

SISTEMI E AUTOMAZIONE

1.1 - Definizione di sistema - Sistema astratto orientato

Nel mondo della tecnica ogni specialista di settore analizza, studia e progetta dispositivi che solitamente appartengono alla disciplina di sua competenza. Così l'elettronico studia circuiti e apparecchiature sia dal punto di vista della loro struttura interna (modo con cui collegare i diversi componenti: BJT, N-MOS, C-MOS, resistenze condensatori, generatori, ecc..) sia dal punto di vista del funzionamento. Nello stesso modo il meccanico opera sulle sue apparecchiature studiando il modo di collegare componenti meccanici adeguati (leve, pistoni, rotismi..) in modo da ottenere funzionamenti desiderati.

Si realizzano così sistemi fisici di tipo elettronico meccanico, termico, ecc..., che aggregano in modo intelligente più parti funzionali in modo da ottenere un certo comportamento complessivo.

Capita sovente, comunque, specie per chi opera nel campo dell'elettronica, di dover realizzare sistemi che integrano in modo funzionale parti di tipo meccanico con altre di tipo elettrico e magari con altre parti ancora di tipo elettronico, e così via in funzione della complessità del sistema. Si comprende l'impossibilità pratica di pensare a degli specialisti che abbiano lo stesso grado di conoscenza in tutti questi settori. Ad esempio ad un tecnico elettronico può essere richiesto di progettare una scheda per controllare la temperatura di un forno. E' evidente che le sue conoscenze nel campo termico non saranno così approfondite come in quello elettronico anche se, la necessità di controllare il funzionamento di questo sistema, richiede che lo specialista possieda un'adeguata conoscenza nel campo della termotecnica. Bisogna stabilire, a questo punto, quali possono essere le conoscenze utili al controllo del forno. E' abbastanza evidente che devono innanzi tutto essere note le grandezze su cui bisogna agire per aumentare o ridurre la temperatura del forno. Nel caso si tratti di un forno elettrico la grandezza su cui agire per variare la temperatura può essere, nel caso più semplice, la tensione applicata alle resistenze. Questa grandezza è indicata come **ingresso** del sistema termico. In secondo luogo è necessario conoscere dove acquisire la misura della temperatura per poterne controllare il valore. Scartando l'ipotesi di un controllo manuale, per il quale è sufficiente l'uso di un normale termometro, si può pensare che il forno sia equipaggiato con un **sensore** che fornisce una tensione *proporzionale* alla temperatura da controllare. Si definisce questa seconda grandezza **uscita** del sistema termico. Infine deve essere noto come variazioni della grandezza di ingresso influenzano la grandezza di uscita. In altre parole, deve essere noto il **legame ingresso-uscita**, affinché le *azioni* sviluppate dalla scheda elettronica siano tali da imporre i valori prescelti dell'uscita, anche in presenza di fenomeni che cercano di alterarli. In definitiva il forno elettrico può essere rappresentato, ai fini del suo controllo, con lo schema di **Fig. 1.1.1**

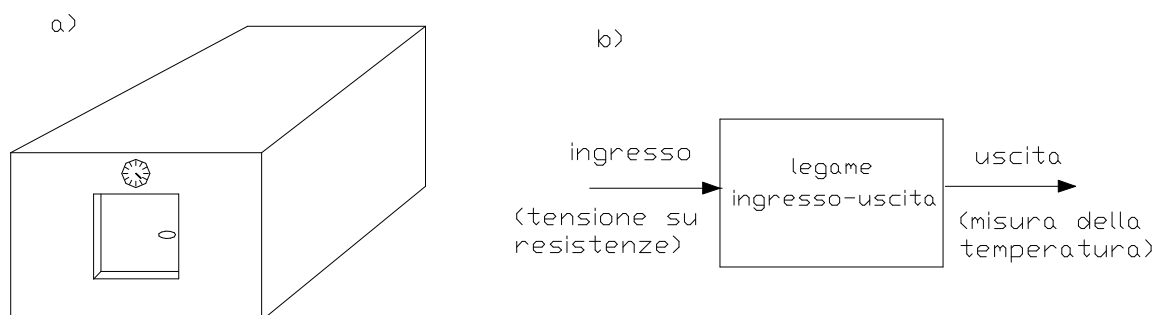


Fig. 1.1.1 a) forno elettrico

b) modello astratto

Lo schema di **Fig.1.1.1 b)** non ha alcun significato fisico in quanto mette solo in evidenza i tre elementi fondamentali, utili per il controllo della temperatura del forno. Si parla perciò di **modello astratto** del sistema considerato. Dato che la grandezza di ingresso agisce *sul* sistema e quella di uscita è fornita *dal* sistema, in questa descrizione è implicito un orientamento del sistema imposto dal verso delle grandezze considerate, come

evidenziato dalle frecce dei due segmenti orientati dello schema a blocchi di **Fig.1.1.1 b)**. Si parla per questo motivo, con riferimento allo schema di **Fig.1.1.1 b)**, di **modello astratto orientato**.

Queste considerazioni suggeriscono l'idea di impostare una metodologia di studio che, prescindendo da specifiche costruzioni fisiche, si interessi solo della parte funzionale di un generico sistema, vale a dire del comportamento del sistema rispetto a particolari obiettivi definiti nel progetto.

Generalizzando il discorso fatto nell'esempio del forno elettrico si può osservare che, qualunque sia il sistema fisico considerato, si possono identificare delle **grandezze di ingresso** che rappresentano le sollecitazioni imposte al sistema fisico per ottenere un adeguato comportamento (risposte del sistema). Il comportamento del sistema è caratterizzato dall'osservazione di particolari grandezze fisiche dette **grandezze di uscita**. Così in un amplificatore la sollecitazione imposta può essere la tensione di ingresso e la risposta la tensione di uscita, mentre il legame ingresso uscita è espresso dall'amplificazione di tensione. In un'automobile, la sollecitazione di ingresso può essere la pressione del piede sull'acceleratore e la risposta in uscita può essere la velocità ottenuta, mentre il legame ingresso uscita è espresso dalle caratteristiche di funzionamento del motore a scoppio.

Durante questo tipo di analisi si può fare un'interessante scoperta, consistente nel fatto che il legame ingresso uscita, di sistemi completamente diversi, può essere descritto da **relazioni** che hanno la stessa struttura matematica (**modello matematico**). Per comprendere quest'aspetto molto importante si faccia riferimento alla **Fig.1.1.2** che si riferisce a due "macchine elementari" appartenenti una al settore dell'elettronica, l'altra a quello della meccanica.

