CONTROLLI AUTOMATICI
Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/ControlliAutomatici.html

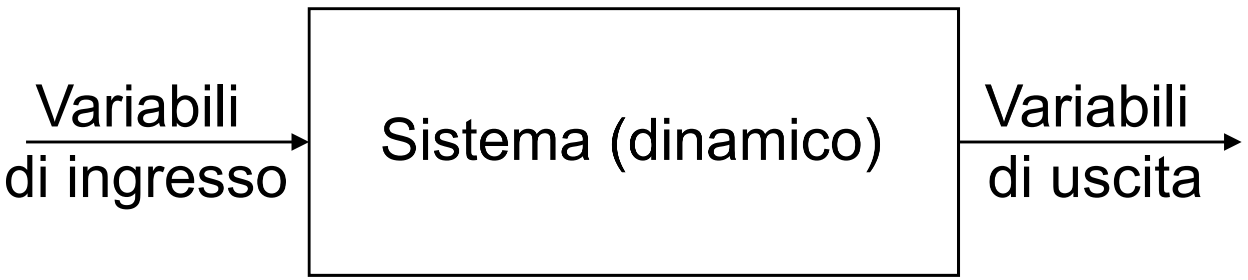
SISTEMI E MODELLI

Ing. Luigi Biagiotti
e-mail: luigi.biagiotti@unimore.it
http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti

Sistemi e Modelli - Dal sistema ad un modello

- **Sistema:**

  insieme, isolato artificialmente dal contesto, costituito da più parti tra loro interagenti di cui si vuole indagare il comportamento



Variabili di ingresso: azioni compiute sul sistema da agenti esterni che ne influenzano il comportamento

variabili di uscita: grandezze del sistema in esame che, per qualche ragione, sono di interesse

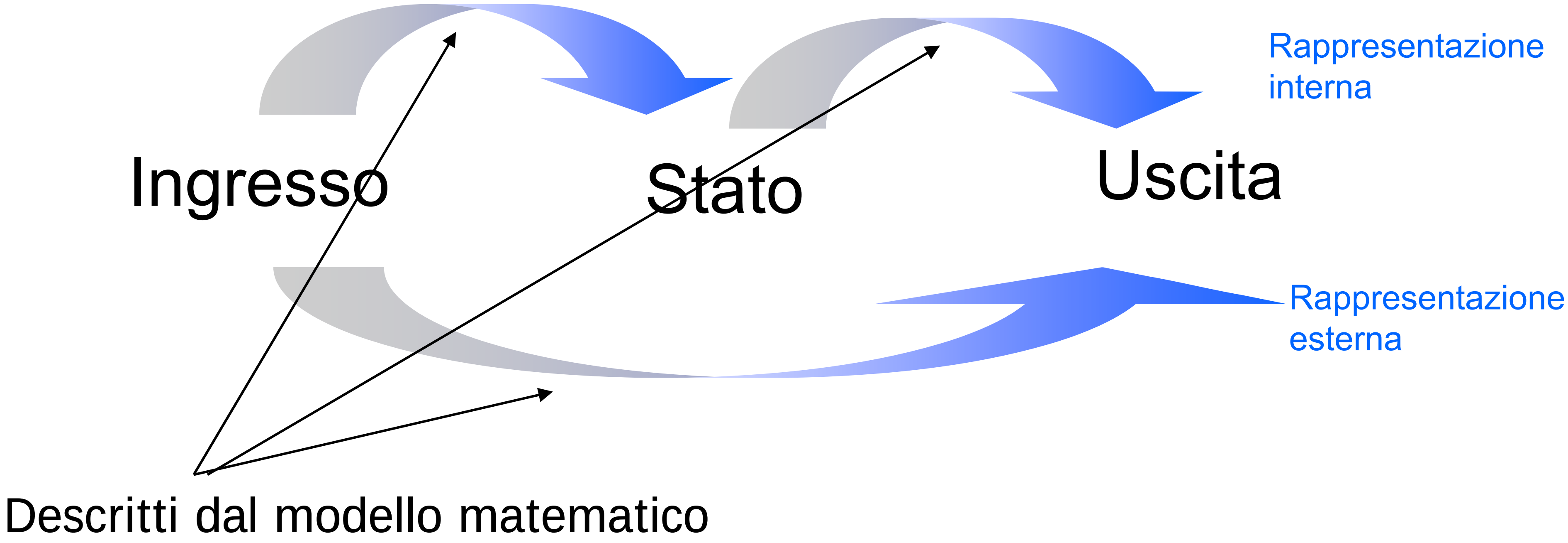
<u>Rapporto causa-effetto tra le variabili</u>

Sistemi e Modelli - Dal sistema ad un modello

- **Sistema statico/dinamico**
  - modello matematico dei sistemi statici
    - equazioni algebriche (sistemi privi di memoria)
      - l'uscita del sistema dipende solo dal valore assunto dall'ingresso in quell'istante
      - es: relazione tra tensione e corrente in un resistore
  - modello dei sistemi dinamici *(a parametri concentrati)*
    - equazioni differenziali (sistemi con memoria)
      - l'uscita del sistema non dipende solo dal valore assunto dall'ingresso in quell'istante, ma anche da quelli passati
      - es: relazione tra tensione e corrente in un condensatore

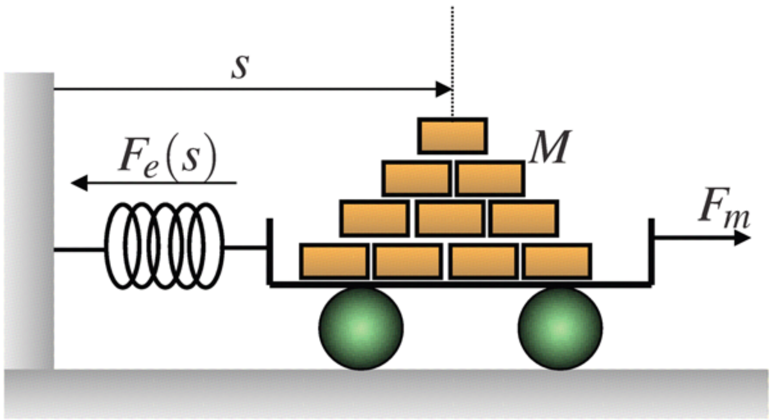
Variabili di stato: variabili che descrivono la “situazione interna” del sistema (determinata dalla storia passata) necessarie per determinare l’uscita

