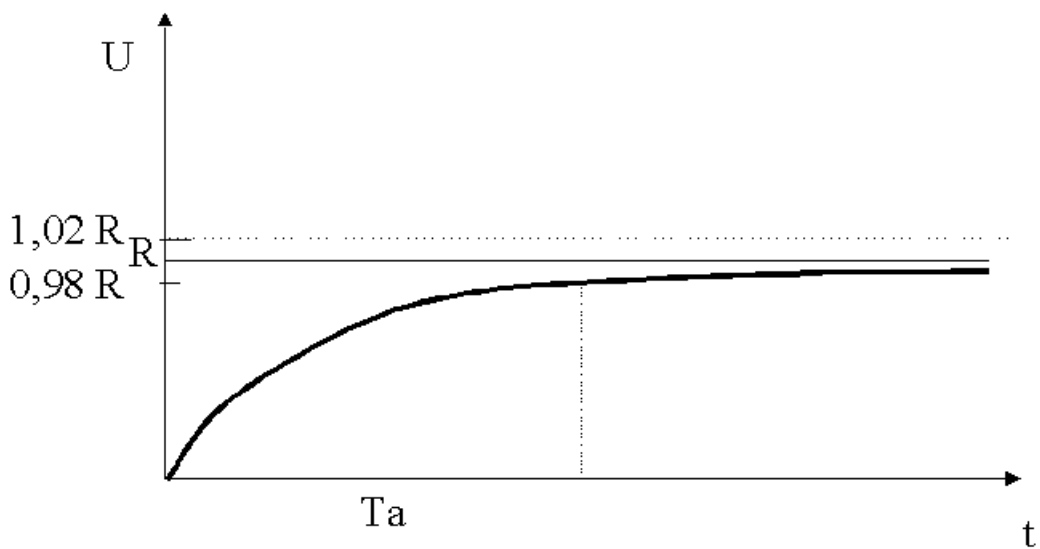


Figura 3.10: tempo di salita.

Tempo di Assestamento è l'intervallo di tempo impiegato dall'uscita del sistema per assestarsi entro uno scarto del 2% del valore di riferimento.



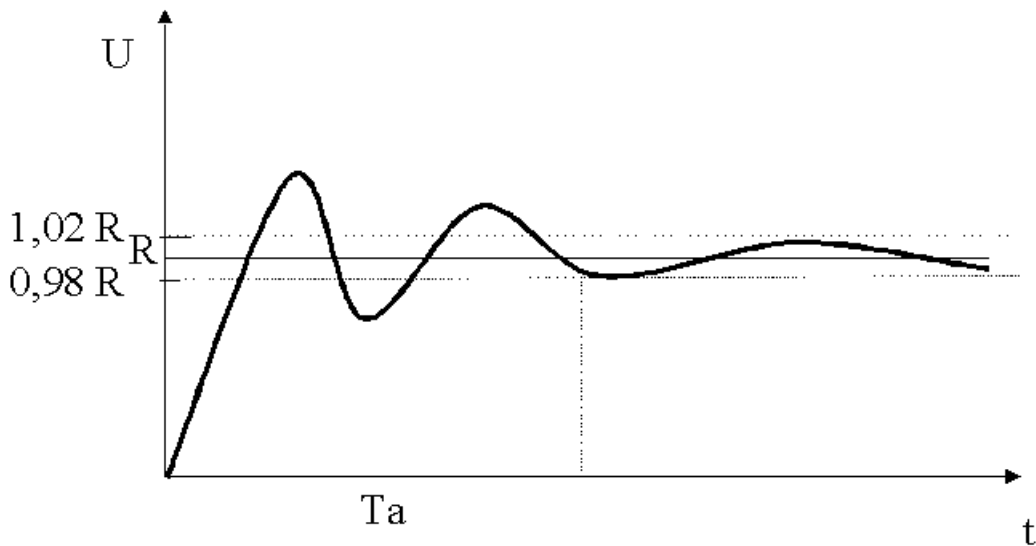


Figura 3.11: tempo di assestamento nei casi esponenziale e oscillatorio smorzato.