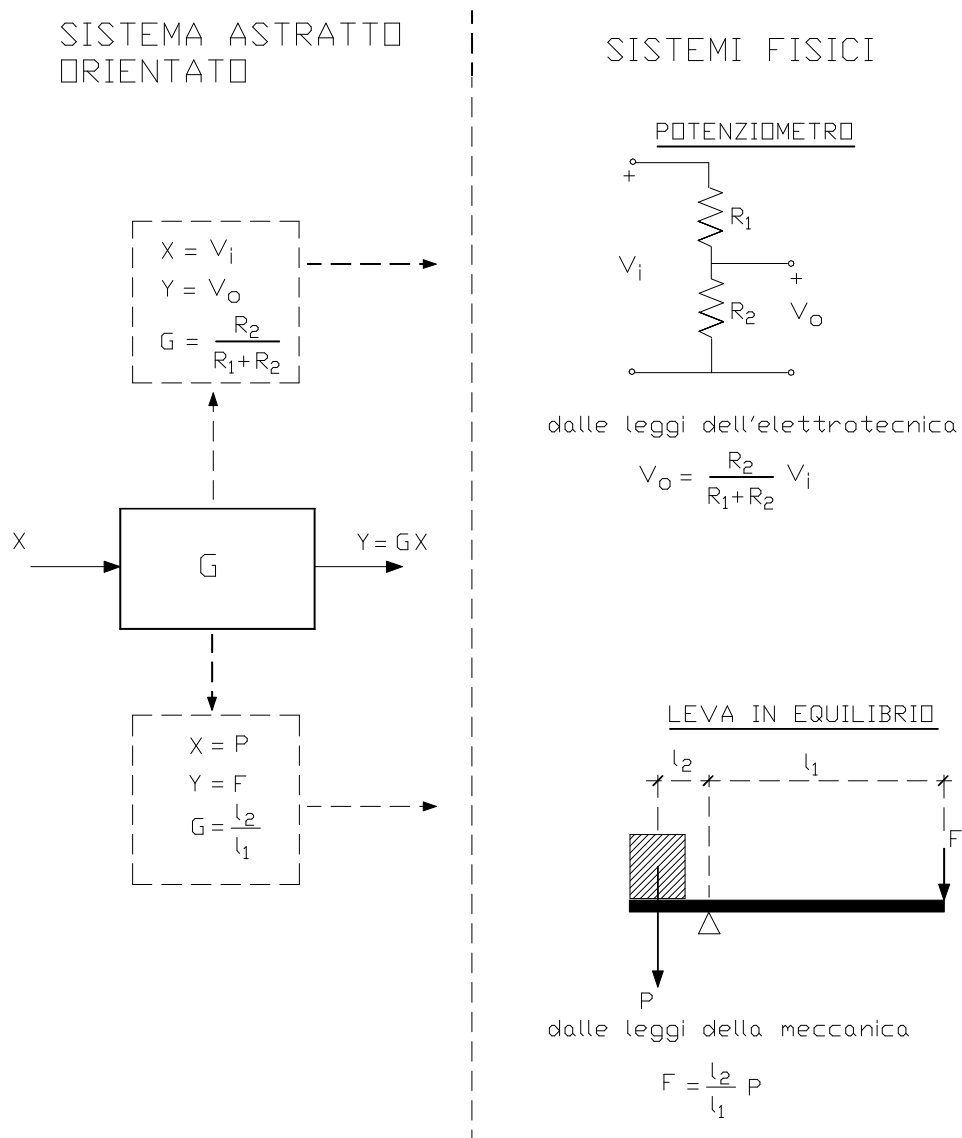


Fig.1.1.2 Schema a blocchi per rappresentare sistemi di diversa natura con lo stesso legame ingresso-uscita.

Queste considerazioni incoraggiano gli studiosi ad impostare una teoria che, studiando le relazioni matematiche tra ingresso e uscita, consenta di ottenere dei risultati che si possano applicare a dispositivi fisici anche molto diversi.

Per impostare questa teoria si deve precisare in modo adeguato la definizione di sistema, facendo eventualmente delle classificazioni in base al tipo di legame esistente tra le grandezze d'ingresso e d'uscita. In questo legame, se espresso con delle relazioni matematiche, compaiono delle grandezze di tipo costruttivo (R_1 , R_2 nel sistema elettrico; l_1 , l_2 in quello meccanico) che vengono definite in fase di progettazione e che si ritengono costanti durante il funzionamento del sistema. Queste grandezze sono dette **parametri** del sistema.

Fatte queste premesse, si può dare la seguente definizione di sistema:

sistema è un insieme di parti interagenti in modo da costituire un oggetto unico e in grado di produrre un certo funzionamento.

Tutte le apparecchiature di tipo tecnologico rientrano praticamente in questa definizione e sono dette *sistemi fisici artificiali*, in contrapposizione ai *sistemi fisici naturali* che, seppure definibili nello stesso modo, sono già presenti in natura sotto varie forme. In quest'ultima categoria si possono far rientrare il sistema muscolare di un essere vivente, il sistema solare ecc...

Come già detto, questa teoria concentra la sua attenzione sugli oggetti sopra indicati, piuttosto che sulla loro struttura fisica, perciò si ricorre frequentemente alla rappresentazione astratta del sistema, già mostrata in **Fig.1.1.2**, detta **schema a blocchi del sistema**, e riportata, per maggior generalità, in **Fig.1.1.3**.

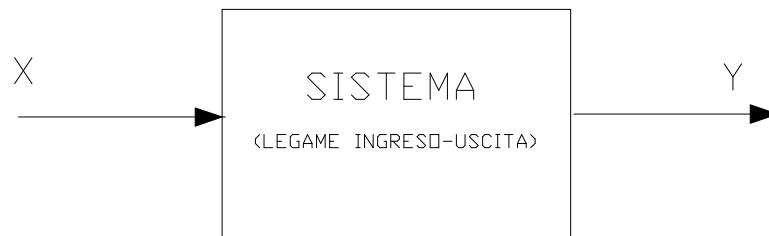


Fig.1.1.3 Schema a blocchi che rappresenta il *sistema astratto orientato* nel quale vengono evidenziate le grandezze di ingresso, di uscita ed, eventualmente, il legame ingresso uscita

Nel caso sia definita una relazione matematica tra ingresso e uscita, all'interno della "scatola sistema" dello schema a blocchi, è indicato questo legame. Così in **Fig.1.1.2** è indicato il valore di G che è la *costante di proporzionalità* tra grandezze di ingresso e di uscita ($Y = G X$).

Di un sistema fisico si possono avere quindi diverse rappresentazioni: lo schema a blocchi, una relazione matematica, un grafico ecc., e altre ancora che saranno prese in considerazione nel seguito.