Sistemi e Modelli - Dal sistema ad un modello: Esempi



Esempi

Sistema meccanico

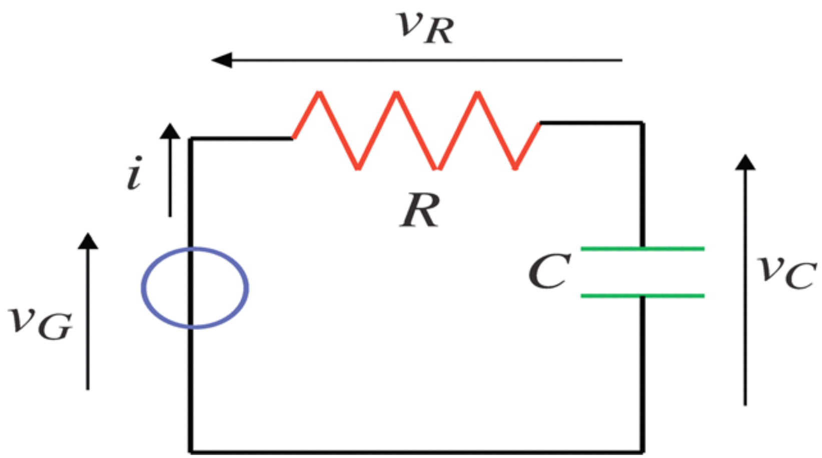


Ingresso: forza motrice F_m

Uscita: posizione del carrello s

Stato: posizione e velocità del carrello

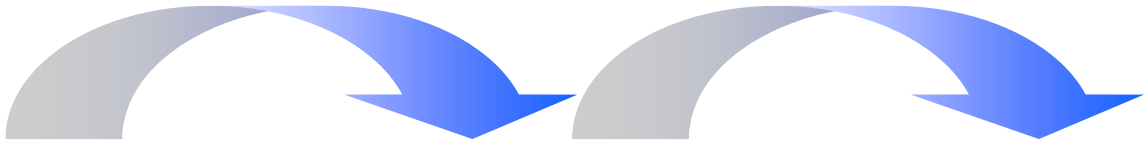
Circuito RC



Ingresso: tensione v_G ai capi del generatore

Uscita: tensione v_R ai capi della resistenza

Stato: tensione v_C ai capi del condensatore



Ingresso Stato Uscita

- Evoluzione dello stato in funzione dell'ingresso e dello stato:

$$\underbrace{\frac{dx(t)}{dt}}_{\text{Derivata dello stato all'istante t}} = f\big(\underbrace{x(t)}_{\text{Vettore di stato}}, \underbrace{u(t)}_{\text{Vettore di ingresso}}, t\big)$$

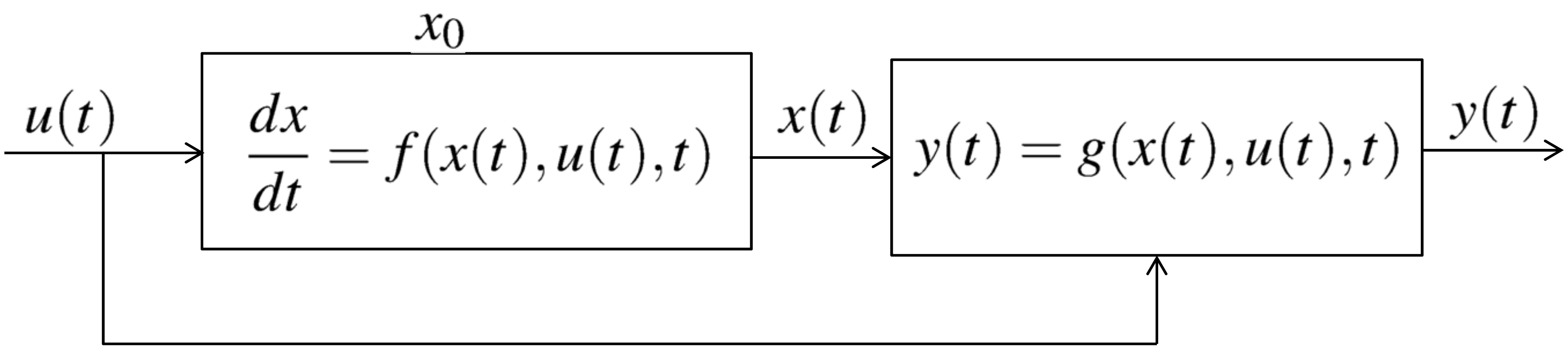
Equazione di stato

- Dipendenza dell'uscita dall'ingresso e dallo stato

$$\underbrace{y(t)}_{\text{Vettore di uscita}} = g\big(x(t), u(t), t\big)$$

Dato $x(t_0)$ (valore dello stato all'istante iniziale) e dato $u(t)$, $t \geq t_0$, sotto certe proprietà di regolarità di f( ), allora l'equazione di stato definisce l'andamento di x(t) e y(t).

Sistemi e Modelli – Rappresentazione di stato (interna)



$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_r \end{pmatrix} \quad f(x,u,t) = \begin{pmatrix} f_1(x,u,t) \\ f_2(x,u,t) \\ \vdots \\ f_n(x,u,t) \end{pmatrix}$$

$$g(x,u,t) = \begin{pmatrix} g_1(x,u,t) \\ g_2(x,u,t) \\ \vdots \\ g_r(x,u,t) \end{pmatrix}$$

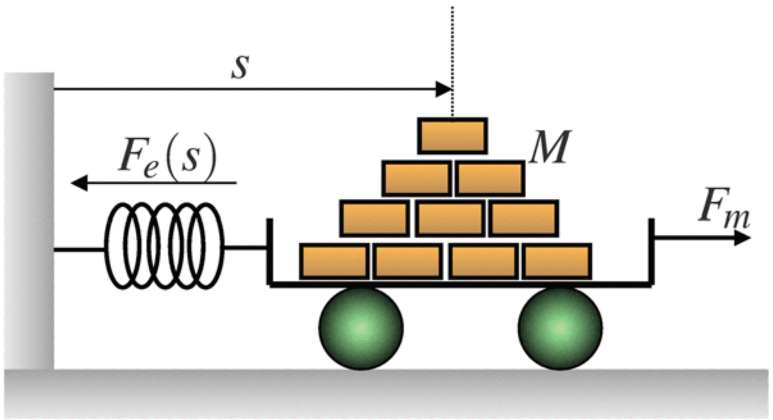
$n =$ Ordine del modello

$m =$ Numero di ingressi

$r =$ Numero di uscite

Sistemi e Modelli – Rappresentazione di stato (interna) - esempio

- Sistema meccanico



Dalla legge di Newton si ha che

$$M\frac{d^2s}{dt^2} = F_m - F_e(s)$$

quindi definendo

$$x := \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \\ \frac{ds}{dt} \end{pmatrix}$$

si ottiene il modello matematico

$$\dot{x}_1 = x_2$$
$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M}(F_m - F_e(x_1))$$
$$y = x_1$$

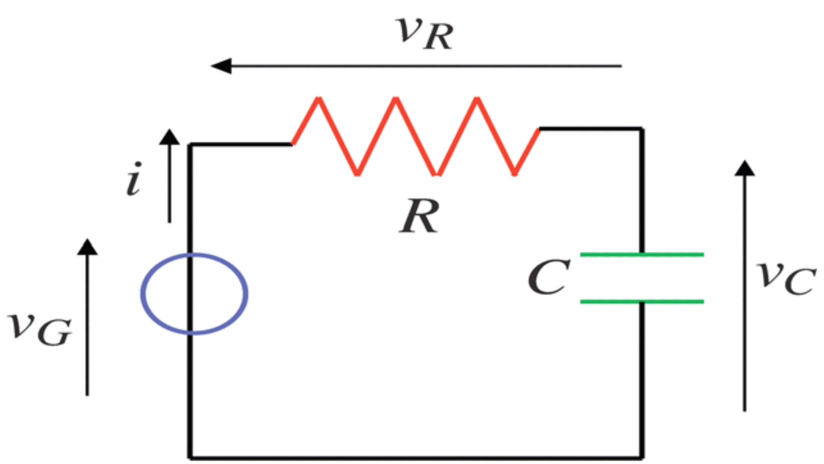
$$\dot{x} = f(x,u)$$
$$y = g(x,u)$$

dove

$$u := F_m \qquad f(x,u) := \begin{pmatrix} x_2 \\ \frac{1}{M}(u - F_e(x_1)) \end{pmatrix} \qquad g(x,u) := x_1$$