Stabilità dei sistemi

Siamo ora in grado di definire la stabilità in modo intuitivo, rimandando la trattazione matematica precisa del concetto di stabilità ai corsi degli anni successivi.

Consideriamo come esempio la posizione di una pallina posta sulla cima di una collinetta piatta (es. il conetto del minigolf). Se si dà un piccolo colpo alla pallina questa dopo poco si ferma (configurazione stabile). Ma se il colpo è tale da farla andare oltre l'orlo o la pallina già si trova vicino all'orlo ecco che la pallina prende velocità e scende dalla collinetta (configurazione instabile).

Un sistema si definisce **stabile** se, in corrispondenza di piccole variazioni dell'ingresso, si hanno piccole variazioni dell'uscita.

Un sistema si definisce **instabile** se, in corrispondenza di piccole variazioni dell'ingresso si hanno grandi variazioni dell'uscita.

Se un sistema è instabile secondo la definizione data è impossibile poterlo controllare con i metodi visti in precedenza. Le piccole variazioni dell'ingresso, dette anche perturbazioni, sono in massima parte errori nell'ingresso (es. fluttuazioni dei valori) o disturbi.

Un sistema lineare, in cui il rapporto uscita/ingresso è determinato da una funzione di primo grado (funzione lineare) è quasi sempre stabile, un sistema non lineare è invece quasi sempre instabile.

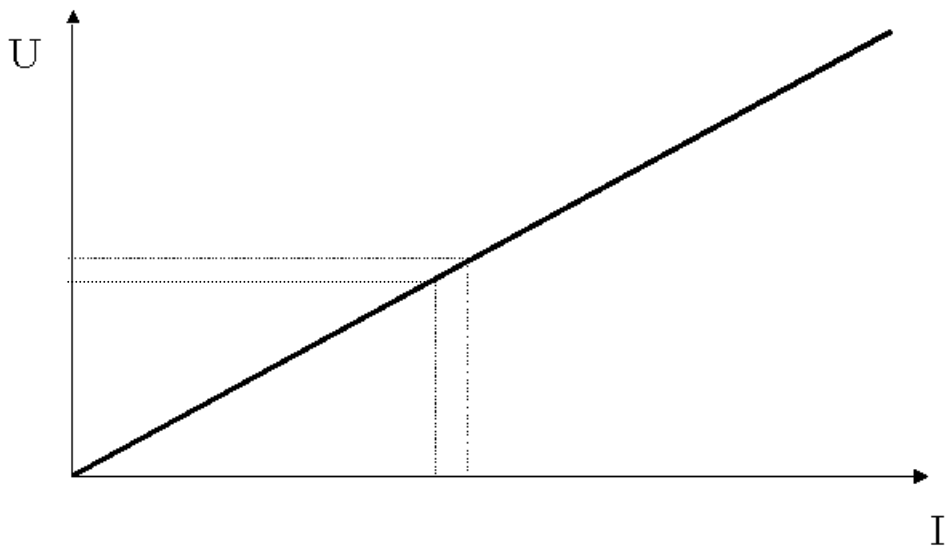


Figura 3.12: variazione dell'uscita per piccole variazioni di ingresso in un sistema lineare