A conclusione di questa parte introduttiva, va sottolineato il carattere unificante che ha questa disciplina rispetto a quelle più specialistiche (elettronica, meccanica, chimica, ecc.). Processi fisici completamente diversi sono descritti da uguali modelli matematici (vedi leva e potenziometro di **Fig.1.1.2**). Lo studio approfondito di questi modelli matematici fornisce dei risultati che si possono applicare a settori della tecnologia notevolmente diversi.

Con riferimento allo schema mostrato in **Fig.1.1.3**, la Teoria dei Sistemi, affronta tre tipi diversi di problemi:

predizione (o analisi): determinazione dell'uscita Y noti l'ingresso X e la costante G .

identificazione: determinazione della costante G noti l'ingresso X e l'uscita Y

controllo: determinazione dell'ingresso X noti l'uscita Y e la costante G .

1.2 - Un importante esempio di sistema – Sistema programmabile

Prima di vedere esempi di sistemi che ci aiuteranno a completare una classificazione, si esaminerà un sistema elettronico di larga utilità e ormai di gran diffusione. Ci si riferisce al **calcolatore elettronico** che sarà esaminato con approccio sistemico. Con ciò si vuol intendere che non si cercherà di esporre ed analizzare i tipi di circuiti che lo compongono, compito della specialista di elettronica digitale, ma si cercheranno piuttosto i legami che ci sono tra le grandezze d'ingresso e quelle di uscita. Per questo scopo si farà riferimento al modello di Fig.1.2.1.



Fig.1.2.1. Modello di un calcolatore elettronico.

In questo caso il legame ingresso uscita non è direttamente espresso da una relazione matematica (modello matematico) ma da un **programma** che produce una sequenza di elaborazioni sui valori dell'ingresso per produrre le uscite volute. Si parla in questo caso di **sistema programmabile**. Questo sistema, in modo molto flessibile, cambia il legame tra ingressi e uscite, semplicemente cambiando il programma adeguatamente predisposto (memorizzato) nel suo interno.

I segnali di ingresso sono, in questo caso, sequenze di caratteri, inviati al sistema digitando in successione i tasti raccolti su un dispositivo detto *keyboard* (tastiera). Le uscite del sistema sono ancora sequenze di caratteri visualizzati su un altro dispositivo detto *monitor* (video).

Utilizzando il sistema appena descritto qualitativamente si realizza il *riconoscitore di frase corretta* descritto nel seguente esempio. Quest'esempio consentirà di introdurre un concetto molto importante, quello di *stato interno*, indispensabile per descrivere **sistemi di tipo sequenziale**.

Esempio 1.1 Si vuole che il sistema di **Fig.1.2.1** sia in grado di riconoscere una frase corretta formata da tre parole (ad esempio la frase: "Siamo tutti contenti"). Si vuole inoltre che, dopo l'inserimento di ogni parola, decretata dall'attivazione del comando "Enter", il sistema risponda sul monitor con delle frasi che ci aiutino a capire a quale punto di questo *processo* ci troviamo prima di inserire una nuova parola.

Per definire il sistema è necessario caratterizzare gli ingressi, le uscite ed il legame ingresso uscita secondo le modalità descritte in precedenza.

ingressi tutti gli insiemi di caratteri che si definiscono parole. Si possono restringere, in questo contesto, le parole a quelle della lingua italiana, di senso compiuto.

uscite i messaggi forniti sul video in risposta ad ogni nuova parola di ingresso. Con i simboli **Y0, Y1, Y2 e Y3** si indicano, per ragioni di brevità, i seguenti quattro messaggi stampati sul monitor:

Y0	"Nessuna parola corretta"
Y1	"Prima parola corretta"
Y2	"Seconda parola corretta"
Y3	"....Complimenti frase corretta...."

tempo il sistema descritto *evolve nel tempo* per cui è necessario stabilire un'adeguata misura di questa grandezza. Per semplicità si può pensare che ogni nuova parola di ingresso sia inserita ad intervalli regolari. Si parla di sistema a **tempo discreto** dato che il funzionamento è descritto solo negli istanti in cui è inserita una nuova parola.

Per descrivere il legame ingresso-uscita, è necessario fare alcune considerazioni preliminari. A questo riguardo ci si può domandare, ad esempio, come deve rispondere il sistema alla parola "tutti". Dato che la frase è corretta solo se s'introducono le tre parole che la compongono in *ordine* corretto, è chiaro che se la parola "tutti" è inserita *dopo* la parola "Siamo", il sistema deve fornire un messaggio che riconosce la sequenza di due parole corrette. Quando, invece, la parola "tutti" è inserita dopo la parola "contenti", il sistema, non essendo rispettato l'ordine corretto, deve comunicare in uscita che la frase corretta deve ancora cominciare. Si tratta quindi di un sistema che deve fornire uscite diverse, pur con la stessa parola di ingresso, in funzione delle parole applicate in ingresso prima di quella attuale. Per consentire questo funzionamento, il sistema deve possedere la capacità di *ricordare* la sequenza di parole inserite nel momento in cui acquisisce un nuovo ingresso. Si dice brevemente che il sistema deve essere dotato di **memoria**. Un sistema con questa proprietà deve contenere, al suo interno, un particolare dato variabile che rappresenti, con il suo particolare valore, la *condizione* in cui viene a trovarsi in seguito alla particolare successione di parole ricevute al suo ingresso. Questo dato variabile è detto **stato** o **stato interno** del sistema e deve poter assumere tanti valori diversi quante sono le diverse sequenze degli ingressi da ricordare. Nel caso esemplificato il sistema deve poter ricordare le seguenti quattro sequenze di ingresso, alle quali sono associati arbitrariamente quattro valori numerici assunti dalla variabile di stato interno (*assegnazione degli stati*):

Situazioni da ricordare	Rappresentazione simbolica dello stato	Valori assegnati arbitrariamente alla variabile di stato interno
- Non è stata ricevuta alcuna parola corretta.	→ S0	→ 0
- Ricevuta prima parola corretta	→ S1	→ 1
- Ricevute due parole corrette	→ S2	→ 2
- Ricevute tre parole corrette	→ S3	→ 3

Tabella 1.2.1

All'inserimento di ogni nuova parola corretta in ingresso, in funzione dello stato interno attuale (**stato presente**) è definito lo stato successivo (**stato futuro**) in cui si porta il sistema. Una possibile evoluzione dello stato interno, in funzione dell'ingresso, può essere rappresentata nel seguente modo:

istante	stato presente	parola in ingresso	stato futuro
0	0	→ Siamo	→ 1
1	1	→ tutti	→ 2
2	2	→ Siamo	→ 1
3	1	→ Siamo	→ 1
4	1	→ tutti	→ 2
5	0	→ contenti	→ 3
.....ecc.			