Sistemi e Modelli – Rappresentazione di stato (interna) - esempio

- Circuito RC



Dalla legge delle tensioni

$$v_R(t) = v_G(t) - v_C(t)$$

e sapendo che

$$C\frac{dv_C(t)}{dt} = i(t)$$

$$v_R(t) = Ri(t)$$

si ottiene

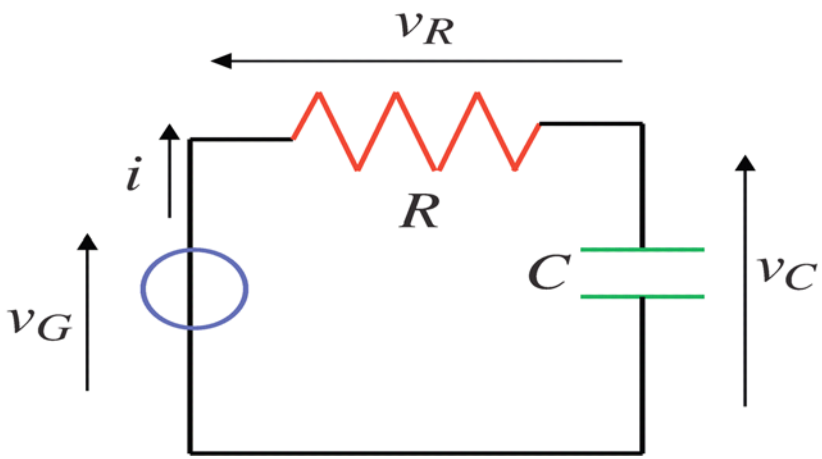
$$\dot{x}(t) = \frac{1}{RC}(u(t) - x(t))$$

$$y(t) = (u(t) - x(t))$$

Avendo posto $u(t) = v_G(t)$, $x(t) = v_C(t)$, $y(t) = v_R(t)$

Sistemi e Modelli – Rappresentazione ingresso-uscita (esterna) - esempio

- Circuito RC



Dalla legge delle tensioni

$$v_R(t) = v_G(t) - v_C(t)$$

e sapendo che

$$v_c(t) = \frac{1}{C}\int i(t)dt$$

$$v_R(t) = Ri(t)$$

si ottiene

$$v_R(t) = v_G(t) - \frac{1}{RC}\int v_R(t)dt$$

ovvero (derivando rispetto a t)

$$\frac{dy(t)}{dt} + \frac{1}{RC}y(t) = \frac{du(t)}{dt}$$

Avendo posto $u(t) = v_G(t)$, $y(t) = v_R(t)$

Sistemi e Modelli

- statici/dinamici
  - modello matematico dei sistemi statici
    - equazioni algebriche (sistemi privi di memoria)
  - modello dei sistemi dinamici (a parametri concentrati)
    - equazioni differenziali (sistemi con memoria)
- monovariabili/multivariabili (SISO – MIMO)
  - un ingresso-una uscita, più ingressi-più uscite
- lineari/nonlineari
  - le variabili entrano linearmente/non linearmente
- invarianti/tempo varianti
  - le loro caratteristiche sono costanti/variano nel tempo
- a parametri concentrati/distribuiti
  - equazioni differenziali ordinarie/alle derivate parziali

Sistemi e Modelli

Definizione:

- Un modello si dice causale quando l'uscita corrispondente ad una data sollecitazione si manifesta soltanto in istanti non anteriori a quello iniziale di applicazione della sollecitazione
- Un modello non causale si dice anticipativo.
- Un modello anticipativo non può corrispondere ad alcun sistema fisico
  - non è immaginabile un sistema che reagisce ad una sollecitazione ancor prima che questa sia applicata!

Il modello $$y(t) = a\frac{d\,x(t)}{d\,t}$$

è non causale se consideriamo *x* come ingresso ed *y* come uscita (si pensi alla derivata come rapporto incrementale)
$\Rightarrow$ occorrono sia il valore passato che quello futuro della variabile

Non si può costruire un derivatore ideale

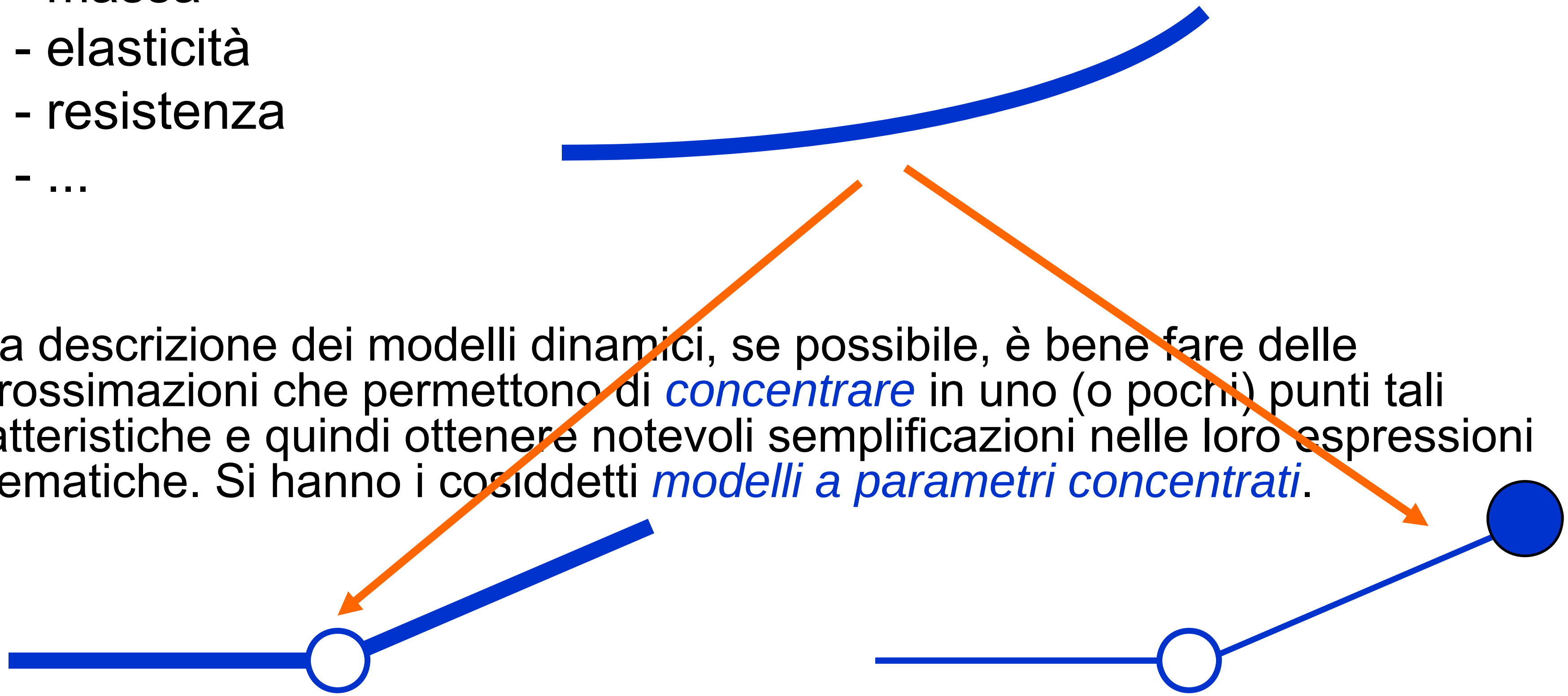
è causale se consideriamo *y* come ingresso ed *x* come uscita

$$x(t) = \frac{1}{a}\int_0^t y(\tau)\,d\tau + x_0$$

Modelli non causali sono utilizzati per comodità di analisi e manipolazione

Modelli a parametri concentrati

- Le caratteristiche fisiche dei sistemi dinamici sono *distribuite* nel sistema fisico stesso:
  - - massa
  - - elasticità
  - - resistenza
  - - ...