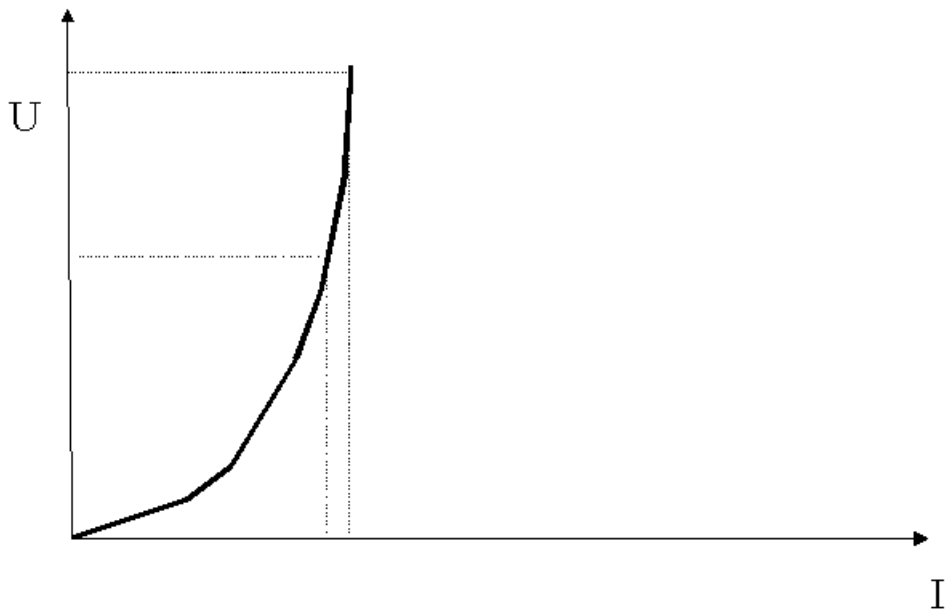


Figura 3.13: variazione dell'uscita per piccole variazioni di ingresso in un sistema non lineare

UN SISTEMA PARTICOLARE: L'AUTOMA

Definizione di Automa

Un **Automa** è costituito dagli insiemi I (variabili di ingresso), V_{in} (possibili valori assunti dalle variabili di ingresso), U (variabili di uscita), VU (possibili valori assunti dalle variabili di uscita), S (insieme degli stati interni) e T (insieme dei tempi) e dalle relative funzioni f (funzione di transizione degli stati) e g (funzione di transizione delle uscite) che complessivamente descrivono fondamentalmente una macchina (rappresentata come una scatola nera) con l'ausilio di dispositivi regolati dal Clock.

Differenza tra l'automa di Moore e di Mealy

Nell'automa di Moore, il valore delle uscite dipende solamente dallo stato attuale degli ingressi e non da quelli precedenti.

$$S(t_2) = f(t_2, t_1, S(t_1), V_{in}(t_1));$$
$$VU(t_2) = g(t_2, t_1, S(t_1));$$

Nell'automa di Mealy, invece, il valore dell'uscita non dipende solamente dallo stato attuale degli ingressi, ma anche da quelli precedenti.

$$S(t_2) = f(t_2, t_1, S(t_1), V_{in}(t_1));$$
$$VU(t_2) = g(t_2, t_1, S(t_1), V_{in}(t_1));$$

Proprietà fondamentali degli automi

Si chiama **stato iniziale** di una macchina, intesa come automa, quello in cui essa si trova all'inizio del suo funzionamento, cioè quando non le è ancora pervenuta alcuna informazione.

Si chiama **stato finale** di una macchina quello da cui essa non può muoversi per qualsiasi valore d'ingresso.

Lo **stato di equilibrio** di un automa è uno stato in cui la macchina può rimanere a tempo indefinito per un dato valore in ingresso.

L'**uscita di equilibrio** è un vettore di uscita comune a più stati.

Un automa è **reversibile** se, dato un qualsiasi valore dello stato S_2 ed un qualsiasi valore d'ingresso i , esiste un unico stato S_1 dal quale si può arrivare ad S_2 fornendo l'ingresso i .

Lo stato S_2 è **raggiungibile** dallo stato S_1 , se esiste almeno una sequenza di valori di ingresso che fa transitare la macchina dallo stato iniziale S_1 allo stato finale s_2 .

Si parla di **raggiungibilità diretta** quando si passa direttamente dallo stato S_1 allo stato S_2 o di **raggiungibilità indiretta** quando si passa dallo stato S_1 allo stato S_2 attraverso stati intermedi.

Due stati si dicono **indistinguibili** se, per ingressi uguali, hanno:

- le stesse uscite;
- lo stato di arrivo.