Tabella 1.2.2

Definito, in questo modo, lo stato interno del sistema resta determinato il valore dell'uscita, corrispondente al messaggio che, in questa condizione, deve essere stampato sul monitor. Si hanno cioè le seguenti corrispondenze:

<i>stato</i>	<i>uscita</i>
<i>S0</i>	<i>Y0</i>
<i>S1</i>	<i>Y1</i>
<i>S2</i>	<i>Y2</i>
<i>S3</i>	<i>Y3</i>

Tabella 1.2.3

Si può, fatte queste considerazioni preliminari, definire il seguente legame tra ingresso e uscita del sistema esemplificato.

legame ingresso uscita ad ogni parola di ingresso il sistema, in funzione dello stato attuale, assume un nuovo stato in base alla descrizione fatta. Il nuovo stato determina la nuova uscita secondo la corrispondenza stabilita.

1.3 Stato interno. Sistemi propri e sistemi impropri.

L'esempio riportato nel paragrafo precedente ha introdotto un importante concetto, relativo ai sistemi dinamici. Per **sistema dinamico** si intende un sistema che *evolve* nel tempo, nel quale, cioè, l'uscita, in un certo istante, non dipende dall'ingresso nello stesso istante, ma dipende dall'evoluzione precedente degli ingressi fino all'istante attuale.

In contrapposizione a questo tipo di sistemi, vi sono i **sistemi statici o istantanei** nei quali, pur variando l'ingresso e l'uscita in funzione del tempo, l'uscita in ogni istante dipende solo dall'ingresso nello stesso istante.

Per descrivere il legame ingresso uscita di un sistema dinamico, si è introdotto il concetto di stato interno, intendendo con ciò una variabile capace di contenere tutta l'informazione riguardante la "storia passata" del sistema, fino all'istante attuale. Questa variabile rappresenta tutto ciò che è necessario sapere, oltre al valore dell'ingresso, per determinare il comportamento futuro del sistema. Non è quindi necessario che questa variabile rappresenti qualche grandezza fisica, può essere un qualunque dato astratto, l'importante è che ai valori dello stato interno corrispondano precise condizioni interne del sistema, utili a prevederne l'evoluzione futura. Riprendendo l'**Esempio 1.1**, si può osservare che ai quattro stati interni del sistema si può assegnare anche un nome simbolico, di nessun significato pratico, l'importante è stabilire una corrispondenza precisa tra il nome attribuito ad ogni stato interno e il contenuto informativo ad esso associato. Così, affermare che il sistema, in un certo istante si trova nello stato *S2*, significa affermare che il sistema ha ricevuto, in ordine corretto, le prime due parole della frase da inserire. Se poi allo stato *S2* è *assegnato*, per motivi di convenienza il valore numerico 2, come nel caso esemplificato, o un altro valore numerico, non cambia il significato attribuito a questo valore dello stato. Stesso discorso vale per gli altri tre stati, evidentemente a due stati diversi deve essere assegnato (arbitrariamente) un valore numerico diverso.

Il funzionamento di un sistema dinamico può essere rappresentato dal modello grafico di **Fig.1.3.1**, che mostra come, in un certo istante, il valore dell'ingresso ed il valore dello stato attuale (*stato presente*) determina il valore futuro dello stato (*stato futuro*) il quale poi a sua volta determina il nuovo valore dell'uscita.

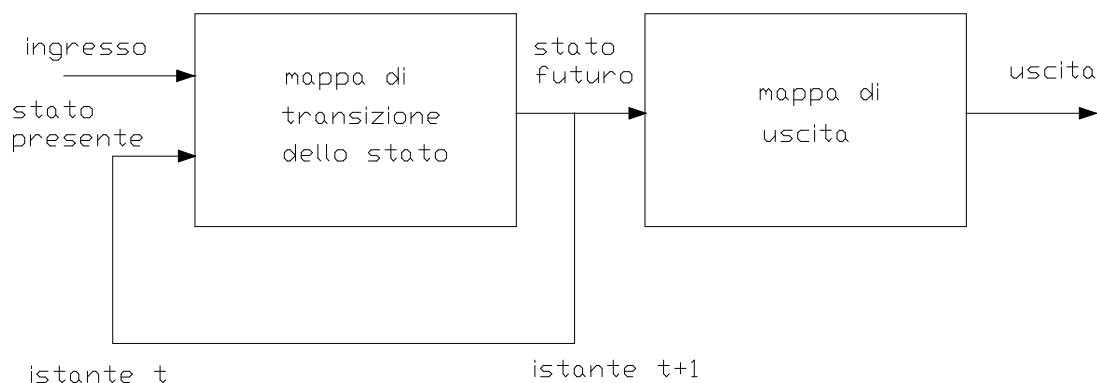


Fig.1.3.1 Sistema dinamico proprio in cui è evidenziato il legame tra ingresso-stato-uscita.

La **Fig.1.3.1** mostra la *separazione* tra ingresso e uscita prodotta dalla variabile di stato. L'ingresso non agisce direttamente sull'uscita, ma contribuisce, con lo stato attuale, a determinare il valore dello stato futuro. L'uscita invece è determinata esclusivamente dal valore dello stato. Nel primo blocco dello schema di **Fig.1.3.1** è implicita una separazione temporale tra ingressi e uscite. I due ingressi di questo primo blocco rappresentano lo stato e l'ingresso del sistema nell'istante attuale (istante t), mentre l'uscita del primo blocco rappresenta lo stato raggiunto dal sistema un'unità di tempo successiva (istante $t+1$). Sistemi dinamici che possono essere rappresentati come in **Fig.1.3.1** sono detti **sistemi propri**.

Il sistema che riconosce una frase corretta, dell'**Esempio 1.1**, è un sistema proprio. È possibile rappresentare un sistema dinamico con lo schema di **Fig.1.3.2**, nella quale l'uscita, è funzione, oltre che dello stato interno, anche dell'ingresso.