- Nella descrizione dei modelli dinamici, se possibile, è bene fare delle approssimazioni che permettono di *concentrare* in uno (o pochi) punti tali caratteristiche e quindi ottenere notevoli semplificazioni nelle loro espressioni matematiche. Si hanno i cosiddetti *modelli a parametri concentrati*.

- Nella pratica, anche se è chiaro che tutte le caratteristiche dei sistemi fisici sono *distribuite*, si cerca ove possibile di avere modelli a parametri concentrati.

Modelli a parametri concentrati

- I modelli a parametri concentrati sono espressi da equazioni differenziali ordinarie (tempo continuo) o equazioni alle differenze (tempo discreto), che sono funzioni solo del tempo:

$$a_m \frac{d^m y}{dt^m} + a_{m-1} \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \ldots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \quad = \quad b_n \frac{d^n u}{dt^n} + \ldots + b_0 u$$

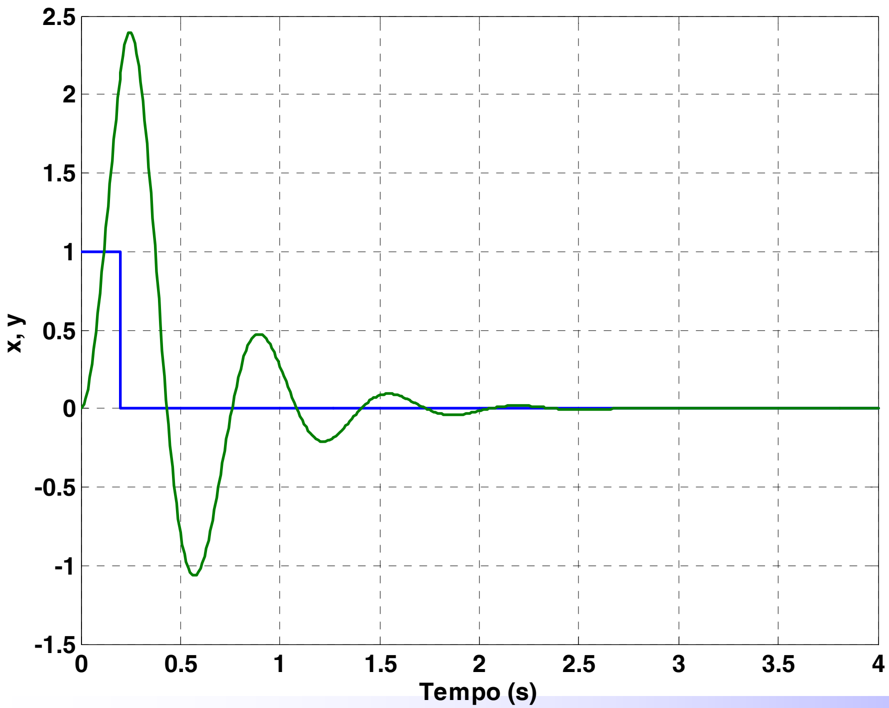
$$a_m y(mT) + a_{m-1} y((m-1)T) + \ldots + a_1 y(T) \quad = \quad b_n u(nT) + \ldots + b_1 u(T)$$

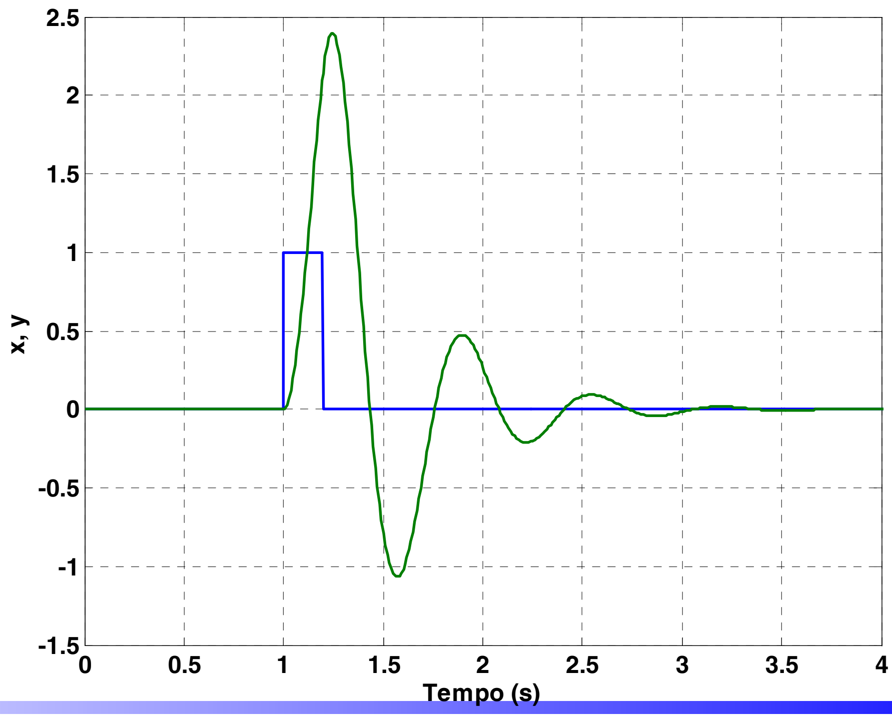
- Se non è possibile considerare come concentrati alcuni dei parametri del modello, allora si deve ricorrere a equazioni alle differenze parziali. Infatti, la dinamica non dipende solo dal tempo ma anche, per esempio, dallo spazio:

$$a_m \frac{\partial^m y}{\partial t^m} + a_{m-1} \frac{\partial^{m-1} y}{\partial t^{m-1}} + \ldots + a_p \frac{\partial^p y}{\partial x^p} + a_{p-1} \frac{\partial^{p-1} y}{\partial t^{p-1}} + \ldots + a_0 y = b_n \frac{d^n u}{dt^n} + \ldots + b_0 u$$

Modelli a parametri costanti nel tempo

- Se le proprietà di un dato sistema sono indipendenti dal tempo (costanti), allora i relativi parametri sono costanti. I relativi modelli sono detti *stazionari* o *invarianti*.
- Per tali sistemi si ha la *ripetibilità degli esperimenti*: l'uscita che si ottiene applicando al sistema con un dato stato iniziale x_0 un ingresso al tempo t_0 è uguale (a parte una traslazione nel tempo) a quella che si ottiene (con lo stesso stato iniziale x_0) applicando lo stesso ingresso all'istante $t-\delta$.





Modelli a parametri costanti nel tempo

- Da un punto di vista pratico, è raro che i parametri di un sistema non cambino nel tempo.
- D'altra parte, è sufficiente che essi non varino in modo apprezzabile in un arco temporale confrontabile alla durata dell'esperimento.
- Nei modelli stazionari, non ha importanza l'istante di inizio dell'osservazione, che viene quindi solitamente considerato uguale a zero: $t_0 = 0$

Risposta da stato zero, con ingresso zero, completa

- In generale, l'uscita $y(t)$ di un sistema dinamico per $t > t_0$ dipende:
  - dall'ingresso $u(\tau)$ applicato in $[t_0, t]$;
  - dallo stato iniziale x_0 che ha il sistema per $t = t_0$.