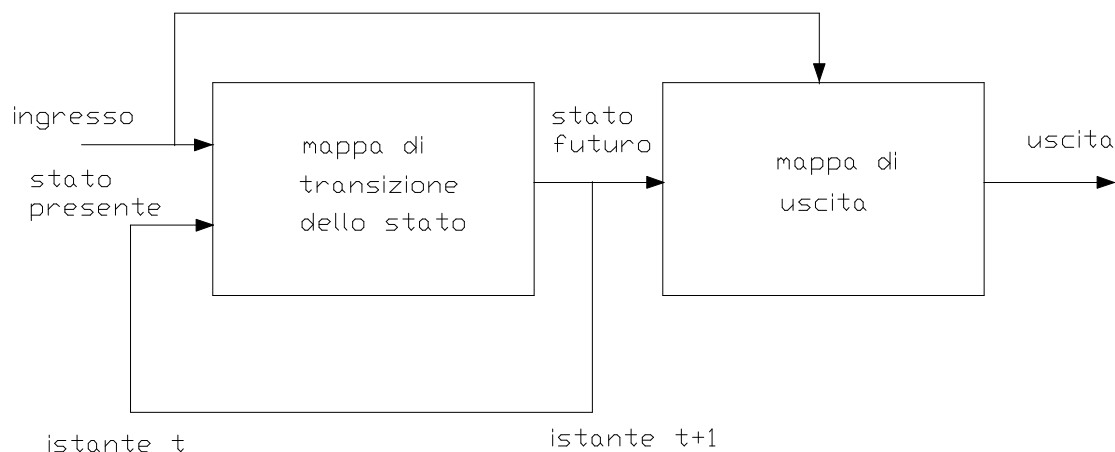


Fig.1.3.2 Sistema dinamico improprio in cui è evidenziato il legame tra ingresso-stato-uscita.

Sistemi rappresentati secondo lo schema di **Fig.1.3.2** sono detti **sistemi impropri**. Nel seguito, a meno che non sia indicato esplicitamente, si considereranno solamente sistemi propri dato che, quelli impropri, presentano delle caratteristiche che non li rendono fisicamente realizzabili.

1.4 Mappa di transizione degli stati. Mappa di uscita.

Gli schemi di **Fig.1.3.1** e **Fig.1.3.2** mostrano chiaramente che per determinare un sistema è necessario precisare la relazione che lega ingresso e stato presente allo stato futuro e la relazione che lega lo stato all'uscita. La prima è espressa da una funzione che è detta **mappa di transizione dello stato** e consente di determinare, a partire da un certo istante e da un certo stato iniziale, il valore assunto dallo stato interno in un istante di tempo successivo, purché si conosca l'ingresso dall'istante iniziale fino a quello attuale. Nell'Esempio 1 questa relazione, *descritta a parole*, ha consentito di determinare (vedi Tabella 1.2.2) lo stato raggiunto dal sistema (valore dello stato finale=3), a iniziare dall'istante 0 per arrivare all'istante 5, una volta conosciuto lo stato iniziale (valore dello stato=0) e la successione delle parole inviate all'ingresso. Evidentemente, non si può pensare di utilizzare solo descrizioni a parole della relazione che consente di determinare l'evoluzione dello stato, ma è necessario prevedere uno strumento adeguato, e di facile lettura, che consenta di determinare in modo semplice qualunque evoluzione dello stato. Con riferimento all'**Esempio 1.1**, indicando con i simboli **P1**, **P2** e **P3** nell'ordine le tre parole della frase corretta (nell'esempio P1="Siamo", P2="tutti" e P3="contenti") la mappa di transizione degli stati può essere rappresentata dalla tabella di **Fig.1.4.1**.

		INGRESSO			
		P1	P2	P3	$\bar{P}1, \bar{P}2, \bar{P}3$
STATO PRESENTE	S0	S1	S0	S0	S0
	S1	S1	S2	S0	S0
	S2	S1	S0	S3	S0
	S3	S1	S0	S0	S0
		STATO FUTURO			

Fig.1.4.1 Mappa di transizione degli stati del sistema che riconosce una frase corretta di tre parole.

Le quattro righe della tabella di **Fig.1.4.1** si riferiscono ai quattro stati interni del sistema, indicati sulla colonna di sinistra, mentre le quattro colonne si riferiscono ai possibili ingressi, indicati sulla riga in alto. Nelle prime tre colonne sono state indicate le parole corrette P1, P2 e P3, nella quarta colonna con i simboli $\bar{P}1$, $\bar{P}2$, $\bar{P}3$ si intendono tutte le parole che *non* sono P1, *non* sono P2 e *non* sono P3. All'interno delle caselle che non fanno parte della riga in alto e della colonna di sinistra sono indicati gli stati futuri raggiunti dal sistema, in corrispondenza ad ogni stato presente (letto sulla stessa riga nella colonna di sinistra) e ad ogni parola di ingresso (letta sulla stessa colonna nella riga in alto). Nella tabella, a titolo di esempio, è stato riportato il caso in cui il sistema si trova nello stato presente S1 (vedi colonna di sinistra) ed è inserita in ingresso la parola P2 (vedi riga in alto). Le due frecce indicano la casella corrispondente a questa situazione, nella quale è indicato che lo stato futuro è S2. Al successivo inserimento di una parola, il nuovo stato presente è S2, per questo, deve essere presa in considerazione la riga sottostante per valutare il nuovo cambiamento di stato. L'ultima colonna della tabella mostra che qualunque sia lo stato presente lo stato futuro è sempre S0 quando nel sistema non si inserisce nessuna delle tre parole corrette.

La seconda relazione necessaria a descrivere il comportamento del sistema è quella che lega lo stato interno all'uscita (per sistemi propri). Questa relazione detta **mappa di uscita** mette semplicemente in corrispondenza, in ogni istante, lo stato interno ed il valore dell'uscita. Nell'**Esempio 1.1** questa mappa è già convenientemente rappresentata dalla **Tabella 1.2.3**.

1.5 Sistemi a tempo discreto e a tempo continuo. Sistemi analogici e sistemi digitali.

Il sistema descritto nell'**Esempio 1.1** acquisisce una nuova parola ad intervalli di tempo regolari, perciò, dal punto di vista del legame ingresso-uscita, il suo funzionamento può essere definito solo negli istanti in cui è inserita una nuova parola. Per questa proprietà il sistema esemplificato è detto **sistema a tempo discreto**. La Fig.1.5.1 illustra questa modalità di funzionamento..

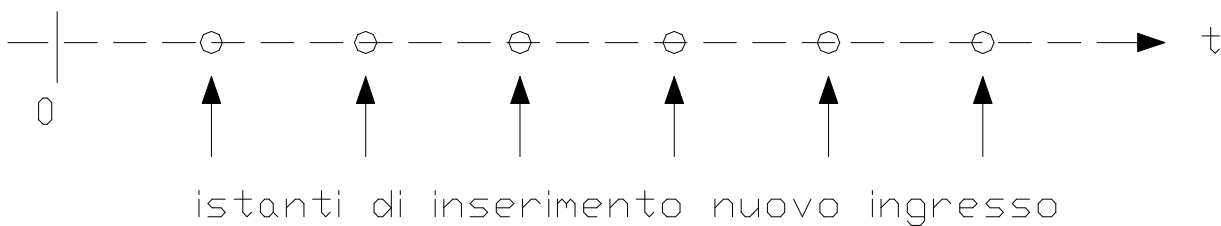


Fig. 1.5.1 Asse dei tempi di un sistema a tempo discreto.

Per il sistema potenziometro, illustrato in Fig. 1.1.2, si osserva che il funzionamento può essere descritto in tutti gli istanti di tempo, dato che tutte le variazioni di V_i , e le relative variazioni di V_o ($V_o = G V_i$), hanno carattere di continuità rispetto al tempo, come evidenzia la Fig. 1.5.2.

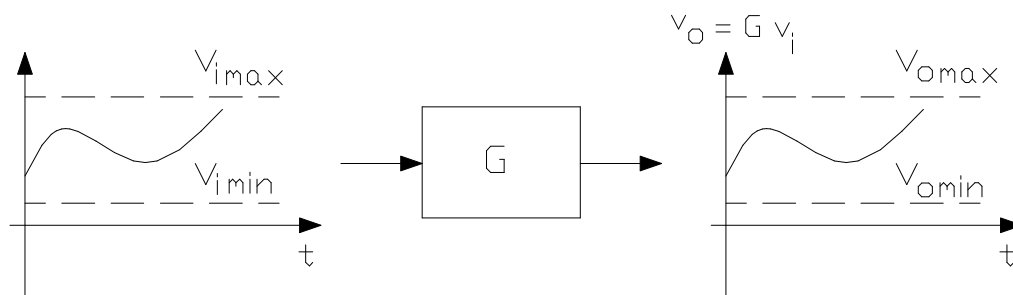


Fig. 1.5.2 Esempio di ingressi e uscite per un sistema continuo.

Questi sistemi sono detti **sistemi a tempo continuo**. Inoltre le tensioni di ingresso e di uscita, variabili in un prefissato intervallo di valori (compresi tra un minimo e un massimo), possono assumere infiniti valori (tanti quanti sono i punti di un segmento). Un sistema definito con continuità sia rispetto al tempo si ha rispetto al campo di valori assunto dalle grandezze di ingresso e di uscita è detto **sistema analogico**.

In contrapposizione a questa categoria sono detti **sistemi digitali** quei sistemi nei quali sia il tempo sia i valori di ingresso e di uscita sono di tipo discreto.

Infine si osserva che, il sistema potenziometro, presenta in ogni istante un valore dell'uscita che dipende solo dall'ingresso attuale e non dagli ingressi precedenti. Questo sistema non è quindi dotato di memoria, come il "riconoscitore di frase corretta", e non è previsto l'uso di una variabile di stato per descrivere il suo funzionamento ingresso-uscita. Si tratta di un sistema statico, come precedentemente precisato.

1.6 Automa a stati finiti. Diagramma degli stati

Una classe molto importante di sistemi è costituita dagli automi. Per **automa** si intende un sistema dinamico a tempo discreto con ingresso e uscita che possono assumere solo un numero finito di valori. Se anche lo stato del sistema assume un numero finito, il sistema è detto **automa a stati finiti**. Nel seguito quando ci si riferirà ad un automa si intenderà implicitamente un automa a stati finiti. Per quanto detto al paragrafo 1.4 si comprende che gli automi appartengono alla classe dei sistemi digitali. Appartengono, in particolare, a questa classe di sistemi i calcolatori elettronici, i circuiti digitali sequenziali e molti altri sistemi utilizzati nel campo dell'automazione.

Gli automi, come più in generale i sistemi, possono essere propri o impropri a seconda che l'uscita sia, rispettivamente, funzione solo dello stato, o dello stato e dell'ingresso. Un automa proprio è detto anche **macchina di Moore** mentre un automa improprio è detto **macchina di Mealy**.

Anche il sistema descritto nell'**Esempio 1.1** è un automa. Infatti gli ingressi sono in numero finito, dato che si è limitato l'insieme di ingresso alle parole della lingua italiana. L'insieme di uscita è finito dato che è costituito solo da quattro messaggi visualizzati dal display. L'insieme degli stati è finito, dato che il sistema possiede quattro stati interni. Infine il suo funzionamento è definito solo negli istanti di tempo in cui si inserisce (con la tastiera) una nuova parola di ingresso (con l'attivazione del tasto "Enter"), per cui il sistema è a tempo discreto.

Per rappresentare il legame ingresso-uscita di un automa (più in generale per un sistema digitale) si possono utilizzare la tabella di transizione degli stati e la tabella di uscita. Si può utilizzare, inoltre, una rappresentazione di questo legame che consente una miglior visualizzazione dell'evoluzione dello stato e, quindi, dell'uscita, detta **diagramma degli stati**. Per **diagramma degli stati** si intende un grafo formato da cerchi, detti nodi, all'interno dei quali è indicato solo lo stato interno, per un sistema improprio, o lo stato interno e l'uscita, per un sistema proprio. I nodi sono collegati tra loro da segmenti orientati sui quali è indicato il valore dell'ingresso, per il sistema improprio, o dell'ingresso e l'uscita, per il sistema proprio che produce la transizione da un nodo (segmento uscente) all'altro (segmento entrante). La **Fig.1.6.1** illustra gli elementi fondamentali di questo grafo.

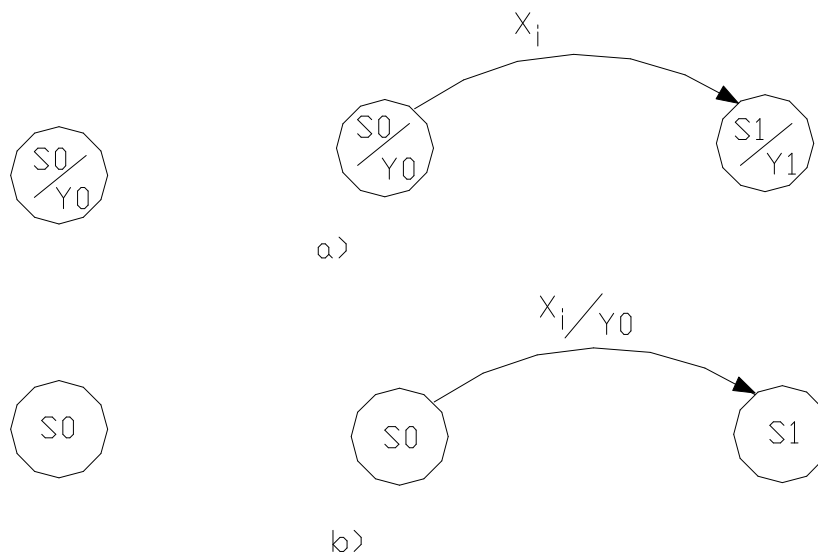


Fig.1.6.1 a) Rappresentazione di un nodo, con stato e uscita associata, e transizione tra due stati, per un sistema proprio. b) Analoga rappresentazione per un sistema improprio.

In questa figura è mostrata una transizione dello stato che dal valore iniziale S_0 , con ingresso X_i , passa al valore S_1 sia per un sistema proprio sia per uno improprio. Nel primo caso all'interno dei nodi è indicato, oltre che lo stato, anche l'uscita che gli corrisponde. Nel sistema improprio l'uscita è associata, oltre che allo stato dal

quale esce il segmento orientato, anche all'ingresso X_i , per cui l'uscita è indicata, insieme all'ingresso, sul segmento orientato.

Ritornando all'**Esempio 1.1**, sul sistema che riconosce una frase corretta, si può, con queste regole tracciare il diagramma degli stati. Per questo scopo si ricorre alla convenzione di indicare i quattro messaggi di uscita con i simboli Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 , secondo la seguente corrispondenza:

Y_0	"Nessuna parola corretta"
Y_1	"Prima parola corretta"
Y_2	"Seconda parola corretta"
Y_3	"...Complimenti frase corretta..."

e di mantenere per gli ingressi e gli stati gli stessi simboli utilizzati nella **Fig.1.4.1**. Viene cioè usata la convenzione di indicare con P_1, P_2 e P_3 , nell'ordine le tre parole della frase corretta; con $\bar{P}_1$ "qualunque parola che non sia P_1 ", con $\bar{P}_2$ qualunque parola che non sia P_2 , con $\bar{P}_3$ "qualunque parola che non sia P_3 ".

Il diagramma degli stati deve avere tanti nodi quanti sono gli stati interni posseduti e da ogni stato devono uscire tanti segmenti orientati quanti sono i possibili valori assunti dall'ingresso. Rispettando queste convenzioni e ricordando che il sistema esemplificato è di tipo proprio, per cui in ogni nodo va indicato anche il valore dell'uscita, si ottiene il grafico di **Fig.1.5.2**.

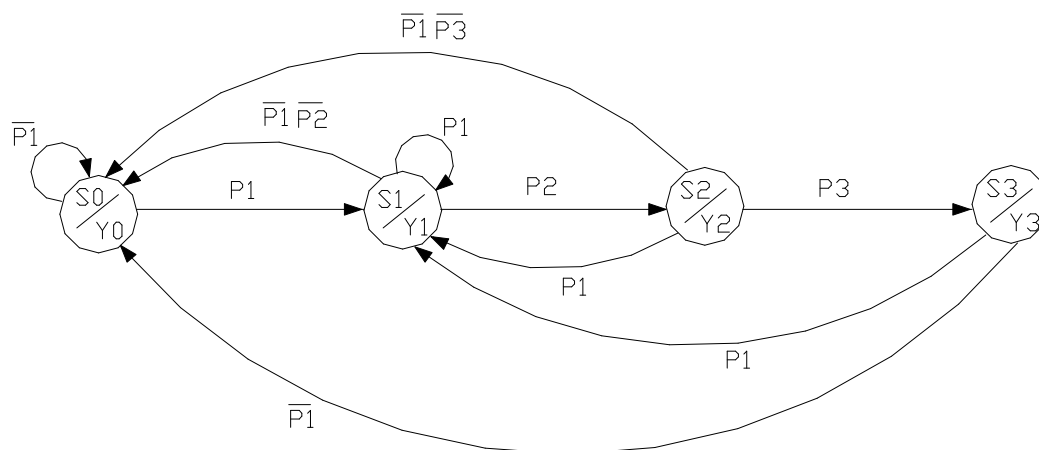


Fig. 1.6.2 Diagramma di stato che descrive il funzionamento ingresso-uscita del riconoscitore di frase corretta.

In **Fig.1.6.2** l'arco orientato che mostra la transizione dallo stato S_2 a S_0 è marcato con l'ingresso $P_1 \cdot P_3$. Questa indicazione significa che la transizione suddetta si verifica per ogni parola di ingresso che non sia P_1 e non sia P_3 . In pratica qualunque parola diversa da P_1 e da P_3 produce questa transizione.

A conclusione di queste considerazioni si può osservare che il diagramma di stato esprime il legame ingresso-stato-uscita di un automa, mentre nel caso di un sistema analogico come il potenziometro di **Fig.1.1.2**, il legame ingresso-uscita è espresso dall'equazione $V_0 = GV_i$. Nei due casi sono stati fatti due modelli, rispettivamente grafico e matematico, del sistema fisico da analizzare.

1.7 Classificazione dei sistemi

A titolo riassuntivo si cerca di presentare una classificazione dei sistemi che, anche se incompleta, può essere utile per definire le diverse metodologie di analisi e di progetto più vantaggiose per i sistemi appartenenti alla stessa classe. Va anche rilevato che un sistema fisico può appartenere a più di una delle classi sotto elencate.

Sistemi dinamici	la cui uscita in un certo istante dipende dall'andamento degli ingressi fino a quell'istante
Sistemi statici	la cui uscita in un certo istante dipende solo dall'ingresso nello stesso istante
Sistemi a tempo continuo	i cui ingressi e le cui uscite sono definite su tutti l'asse dei tempi
Sistemi a tempo discreto	i cui ingressi sono definiti solo ad intervalli di tempo finiti.
Sistemi analogici	i cui ingressi e le cui uscite sono definiti con continuità in un certo intervallo di valori e con continuità rispetto al tempo.
Sistemi digitali	i cui ingressi e le cui uscite possono assumere solo un numero finito di valori e sono definiti solo ad intervalli di tempo finiti.
Sistemi lineari	per i quali esiste proporzionalità tra gli ingressi e le uscite. Questa definizione data in modo poco preciso per ragioni di semplicità verrà meglio descritta nel seguito.
Sistemi stazionari	nei quali i parametri che lo caratterizzano non cambiano nel tempo.

Per gli scopi della seguente trattazione si limita la classificazione a questi sistemi, anche se molti autori estendono la classificazione ad altre tipologie di sistemi. Tra le classi di sistemi non citate vale la pena di ricordare, per la loro importanza, i sistemi deterministici e probabilistici che, rispettivamente, stabiliscono un legame ingresso uscita definito da relazioni matematiche rigorose o un legame definito nell'ambito del calcolo delle probabilità. In seguito si farà riferimento esclusivo a sistemi di tipo deterministico, come sono quelli esemplificati fino a questo punto della trattazione.

Per quanto riguarda l'importante categoria dei sistemi lineari e stazionari, non discussi in precedenza, sarà data successivamente una più ampia descrizione.

1.8 Modello di un sistema - Classificazione dei modelli.

Si definisce **modello di un sistema fisico** una qualunque sua rappresentazione utile a studiare il suo funzionamento. In particolare, quando si riesce ad ottenere una relazione matematica che lega l'ingresso all'uscita si afferma che si è ottenuto il **modello matematico** del sistema.

La definizione di modello di un sistema è quindi una qualunque sua rappresentazione mediante la quale è possibile mettere in luce particolari aspetti e ottenere dei risultati utili che possono essere applicati al sistema originario. Si tratta di una definizione che consente la più vasta utilizzazione di questo concetto, nel senso che non è posto alcun limite alla natura e alla struttura dell'oggetto preso come modello. Si può in ogni modo pensare ad una prima semplice classificazione suddividendo i modelli che si possono fare di un sistema in:

modelli fisici (o **modelli iconici**)
modelli analogici
modelli astratti.

Alla prima categoria appartengono quei modelli che fanno una rappresentazione del sistema che si avvicina di più ad una percezione "sensoriale". Il plastico di un edificio o di un'automobile in scala ridotta sono esempi di modelli che si possono far rientrare in questa categoria. Così la rappresentazione grafica di una macchina, come il disegno di un motore a scoppio, il disegno di un impianto di condizionamento sulla pianta di un appartamento, ecc. appartengono alla classe dei modelli iconici. In questi modelli si cerca di rispettare la morfologia del sistema originario, in quanto costituisce elemento importante per lo studio di alcune proprietà del dispositivo in esame. Questo modo di modellare un sistema è quello più intuitivo dato che appartiene all'esperienza comune. Non sempre però i modelli fisici in scala ridotta sono la cosa più utile per chi debba affrontare lo studio di un qualunque sistema. Capita molto spesso di dover studiare dei dispositivi che appartengono ad un certo settore, per esempio al campo della termotecnica, utilizzando risultati di **sistemi analoghi** di un altro settore, ad esempio al campo dell'elettrotecnica e dell'elettronica. Va precisato che due sistemi si dicono analoghi quando, pur essendo di natura diversa, hanno un funzionamento ingresso (eventualmente stato) uscita descritto da relazioni matematiche "formalmente" uguali. La **Fig.1.7.1** illustra questo concetto per un sistema termico e per l'analogo sistema elettrico quando si stabiliscano per le grandezze ingresso-uscita dei due sistemi le seguenti corrispondenze:

$\Delta\theta$ (salto di temperatura)	$\rightarrow$ V (tensione elettrica)
P (potenza termica assorbita)	$\rightarrow$ I (corrente elettrica)
R_{th} (resistenza termica)	$\rightarrow$ R (resistenza elettrica)

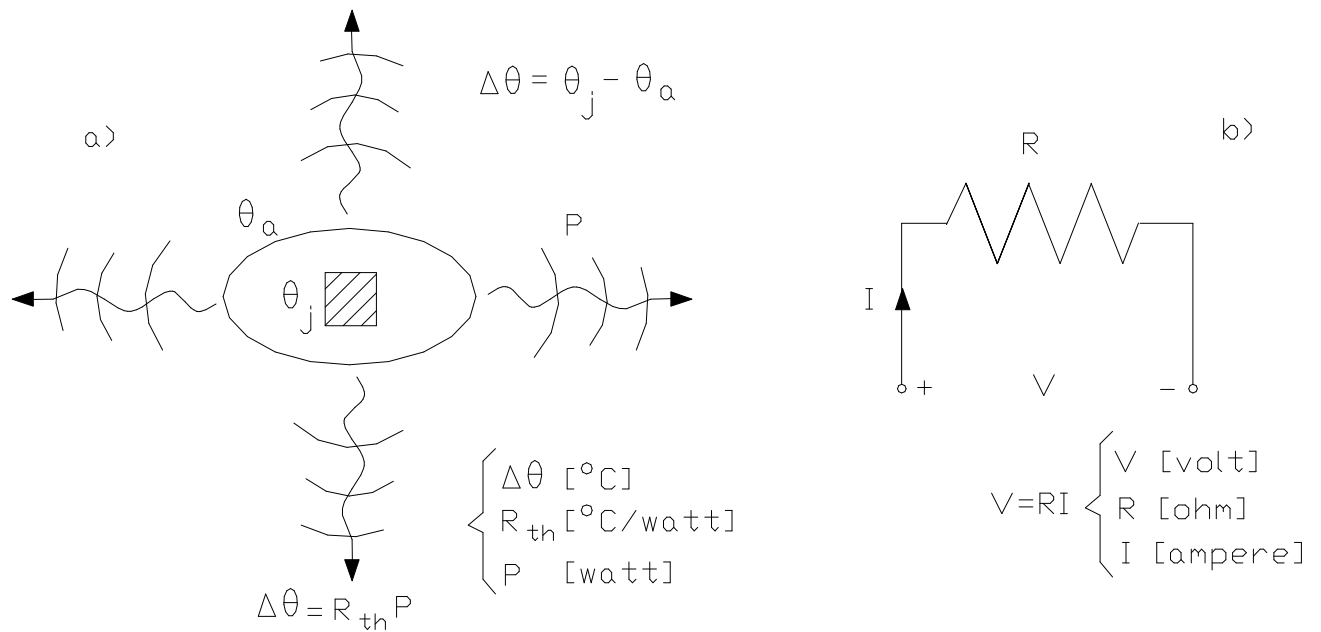


Fig.1.7.1 Sistema termico, costituito da un corpo irradiante calore, a), e analogo modello elettrico, b).

In questo caso, tutte le considerazioni che si possono fare sulle soluzioni del circuito elettrico si possono trasportare sul sistema termico, utilizzando magari delle forzature nel linguaggio, mutate dal settore elettrico, con il quale si descrive la trasmissione del calore. Così si può affermare che, tanto maggiore è la “tensione termica” (in realtà il salto di temperatura), a parità di resistenza termica, tanto maggiore è la “corrente termica” (in realtà la quantità di calore smaltita nell’unità di tempo), inviata nell’ambiente esterno dal corpo irradiante.

L’ultima categoria di modelli, indicata nella precedente classificazione, i **modelli astratti**, è quella che si allontana più di tutte dalla percezione fisica ma che è utilizzata maggiormente per la modellizzazione dei sistemi.

Nei paragrafi precedenti si sono già viste molte esemplificazioni di questi modelli che sono sia di tipo grafico, come gli schemi a blocchi, il diagramma di stato, sia di tipo matematico, come le relazioni che descrivono il funzionamento del potenziometro e della leva, che di tipo logico, come il programma che, eseguito dal calcolatore, realizza il “riconoscitore di frase corretta”.

Questi ultimi modelli sono di gran lunga i più utilizzati nel resto di questa trattazione e, nonostante il loro grado di astrazione, che li allontana significativamente dal sistema fisico che rappresentano, sono d’indubbia validità, in tutte le fasi di analisi e di progetto di macchine di qualunque settore applicativo.