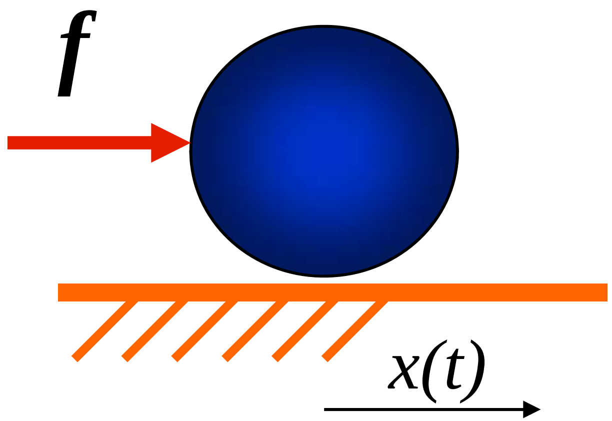
- **Risposta da stato zero** (o risposta forzata)

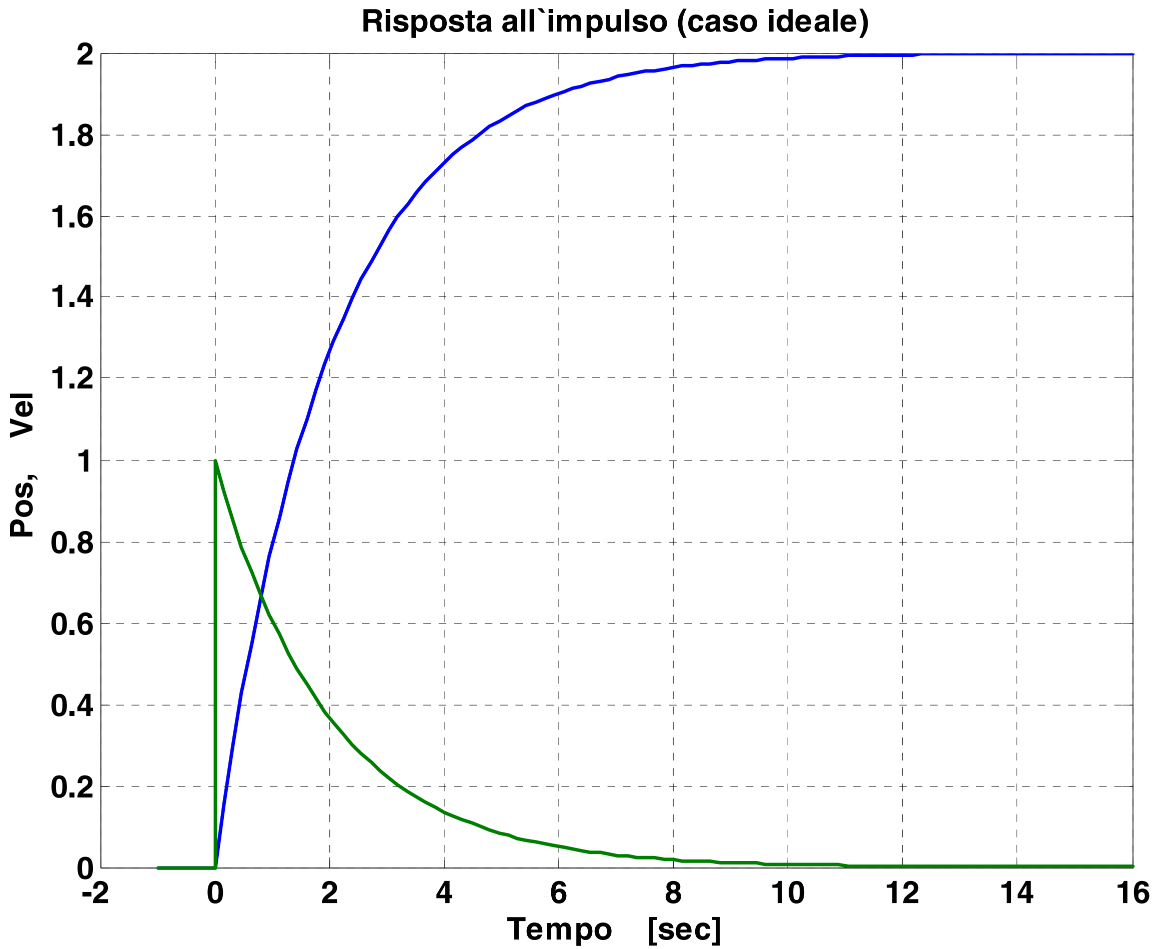
  Si dice *risposta da stato zero* o *risposta forzata* la risposta $y_{ZS}(t)$ di un sistema che è inizialmente in quiete (ingresso ed uscita nulli) e che viene sollecitato da un ingresso non nullo.

- Il sistema, senza l'applicazione dell'ingresso non nullo, rimarrebbe indefinitivamente nella condizione di quiete.

Risposta da stato zero, con ingresso zero, completa

Risposta da stato zero





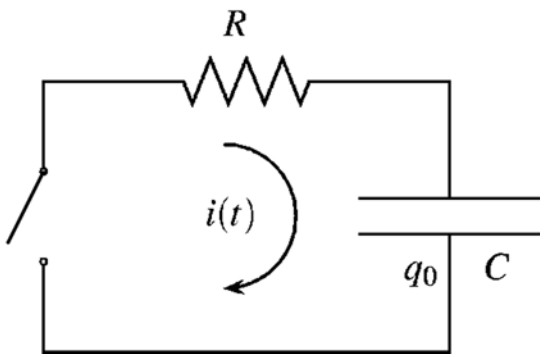
Palla inizialmente in quiete (v_0 = 0), sollecitata da una forza *impulsiva* (piano con attrito non nullo).

Risposta da stato zero, con ingresso zero, completa

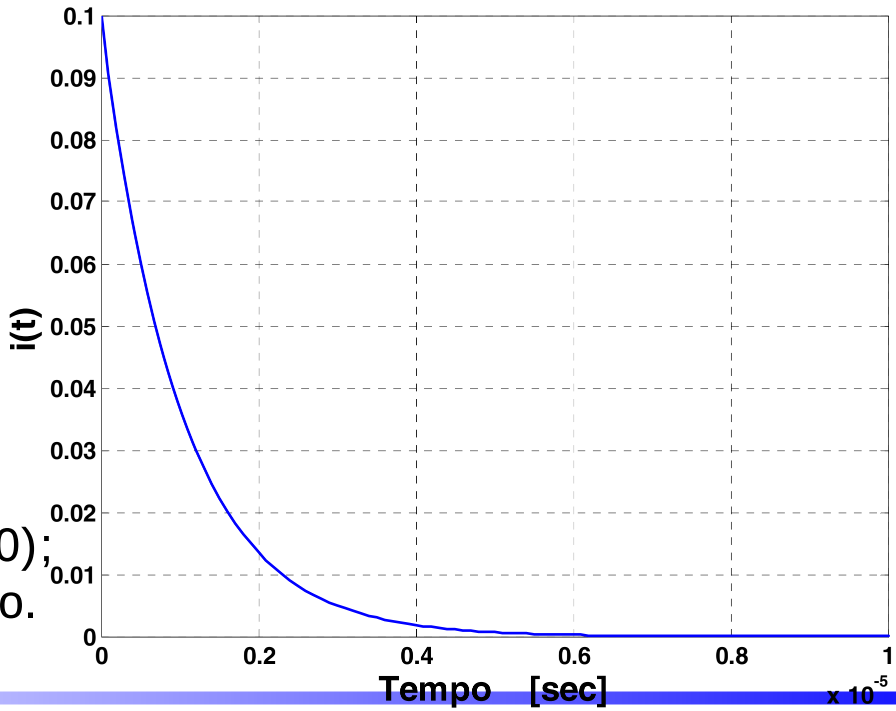
- **Risposta con ingresso zero** (o risposta libera)

- Si dice *risposta con ingresso zero* o *risposta libera* la risposta $y_{ZI}(t)$ di un sistema che è sollecitato da un ingresso nullo.

- Se il sistema è inizialmente in quiete (ingresso ed uscita nulli), vi permane per $t > t_0$, altrimenti vi è una evoluzione dell'uscita.



Condensatore inizialmente carico ($q(t_0) = q_0 \neq 0$); la variabile di uscita è la corrente i(t) nel circuito.



Risposta da stato zero, con ingresso zero, completa

- **Risposta completa**
  - Si dice risposta completa la risposta di un sistema che si trova inizialmente in condizioni non di quiete ed è sollecitato con ingresso non nullo.
  - E' in questo caso necessario conoscere sia l'ingresso applicato che lo stato iniziale in cui si trova il sistema.
  - **ESEMPIO:** Data una massa m che nell'intervallo $[t_0, t_1]$ cade in caduta libera, soggetta alla sola forza di gravità -g, non è possibile in $t = t_1$ calcolarne la posizione e/o la velocità se non si conoscono la posizione e la velocità iniziali.

$$\begin{cases} a(t) = -\frac{g}{m} \\ v(t) = -\frac{g}{m}t + v_0 = at + v_0 \qquad v_0, \quad p_0 \\ p(t) = -\frac{g}{2m}t^2 + v_0 t + p_0 = \frac{a}{2}t^2 + v_0 t + p_0 \end{cases}$$

Modelli lineari

- Una funzione $f: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ è lineare sse gode delle seguenti proprietà:

  1) Additività $\quad f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2), \qquad \forall x_1, x_2 \in \mathcal{C}$

  2) Omogeneità $\quad f(\alpha x) = \alpha f(x), \qquad \forall \alpha, x \in \mathcal{C}$

- Un modello dinamico è *lineare* sse valgono le seguenti tre proprietà:
  1) la risposta con ingresso zero è lineare rispetto allo stato iniziale;
  2) la risposta da stato zero è lineare rispetto all'ingresso;
  3) la risposta completa coincide con la somma della risposta con ingresso zero e della risposta da stato zero:

$$y(t) = y_{ZI}(t) + y_{ZS}(t)$$

- Spesso, l'ipotesi di linearità di un sistema è una approssimazione che si applica considerando opportune limitazioni sugli ingressi e uscite del sistema stesso.

- In generale infatti i sistemi fisici NON sono lineari, e possono essere considerati tali solo entro opportuni intervalli di `funzionamento'.

Modelli lineari

- **ESEMPIO:** Si consideri la risposta completa di un sistema dinamico

$$y(t) = \sin(t)x_0^2 + \int_{t_0}^{t} e^{-2(t-\tau)}u^2(\tau)d\tau = y_{ZI}(t) + y_{ZS}(t)$$

in cui $x_0 = x(t_0)$ è lo stato iniziale.

La risposta è somma della risposta con ingresso zero e da stato zero, però il sistema è non lineare poiché la risposta non è lineare né rispetto allo stato iniziale (x_0^2) né rispetto all'ingresso (u^2).

Modelli lineari

- **ESEMPIO:** Si consideri la risposta completa del sistema dinamico

$$y(t) = \sin(t)x_0 + \int_{t_0}^{t} e^{-2(t-\tau)} u^2(\tau) d\tau = y_{ZI}(t) + y_{ZS}(t)$$

  Il sistema è non lineare poichè la risposta non è lineare rispetto all'ingresso (u^2).

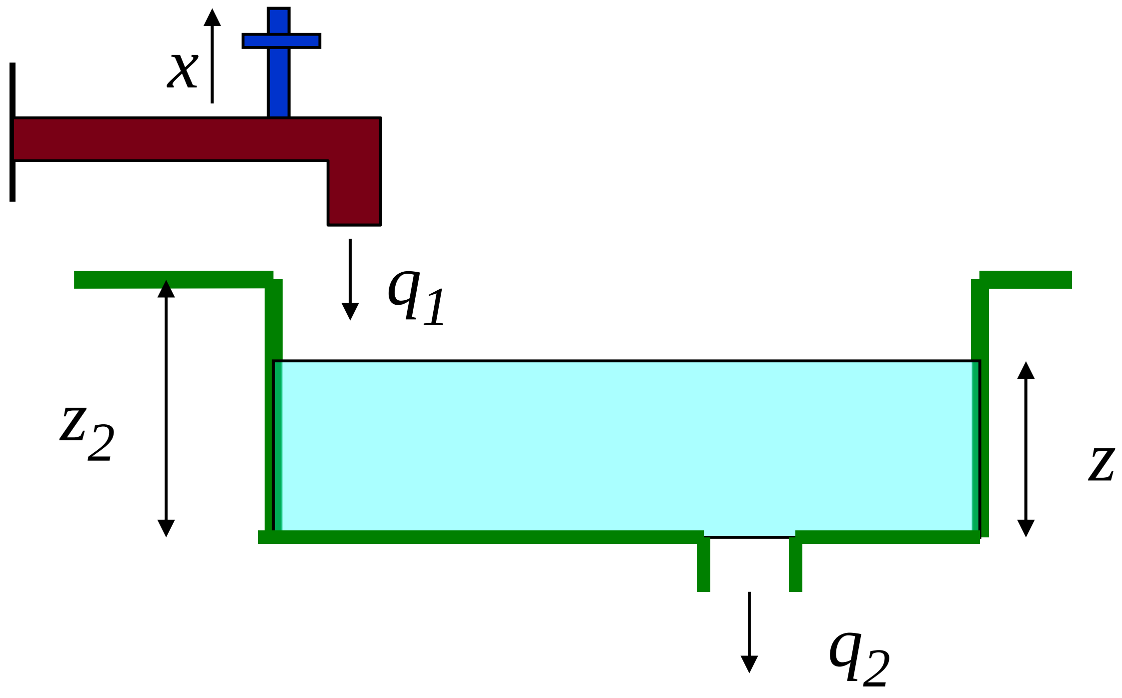
- **ESEMPIO:** Si consideri la risposta completa del sistema dinamico

$$y(t) = \sin(t)x_0 + \int_{t_0}^{t} e^{-2(t-\tau)} u(\tau) d\tau = y_{ZI}(t) + y_{ZS}(t)$$

  Il sistema è lineare poiché:
  - la risposta è somma della risposta con ingresso zero e da stato zero;
  - la risposta è lineare rispetto allo stato iniziale;
  - la risposta è lineare rispetto all'ingresso.

Modelli lineari

- Molti sistemi ammettono modelli matematici lineari purché i valori delle variabili non escano da determinati campi.



- Si consideri il sistema di figura, costituito da un serbatoio: la portata entrante q_1 è funzione lineare della posizione x dello stelo di una valvola $q_1 = K\,x$ si suppone che la portata uscente q_2 sia indipendente dal livello z.

Modelli lineari

- Il modello matematico del sistema è espresso dall'equazione integrale lineare

$$z(t) = Z_0 + \frac{1}{A}\int_0^t \big(q_1(\tau) - q_2(\tau)\big)\, d\tau = Z_0 + \frac{1}{A}\int_0^t \big(Kx(\tau) - q_2(\tau)\big)\, d\tau$$

  o, equivalentemente, dall'equazione differenziale (ottenuta derivando rispetto al tempo ambo i membri)

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{A}\left[q_1(t) - q_2(t)\right], \quad z(0) = Z_0$$

  in cui z indica il livello dell'acqua nel serbatoio (in m), Z_0 il livello iniziale, q_1 e q_2 le portate entrante e uscente (in mc/sec), A l'area della sezione orizzontale del serbatoio (in mq).

- Tale modello è evidentemente valido entro i limiti

$$X_1 \leq x(t) \leq X_2, \quad Z_1 \leq z(t) \leq Z_2$$

  in cui X_1, X_2, Z_1 (=0) e Z_2 rappresentano rispettivamente i valori minimo e massimo della posizione dello stelo della valvola e del livello nel serbatoio.

Modelli lineari – Proprietà di sovrapposizione degli effetti

- Per i sistemi lineari vale una proprietà molto importante:

La sovrapposizione degli effetti.

- Linearità rispetto allo stato iniziale

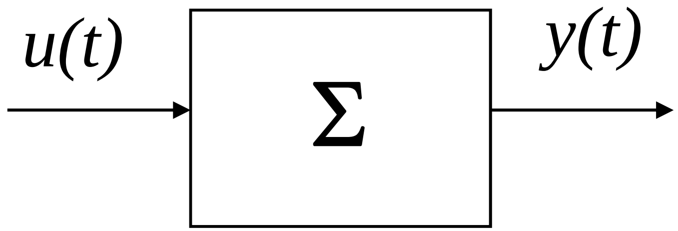
Questo caratteristica dei sistemi dinamici risulta evidente (ed utile) nello studio dei sistemi *nello spazio degli stati*. Viene qui citata solo per completezza, ma non verrà utilizzata nel seguito, in quanto si è maggiormente interessati ad una rappresentazione dei sistemi non basata sul concetto di stato.

Modelli lineari – Proprietà di sovrapposizione degli effetti

- Linearità rispetto all'ingresso

  Sia dato un sistema inizialmente in quiete. Si applichino (singolarmente) i q ingressi $u_i(t)$, i=1, …, q, t ¸ 0, ottenendo le corrispondenti risposte forzate $y_{ZS,i}(t)$:

$$
\begin{array}{ccc}
u_1(t) & \Longrightarrow & y_{ZS,1}(t) \\
u_2(t) & \Longrightarrow & y_{ZS,2}(t) \\
 & \dots & \\
u_q(t) & \Longrightarrow & y_{ZS,q}(t)
\end{array}
$$



- La linearità rispetto all'ingresso implica che se si applica al sistema l'ingresso

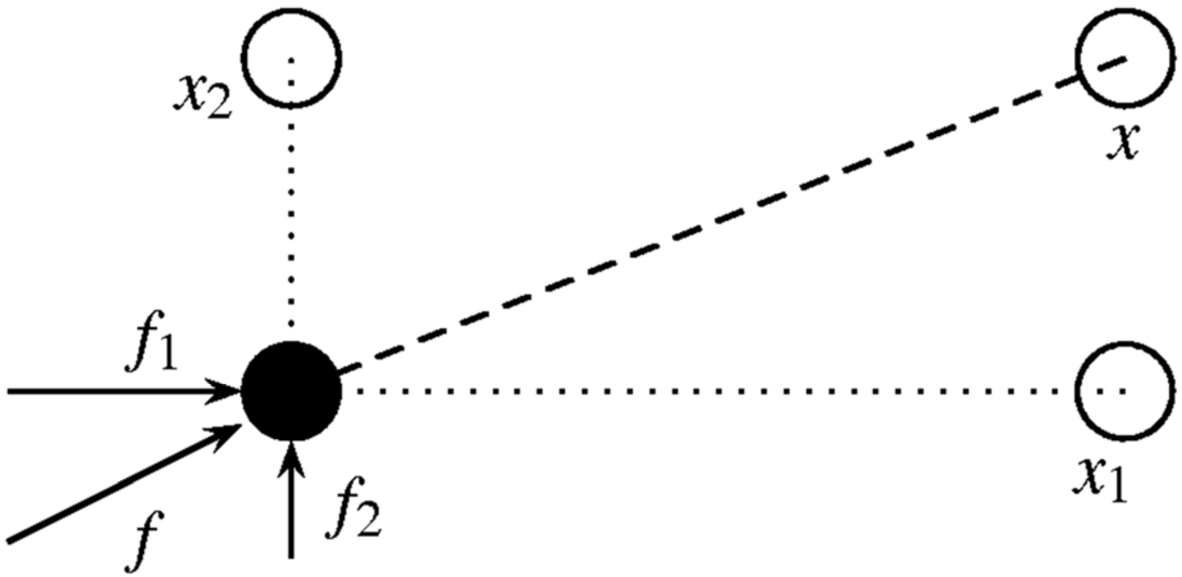
$$u(t) = \alpha_1 u_1(t) + \alpha_2 u_2(t) + \ldots + \alpha_q u_q(t) = \sum_{i=1}^{q} \alpha_i u_i(t), \qquad \alpha_i \in \mathbb{R}$$

  allora si ottiene l'uscita

$$y(t) = \alpha_1 y_{ZS,1}(t) + \alpha_2 y_{ZS,2}(t) + \ldots + \alpha_q y_{ZS,q}(t) = \sum_{i=1}^{q} \alpha_i y_{ZS,i}(t)$$

Modelli lineari – Proprietà di sovrapposizione degli effetti

- **Esempio:**

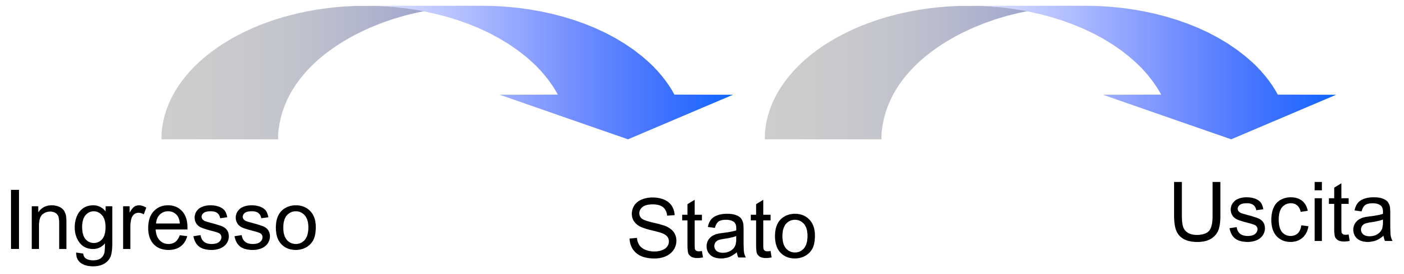


$$f = f_1 + f_2$$
$$x = x_1 + x_2$$

- Additività delle risposte

  Proprietà di additività della risposta libera e della risposta forzata.

Rappresentazione di stato per sistemi lineari



- Evoluzione dello stato in funzione dell'ingresso e dello stato:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$

Equazione di stato

- Dipendenza dell'uscita dall'ingresso e dallo stato

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t)$$

dove $A(t), B(t), C(t), D(t)$ sono matrici di dimensioni opportune

Rappresentazione di stato per sistemi lineari

Se il sistema lineare è **tempo-invariante**, il modello può essere scritto come

- Evoluzione dello stato in funzione dell'ingresso e dello stato:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

- Dipendenza dell'uscita dall'ingresso e dallo stato

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

dove A, B, C, D sono matrici **costanti**

Linearizzazione intorno a un punto di equilibrio

- Dato un sistema MIMO tempo-invariante

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$$
$$y(t) = g(x(t), u(t))$$

- Si consideri l'ingresso costante $u(t) = \bar{u}$

- Uno stato di equilibrio $\bar{x}$ e la corrispondente uscita di equilibrio $\bar{y}$ soddisfano le identità

$$0 = f(\bar{x}, \bar{u})$$
$$\bar{y} = g(\bar{x}, \bar{u})$$

Linearizzazione intorno a un punto di equilibrio

- Il procedimento di **linearizzazione** consiste nel descrivere il comportamento del sistema non lineare **attorno all'equilibrio nominale** mediante un particolare sistema lineare.
- Si considerano le **variazioni** $\delta u(t)$, $\delta x(t)$ e $\delta y(t)$ delle variabili di ingresso, stato e uscita rispetto ai valori di equilibrio, nonché dello stato iniziale δx_0

$$u(t) = \bar{u} + \delta u(t)$$
$$x(t) = \bar{x} + \delta x(t)$$
$$y(t) = \bar{y} + \delta y(t)$$
$$x_0 = \bar{x} + \delta x_0$$

- Le equazioni del sistema diventano

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(x(t), u(t)) \end{aligned} \quad \Longrightarrow \quad \begin{aligned} \dot{\bar{x}} + \delta\dot{x}(t) &= f(\bar{x} + \delta x(t), \bar{u} + \delta u(t)) \\ \bar{y} + \delta y(t) &= g(\bar{x} + \delta x(t), \bar{u} + \delta u(t)) \end{aligned}$$

Linearizzazione intorno a un punto di equilibrio

- Supponendo che le funzioni f e g siano sufficientemente regolari, possono essere sviluppate rispetto a x e u in $x = \bar{x}$ e $u = \bar{u}$

$$\delta\dot{x}(t) = \cancel{f(\bar{x}, \bar{u})}^{=0} + \left.\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}} \delta x(t) + \left.\frac{\partial f(x,u)}{\partial u}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}} \delta u(t)$$

$$\cancel{\bar{y}} + \delta y(t) = \cancel{g(\bar{x}, \bar{u})} + \left.\frac{\partial g(x,u)}{\partial x}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}} \delta x(t) + \left.\frac{\partial g(x,u)}{\partial u}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}} \delta u(t)$$

$$\Downarrow$$

$$\delta\dot{x}(t) = A\,\delta x(t) + B\,\delta u(t)$$

$$\delta y(t) = C\,\delta x(t) + D\,\delta u(t)$$

dove

$$A = \left.\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}}$$

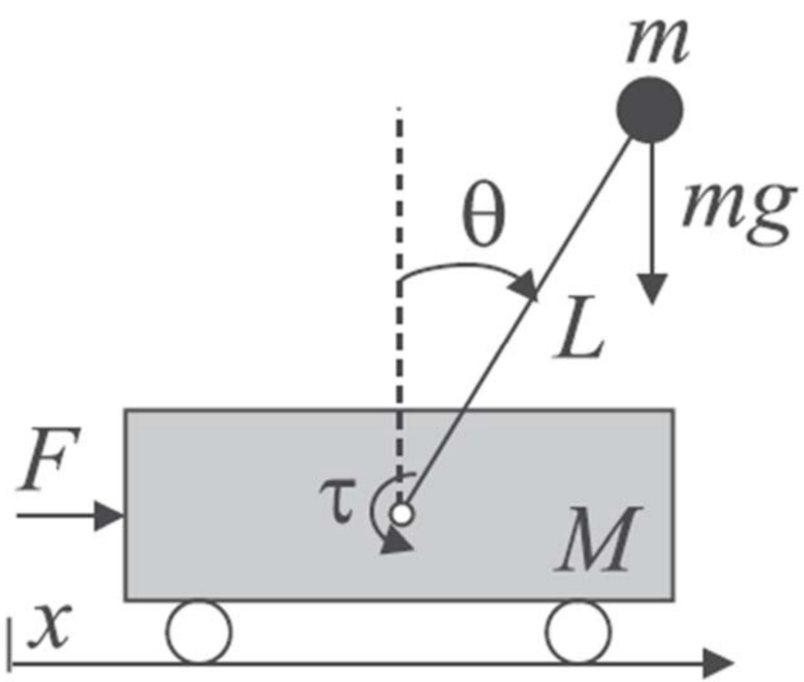
$$B = \left.\frac{\partial f(x,u)}{\partial u}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}}$$

$$C = \left.\frac{\partial g(x,u)}{\partial x}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}}$$

$$D = \left.\frac{\partial g(x,u)}{\partial u}\right|_{x=\bar{x},u=\bar{u}}$$

con condizione iniziale $\delta\dot{x}(t_0) = \delta x_0$

Esempio: pendolo su carrello



$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + mL\ddot{\theta}\cos(\theta) - mL\dot{\theta}^2\sin(\theta) & = & F(t) \\ mL\ddot{x}\cos(\theta) + mL\ddot{\theta} + mgL\sin(\theta) & = & 0 \end{cases}$$

Esempio: pendolo su carrello

- Esprimendo le equazioni nella forma più consueta per modelli nello spazio degli stati

$$
\begin{cases}
\ddot{x} = \dfrac{mL\dot{\theta}^2 \sin(\theta) - mg\sin(\theta)\cos(\theta) + F}{M + m(\sin(\theta))^2} \\
\ddot{\theta} = \dfrac{-mL\dot{\theta}^2 \sin(\theta)\cos(\theta) + (M+m)g\sin(\theta) - F\cos(\theta)}{L\,(M + m(\sin(\theta))^2)}
\end{cases}
$$

- Ponendo $\mathbf{x} = [x_1\ x_2\ x_3\ x_4]^T = [x\ \dot{x}\ \theta\ \dot{\theta}]^T$ e $u = F$

  si ottiene il modello non lineare

$$
\begin{cases}
\dot{x}_1 = x_2 \\
\dot{x}_2 = \dfrac{mLx_4^2 \sin(x_3) - mg\sin(x_3)\cos(x_3) + u}{M + m(\sin(x_3))^2} \\
\dot{x}_3 = x_4 \\
\dot{x}_4 = \dfrac{-mLx_4^2 \sin(x_3)\cos(x_3) + (M+m)g\sin(x_3) - u\cos(x_3)}{L\,(M + m(\sin(x_3))^2)}
\end{cases}
$$

Esempio: pendolo su carrello

- Gli stati di equilibrio corrispondenti all'ingresso $\bar{u} = 0$ sono $\bar{\mathbf{x}} = [x_d, 0, k\pi, 0]^T$ con x_d generico
- Linearizzando nell'intorno di $\bar{\mathbf{x}} = [x_d, 0, 0, 0]^T$ si ottiene

$$\delta\dot{\mathbf{x}}(t) = A\,\delta\mathbf{x}(t) + B\,\delta u(t)$$

dove

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{(M+m)g}{ML} & 0 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{ML} \end{bmatrix}$$

CONTROLLI AUTOMATICI
Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/ControlliAutomatici.html

SISTEMI E MODELLI
FINE

Ing. Luigi Biagiotti

e-mail: luigi.biagiotti@unimore.it

http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti