



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



# Introduzione al controllo del moto

Automazione I

14/10/2014

Alessandro De Luca

# Sistemi di movimentazione automatica

- ❑ azionamenti elettrici e attuatori elettromeccanici per il moto
- ❑ trasduttori
  - ➔ dispositivi che convertono energia da una forma in un'altra (elettrica in meccanica o viceversa, termica in meccanica o viceversa, ...)
  - ➔ sensori
    - misurano grandezze fisiche e le convertono in un dominio proprio (elettrico, pneumatico o idraulico) utile per elaborare il contenuto informativo
  - ➔ attuatori
    - trasformano informazione di comando in potenza nel dominio fisico del sistema sui quali agiscono
- ❑ trasduttori elettromeccanici
  - ➔ sottosistemi elettrico e meccanico accoppiati da un campo elettromagnetico
  - ➔ **generatori**: conversione energia meccanica  $\Rightarrow$  elettrica
  - ➔ **motori**: conversione energia elettrica  $\Rightarrow$  meccanica



Gli azionamenti elettrici sono dispositivi per la

- ❑ conversione controllata di energia elettrica in meccanica
- ❑ trasduttori “di potenza”
  - ➔ imposizione del moto ad un carico meccanico

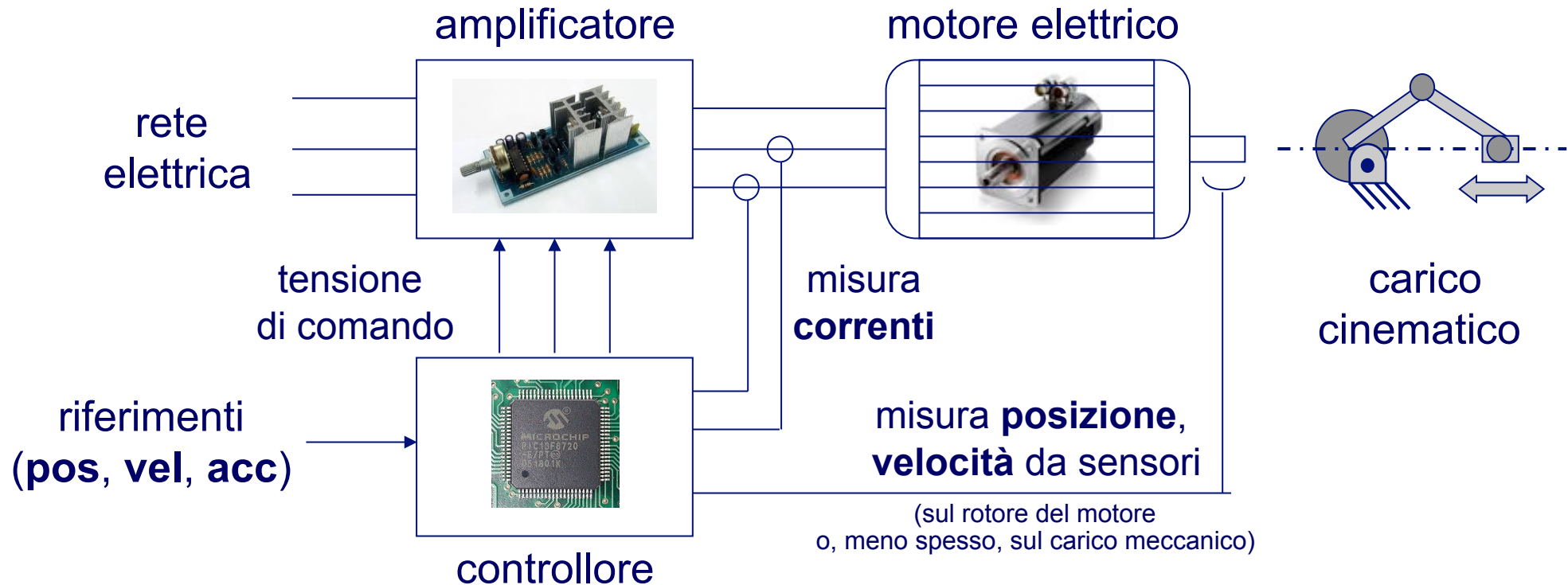
Tre componenti fondamentali

- ❑ **amplificatore/convertitore di potenza**
  - ➔ piccole potenze: amplificatori analogici lineari
  - ➔ grandi potenze: componenti elettronici di tipo switching (migliore rendimento) comandati con tecniche di modulazione (PWM)
- ❑ **motore elettrico**
  - ➔ diverse tipologie: alimentato in corrente continua (DC) o alternata (AC), brushless, passo-passo (stepper), asincrono (a induzione), sincrono, ...
- ❑ **controllore**
  - ➔ leggi a feedback (ad es., PID) e generazione di riferimenti

# Azionamenti elettrici

- attua la tensione richiesta dal comando proveniente dal controllo

- partì in moto relativo interagenti magneticamente
- motori rotatori (decisamente i più diffusi) o lineari
- con riduttori del moto

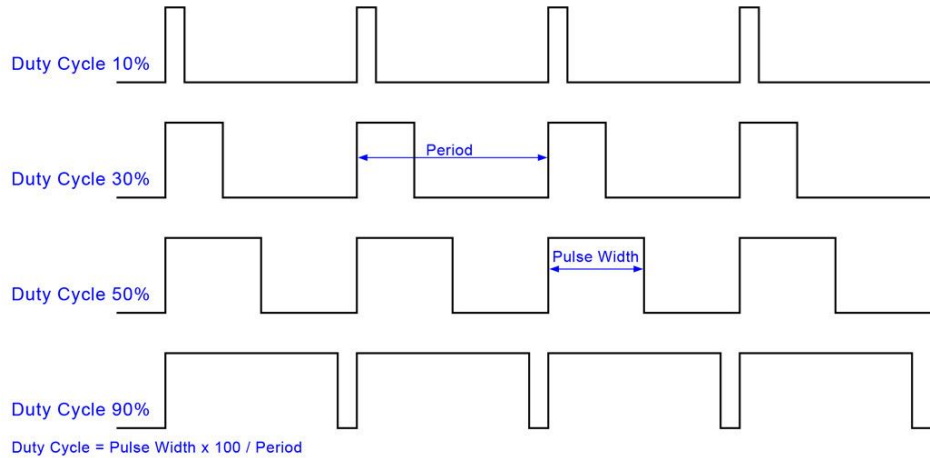
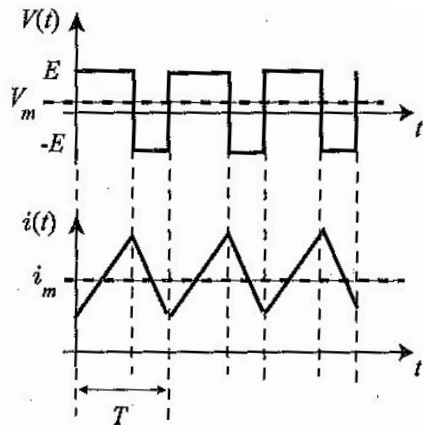
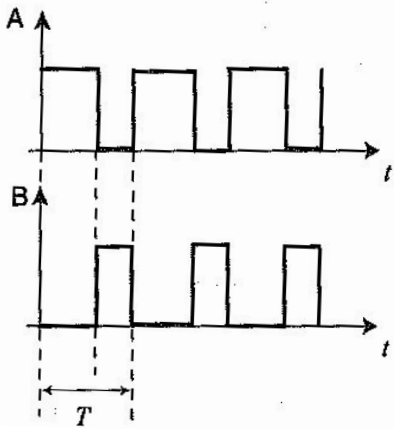
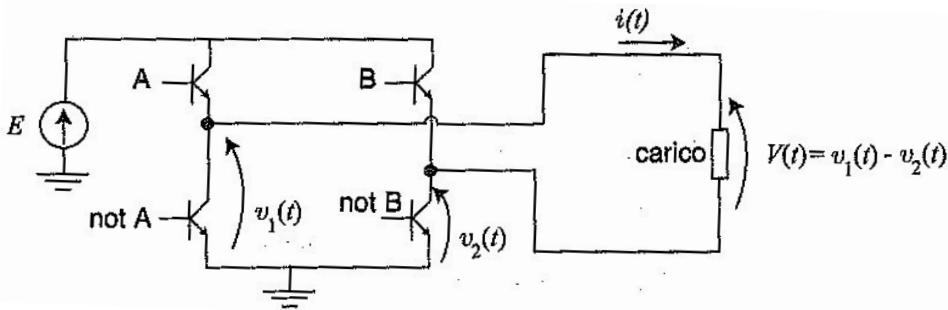


- tipicamente digitale
- regolazione o ...
- ... inseguimento di posizione o velocità
- controllo di coppia

# Duty cycle in PWM

## Amplificatore di potenza con componenti elettronici di tipo switching

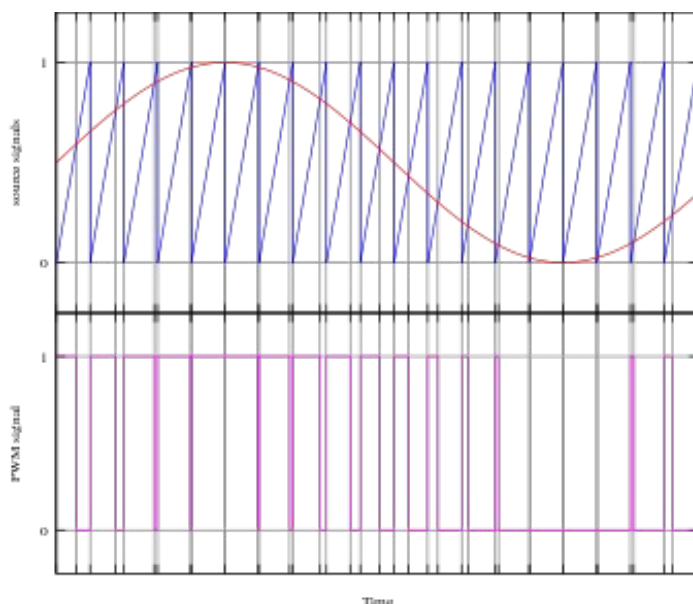
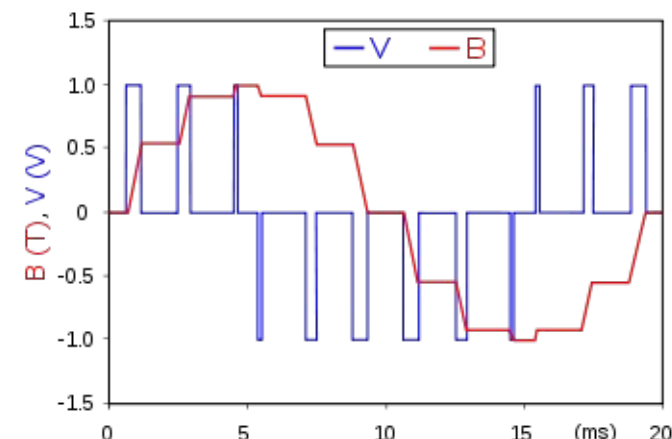
- dalla tensione costante  $E$  si generano, mediante 4 interruttori on/off, due onde quadre in contro-fase (A e B, e i loro negati) di durata variabile (e complementare) nel periodo  $T$
- grazie alla “modulazione” degli interruttori, si fornisce al motore una tensione media  $V_m$  pari a una frazione desiderata di  $E \Rightarrow V_m$  è **proporzionale al duty cycle** ( $= T_{on}/T$  %)



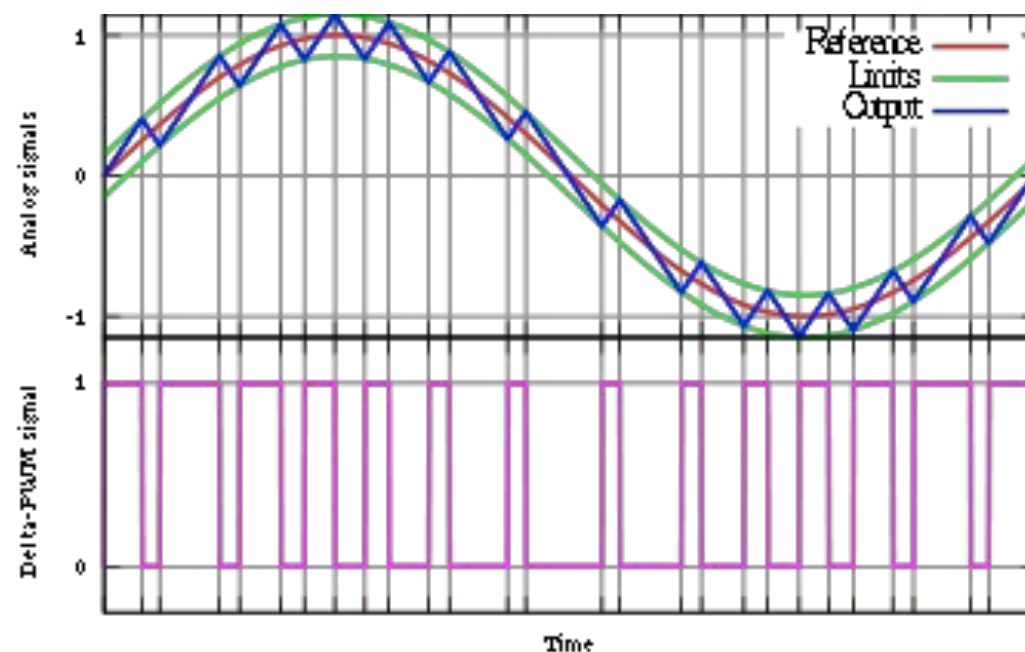
- bassa potenza dissipata dagli switch negli stati ON e OFF (solo durante un transitorio di 100ns c'è sia tensione che corrente)
- elevata frequenza  $f=1/T$  (ad es., 50 KHz) rispetto alle variazioni desiderate di  $V_m$

- modulazione a larghezza di impulso (Pulse Width Modulation = **PWM**)
- nelle figure, varie implementazioni di schemi PWM

PWM nel **pilotaggio di un motore AC**: la sequenza di impulsi V a durata variabile genera una variazione ( $\approx$  sinusoidale) della densità di flusso magnetico B nel motore



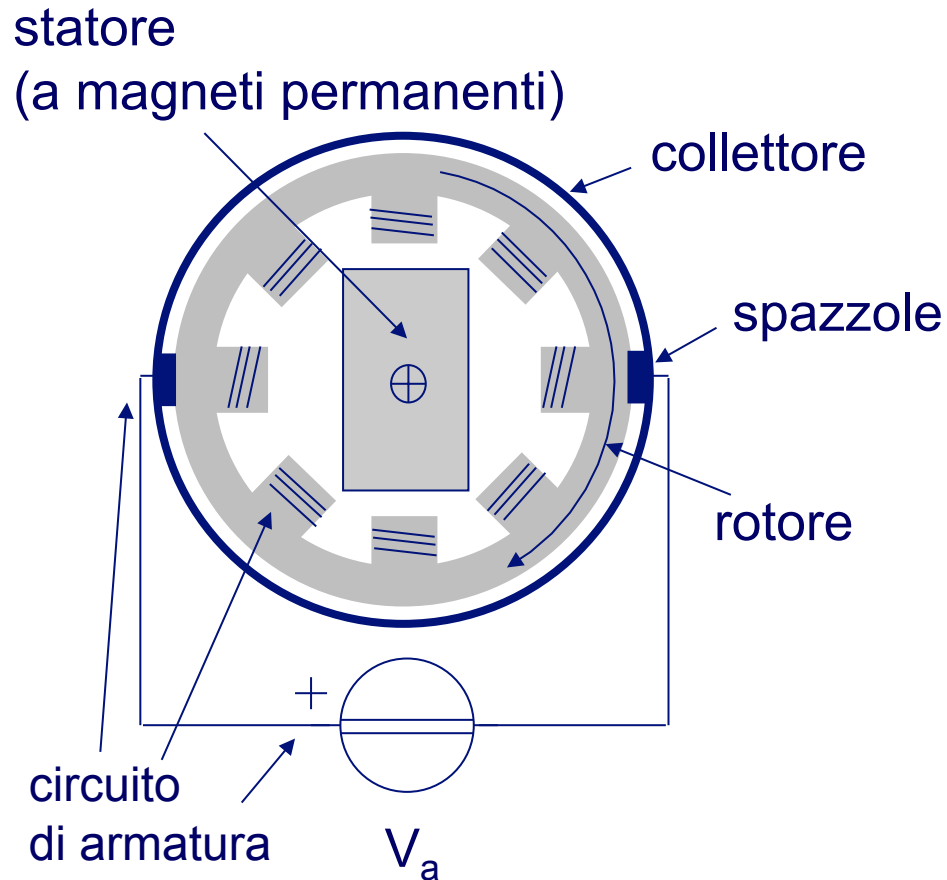
**metodo dell'intersezione**: si genera un'onda quadra PWM corrispondente ad un dato segnale (la sinusoide in rosso), confrontando il segnale con una onda a sega (ON quando è più alto, OFF else)



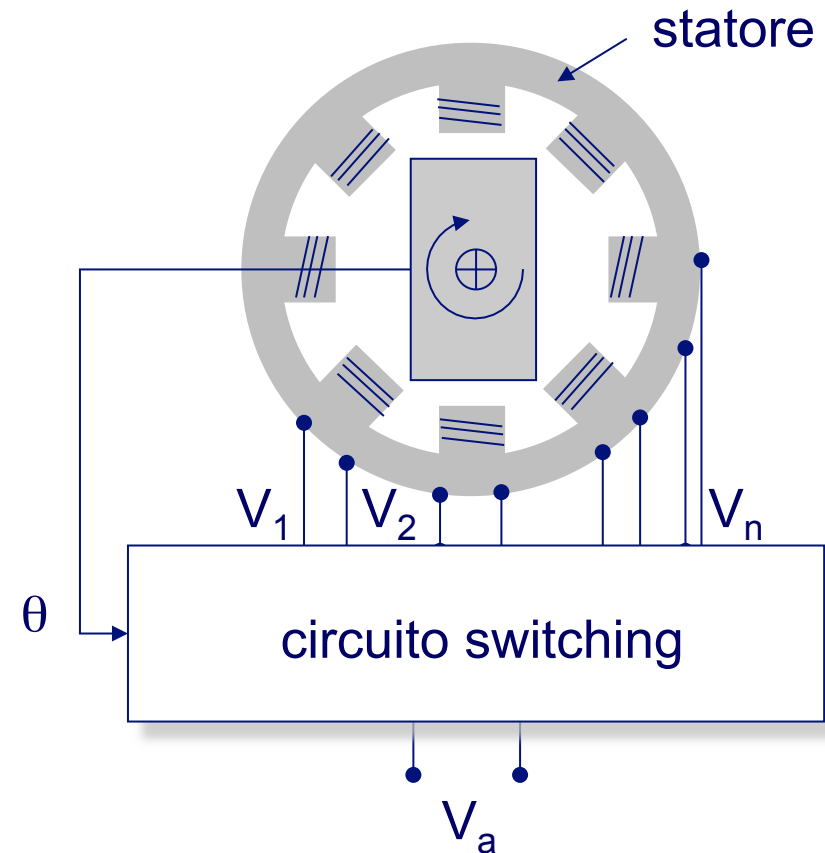
**metodo delta**: il segnale (la sinusoide in rosso) è integrato e confrontato ai valori limite (segnale  $\pm$  offset); l'uscita PWM commuta ON/OFF ogni volta che si raggiunge un limite (invertendo anche l'integrazione)

# Statore e rotore

Nei motori elettrici, due schemi realizzativi di principio



motore con spazzole  
alimentato in corrente continua



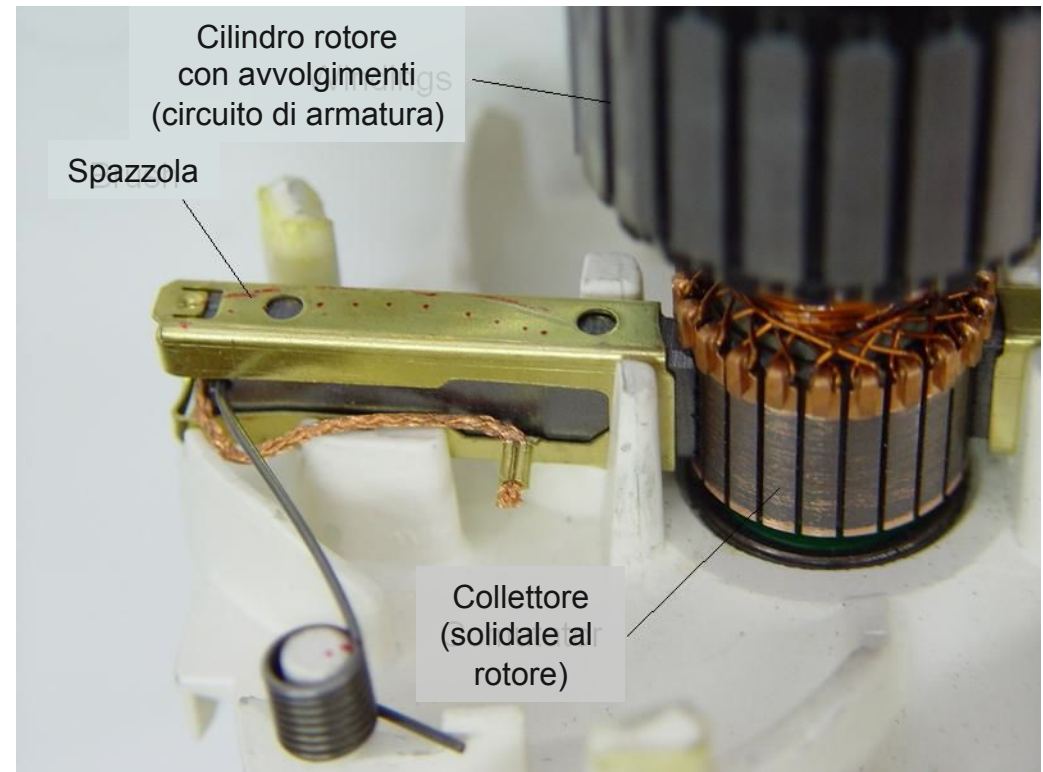
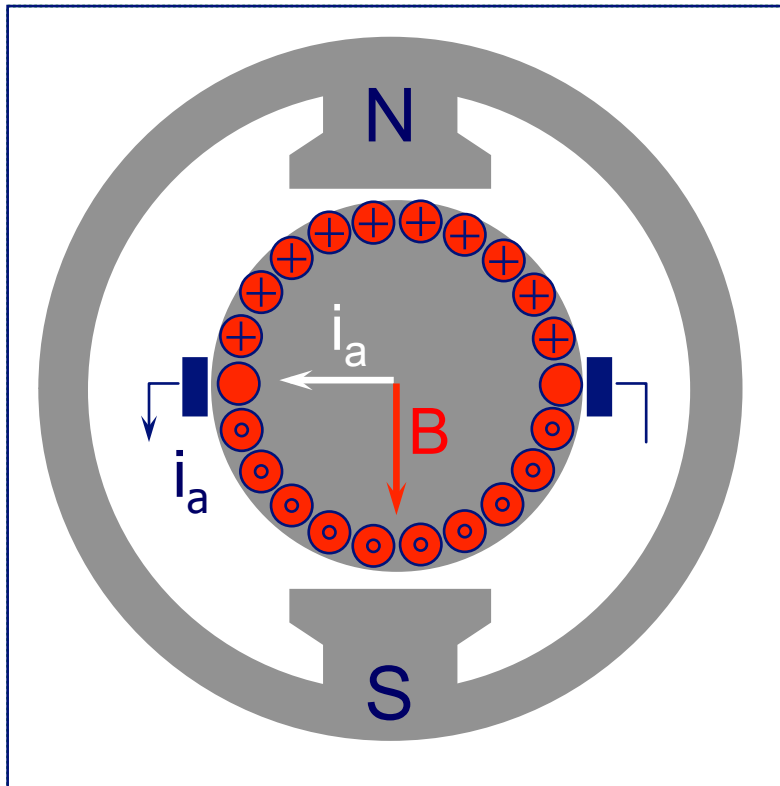
motore sincrono "brushless"  
pilotato con elettronica switching

## Caratteristiche generali

- ❑ circuito di rotore a collettore
- ❑ alimentabile in corrente continua (Direct Current = DC)
- ❑ diverse configurazioni: qui a magneti permanenti
- ❑ largo utilizzo, anche se in progressivo calo
- ❑ costruzione complessa, ma modello matematico semplice
  - ➔ altri motori, più semplici dal punto di vista costruttivo e meno costosi, hanno modelli matematici più complessi ma che con opportune elaborazioni possono essere ricondotti ad una forma molto simile a quella del motore DC



## avvolgimenti e collettore (con spazzole)



convenzione  
per le correnti  
nelle spire:

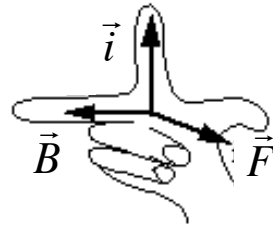
entrante uscente  
dal foglio



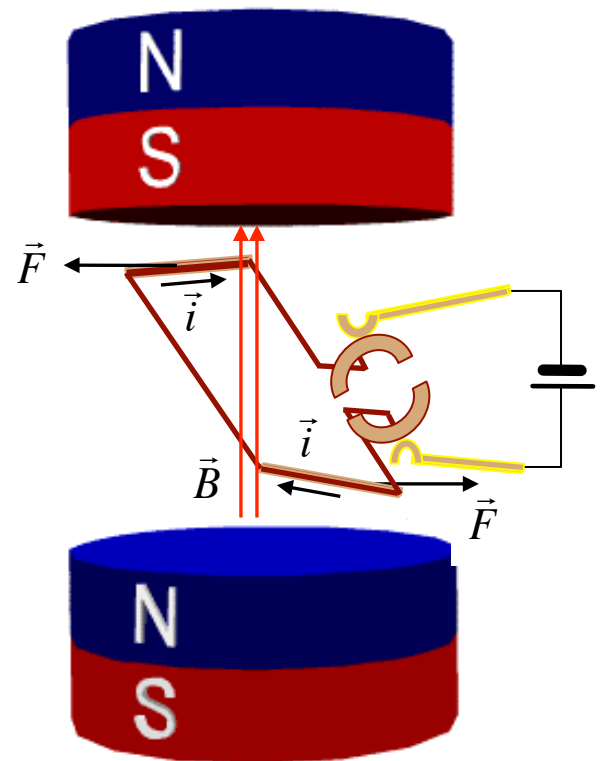
basato sulla legge di Lorentz

- campo magnetico  $B$  costante (con verso da polo N a polo S)
- corrente  $i$  costante e perpendicolare al campo magnetico

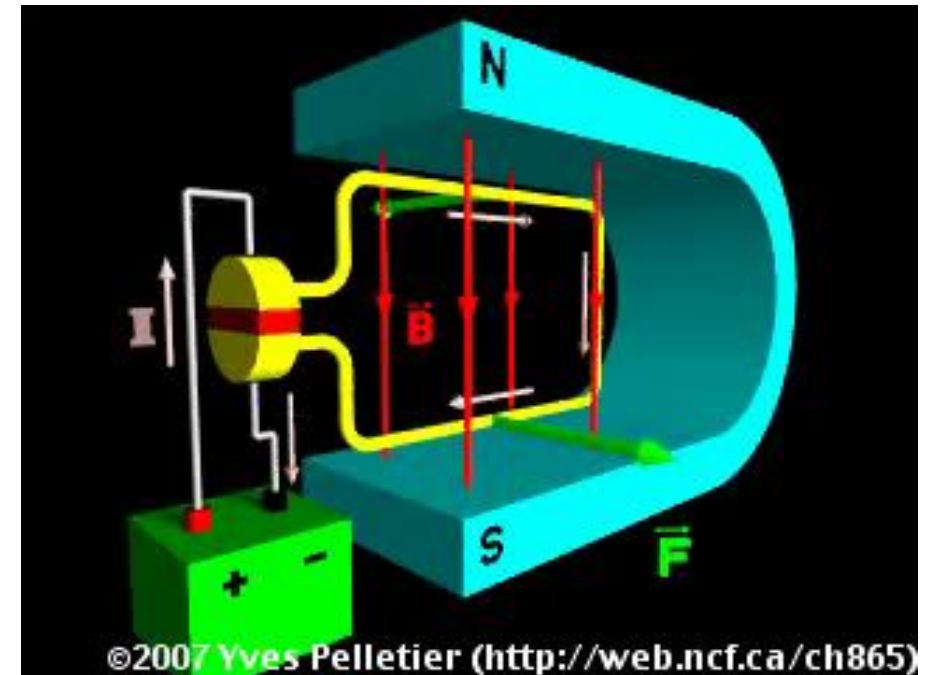
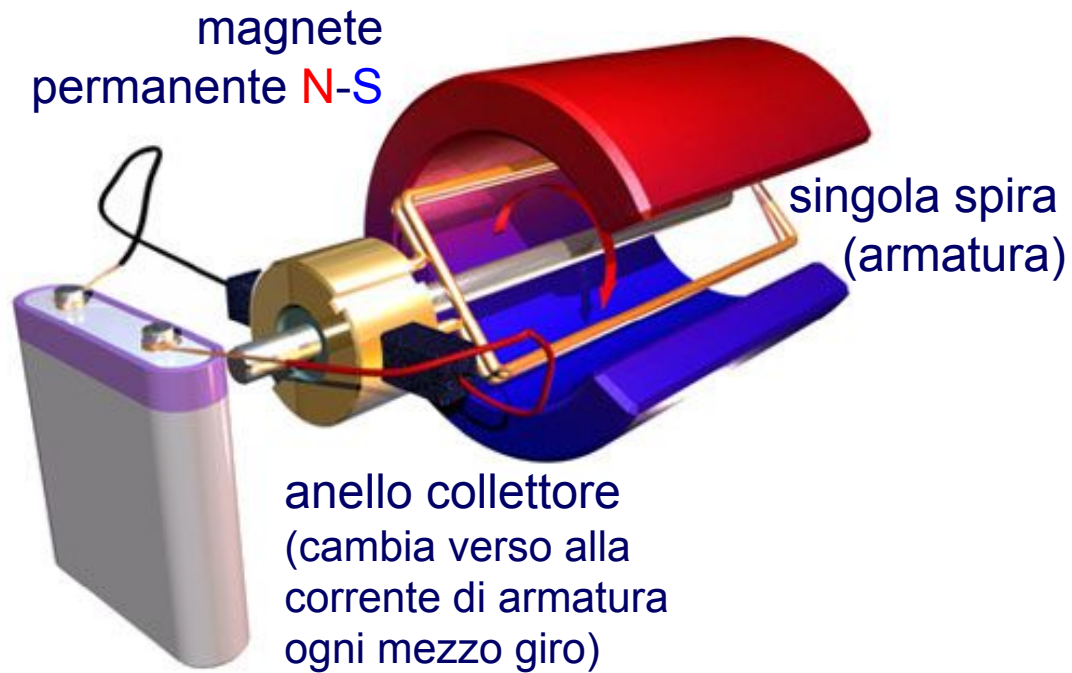
$$\vec{F} = L (\vec{i} \times \vec{B})$$



regola della mano destra  
per il prodotto vettore:  
indice  $\times$  medio = pollice



video



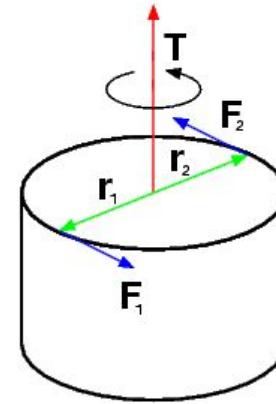
alimentazione in  
corrente continua (c.c.)

$$\vec{F} = L (\vec{i} \times \vec{B})$$

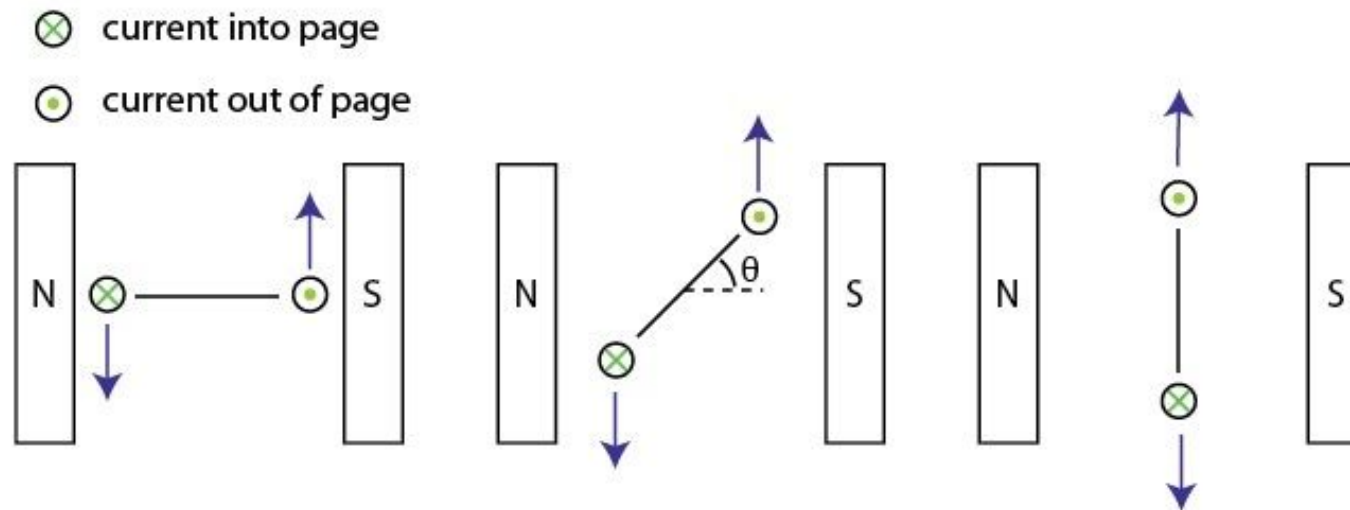
utilizzando una sola spira

- momento torcente (coppia)

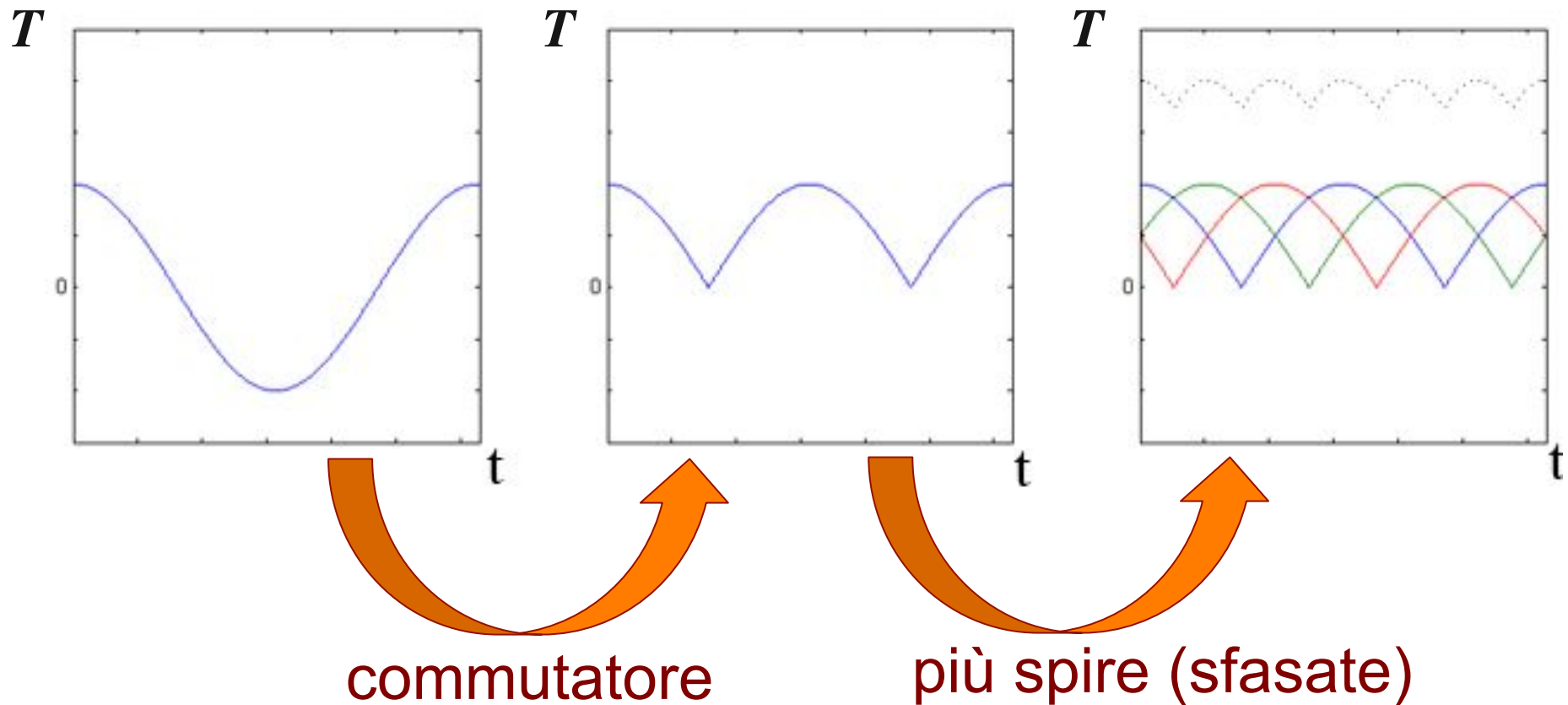
$$\vec{T} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2$$



- nel caso di una singola spira, la coppia va a zero a multipli di  $180^\circ$  al variare dell'angolo tra la forza generata e il braccio di rotazione

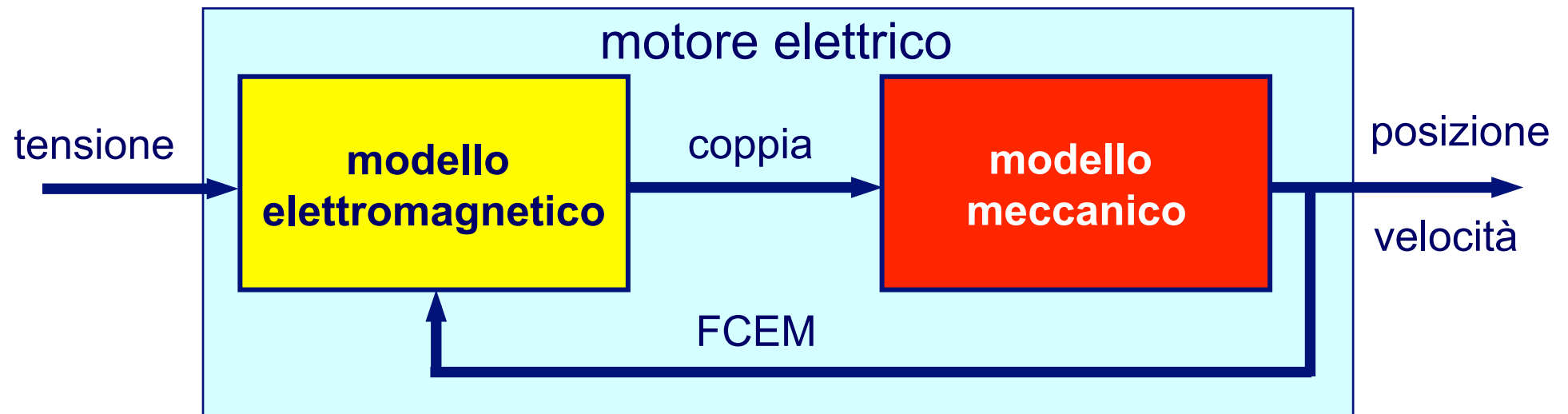


- il commutatore permette di avere una coppia sempre nello stesso verso di rotazione, ma non elimina le oscillazioni (“ripple”)
- per limitare il ripple di coppia si usano più spire



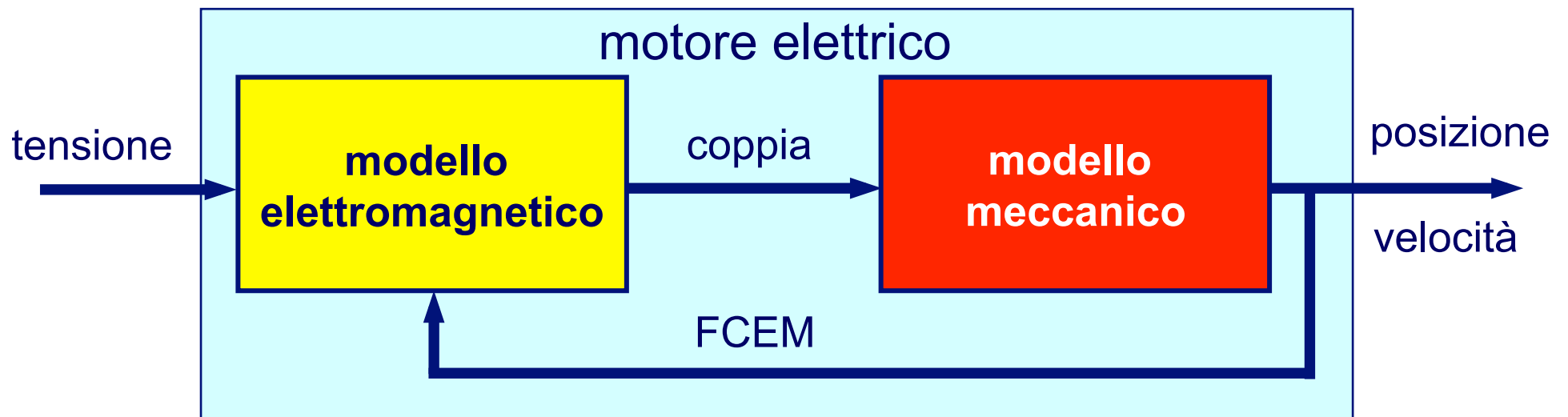
# Motore DC: modellistica

- ❑ modello elettromagnetico: equazione di bilancio circuitale (“maglia”)
- ❑ produce una coppia **proporzionale** alla corrente
- ❑ modello meccanico: equazione di bilancio delle forze (qui, coppie)
- ❑ è sempre presente una forza contro-elettromotrice (FCEM o “Back EMF”) proporzionale alla velocità (per il bilancio energetico)

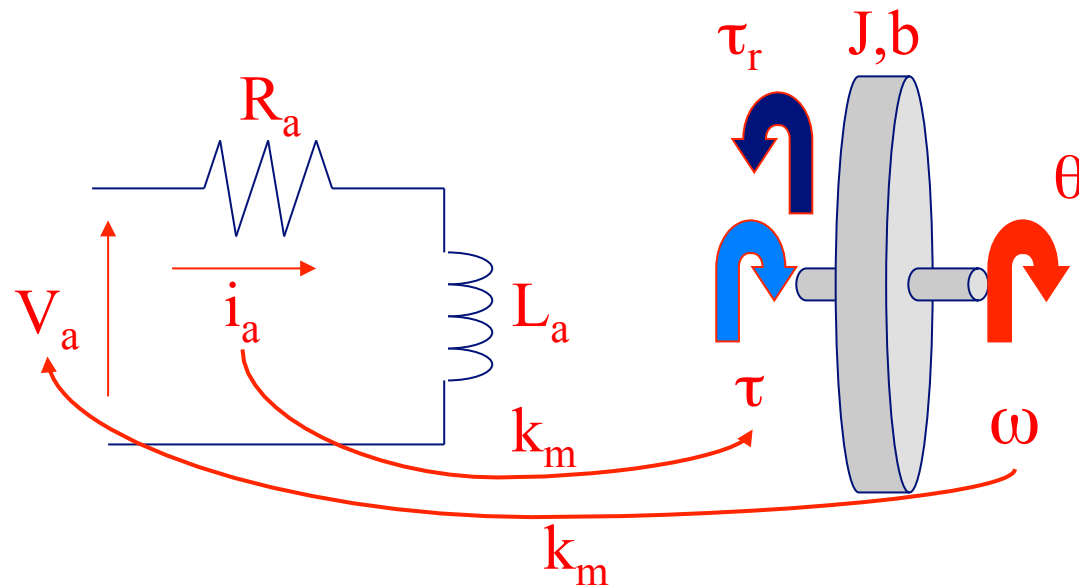


# Motore DC: limiti fisici

- nella modellistica ci si limita ad un comportamento lineare, tenendo presente che tutti gli azionamenti elettrici presentano limiti di
  - ✓ tensione massima
  - ✓ corrente massima
- che si traducono in limiti per
  - ✓ velocità massima per il motore
  - ✓ coppia rms e coppia di picco massime erogabili dal motore



# Motore DC: modello matematico



## □ parametri

$R_a$ : resistenza di armatura

$L_a$ : induttanza di armatura

$k_m$ : coefficiente di coppia e FCEM

$J$ : inerzia del rotore

$b$ : coefficiente di attrito

## □ variabili

$i_a$ : corrente di armatura

$\omega$ : velocità del rotore

$\theta$ : posizione del rotore

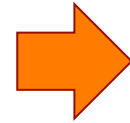
$V_a$ : tensione di ingresso

$\tau_r$ : coppia di carico (disturbo)



# Motore DC: modello matematico

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega$$



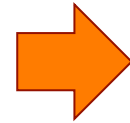
modello elettrico

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r$$



modello  
meccanico

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$



# Motore DC: modello matematico

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega \quad \rightarrow$$

FCEM

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r \quad \rightarrow$$

coppia prodotta

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad \rightarrow$$

integratore

# Motore DC: regime a tensione costante

- supponiamo di alimentare il motore con una tensione  $V_a$  **costante**
- dopo un transitorio, si raggiunge una situazione di regime (*perché?*) con corrente costante e velocità angolare costante
- si possono valutare allora le **caratteristiche statiche** del motore (ad es., la velocità di regime  $\omega^*$  o la capacità di bilanciare una coppia  $\tau_r^*$  sul carico)

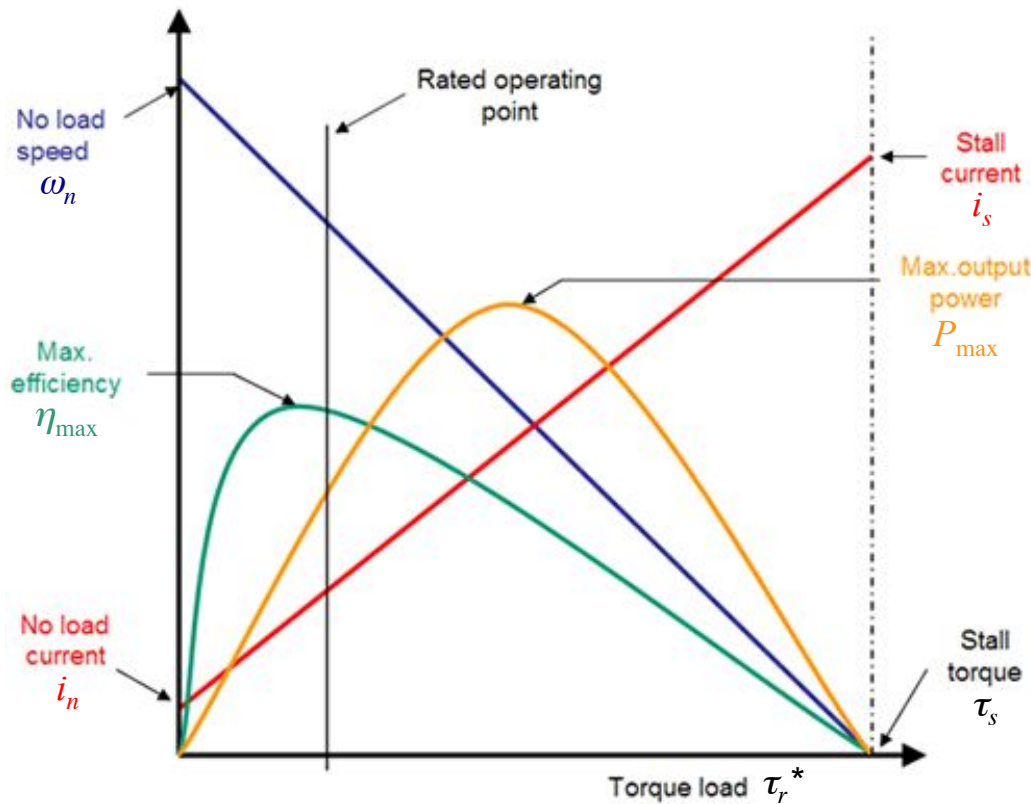
$$\frac{di_a}{dt} = 0 \Rightarrow V_a - R_a i_a - k_m \omega = 0 \quad \frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow k_m i_a - b\omega - \tau_r = 0$$

- risolvendo il sistema algebrico si hanno le relazioni di regime

$$\omega^* = \left(b + \frac{k_m^2}{R_a}\right)^{-1} \left(\frac{k_m}{R_a} V_a - \tau_r^*\right) \quad \tau_r^* = \frac{k_m}{R_a} V_a - \left(b + \frac{k_m^2}{R_a}\right) \omega^* \quad i_a^* = \frac{1}{R_a} \left(b + \frac{k_m^2}{R_a}\right)^{-1} (bV_a + k_m \tau_r^*) = \frac{1}{R_a} (V_a - k_m \omega^*)$$

⇒ se ne possono tracciare gli andamenti ('affini', ossia lineari con offset) in funzione di  $\tau_r^*$  o di  $\omega^*$

# Motore DC: caratteristiche statiche



- coppia e corrente di stallo (= al max carico)

$$\tau_s = \tau_r \Big|_{\omega^* = 0} = \frac{k_m}{R_a} V_a \quad i_s = i_a \Big|_{\omega^* = 0} = \frac{V_a}{R_a}$$

- velocità e corrente a carico nullo

$$\omega_n = \omega^* \Big|_{\tau_r^* = 0} = \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \tau_s \quad i_n = i_a \Big|_{\tau_r^* = 0} = \frac{b}{k_m} \omega_n$$

- potenza in uscita a regime (quadratica)

$$\begin{aligned} P^* &= \tau_r^* \omega^* = \tau_s \omega^* - \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right) \omega^{*2} \\ &= \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \left( \tau_s \tau_r^* - \tau_r^{*2} \right) \end{aligned}$$

- la massima potenza si ha quando  $\frac{dP^*}{d\tau_r^*} = 0 \Rightarrow \tau_r^* = \frac{\tau_s}{2} \left( \text{per } \omega^* = \frac{\omega_n}{2} \right) \Rightarrow P_{\max} = \frac{\tau_s \omega_n}{4}$

- l'efficienza è data da  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\tau_r^* \omega^*}{V_a i_a^*}$  (non lineare), con valore massimo  $\eta_{\max}$  pari a ... (esercizio)

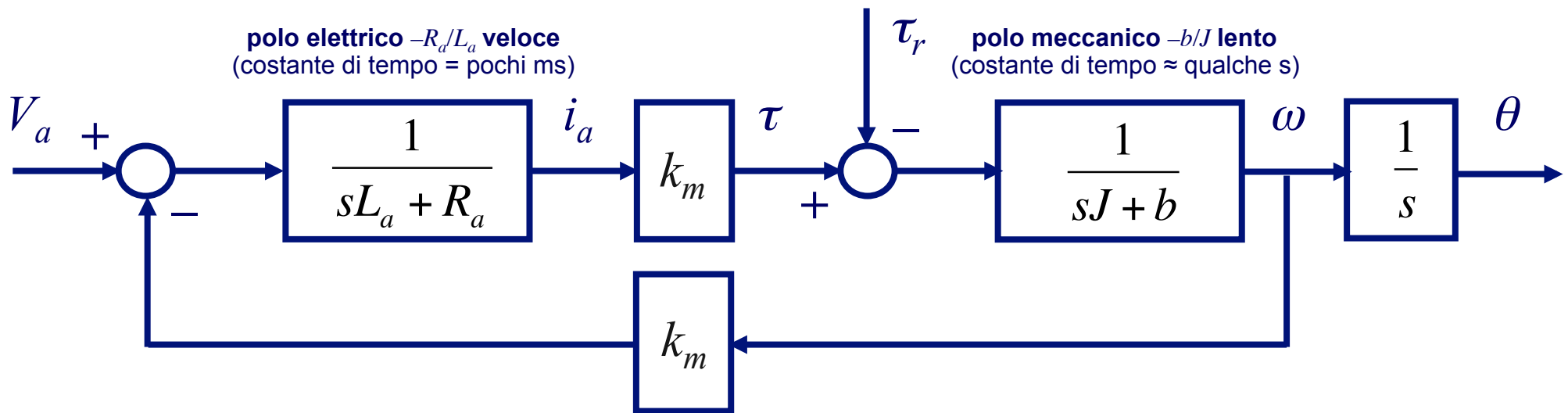
# Schema a blocchi del motore DC

nel dominio  
della trasformata  
di Laplace

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_a - k_m \omega \quad \Rightarrow \quad \frac{i_a}{V_a - k_m \omega} = \frac{1}{sL_a + R_a}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = k_m i_a - \tau_r \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega}{k_m i_a - \tau_r} = \frac{1}{sJ + b}$$

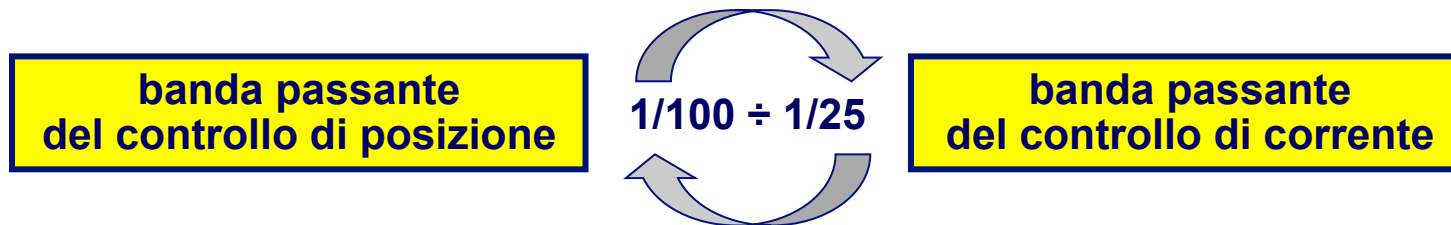
$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad \Rightarrow \quad \frac{\theta}{\omega} = \frac{1}{s}$$



Domande classiche:  $G(s) = \omega(s)/V_a(s)$  ? Stabilità (ad anello aperto) ? “Luogo delle radici” al variare di  $k_m > 0$  ?

# Progetto del controllore

- obiettivi di controllo
  - ➔ stabilità (meglio, *robusta*: anche in condizioni operative incerte)
  - ➔ *inseguimento* di un riferimento desiderato di posizione  $\theta_{rif}(t)$
  - ➔ *reiezione* dei disturbi di coppia non nota  $\tau_r(t)$
- progetto “centralizzato” o “per successivi anelli (loop)” del controllore
  - ➔ difficile il primo, vantaggioso il secondo sotto l’ipotesi di *idealità* degli anelli interni
  - ➔ tre anelli di feedback (e azioni di feedforward) su corrente, velocità e posizione
- separazione dinamica

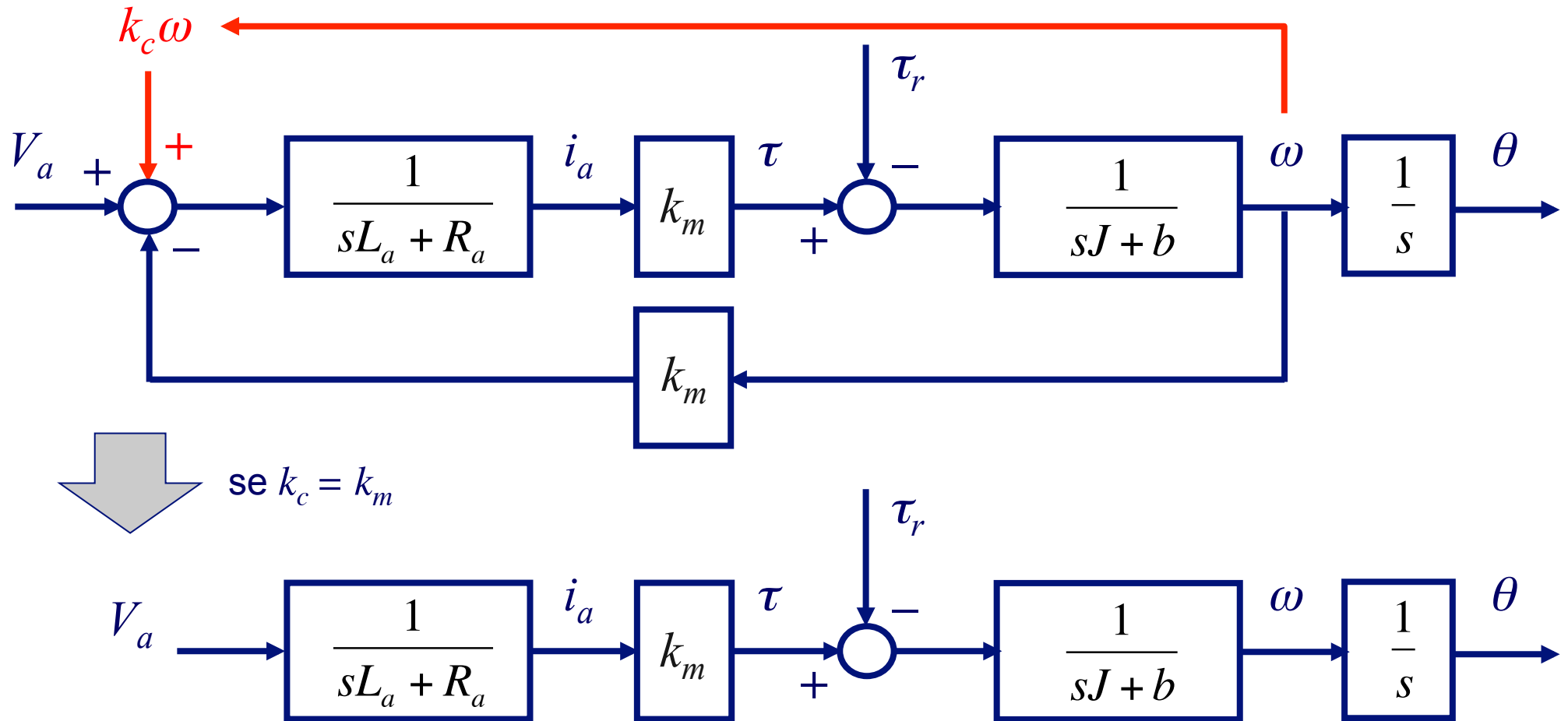


- limitazioni nell’implementazione
  - ➔ saturazioni ‘fisiche’ di tensione e corrente
  - ➔ rumori
  - ➔ limite inferiore sul tempo di campionamento
  - ➔ banda dell’anello di corrente tipicamente  $0.5 \div 1 \times 10^4$  rad/sec
  - ➔ banda dell’anello di posizione circa 400 rad/sec

# Controllo del motore DC

cancellazione via *feedback* della FCEM attuale

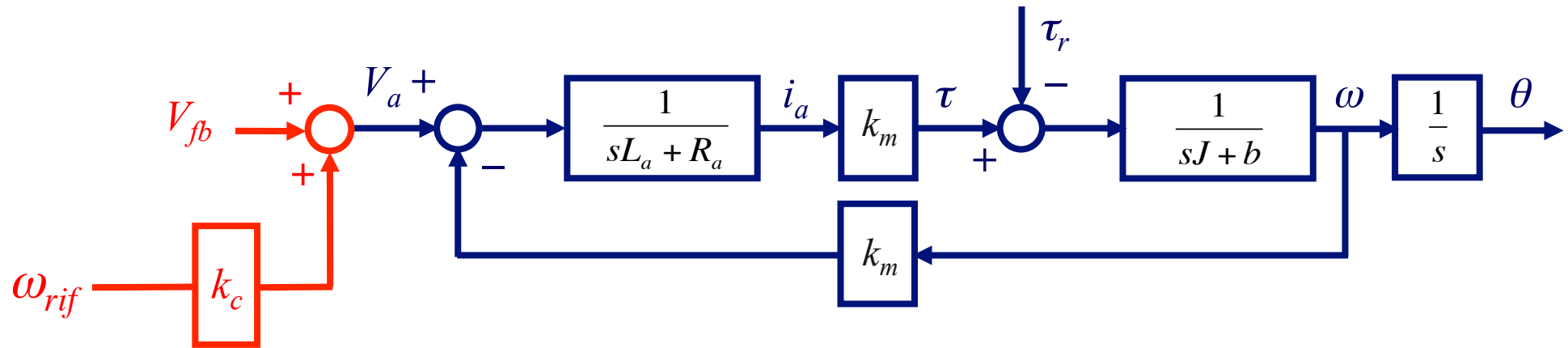
- ❑ la corrente risente anche del modello meccanico e del disturbo di coppia
- ❑ cancellazione con retroazione positiva (ma problemi di *instabilità* quando  $k_c > k_m$ )



# Controllo del motore DC

compensazione via *feedforward* della FCEM nominale

- ▣ azione in avanti per compensare, almeno in modo approssimato, il fenomeno

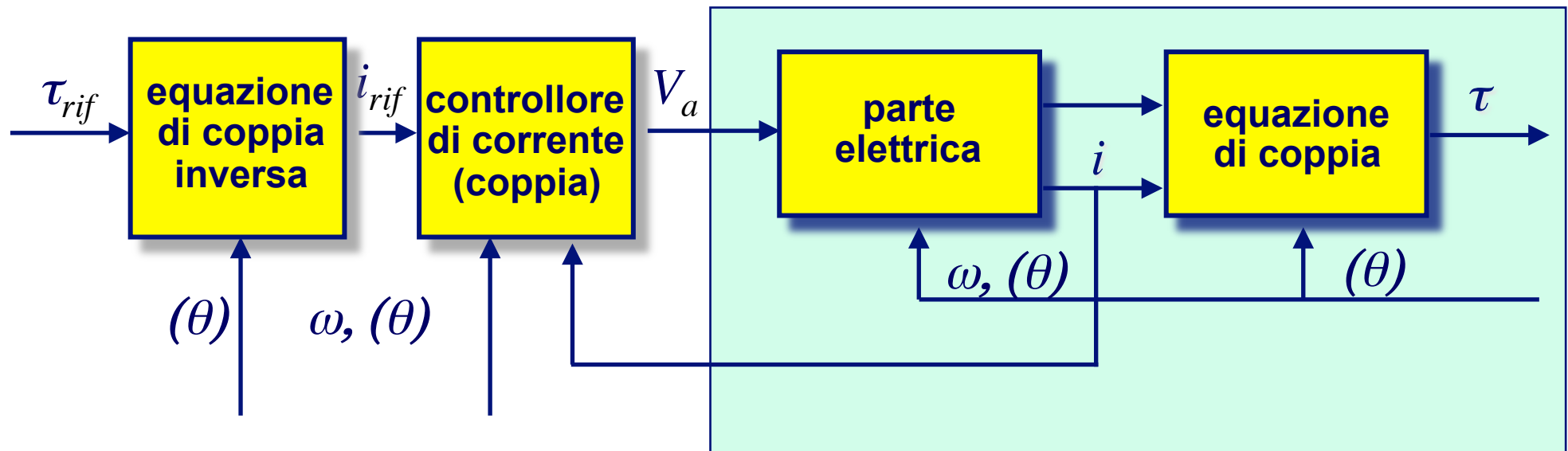




# Controllo del motore DC

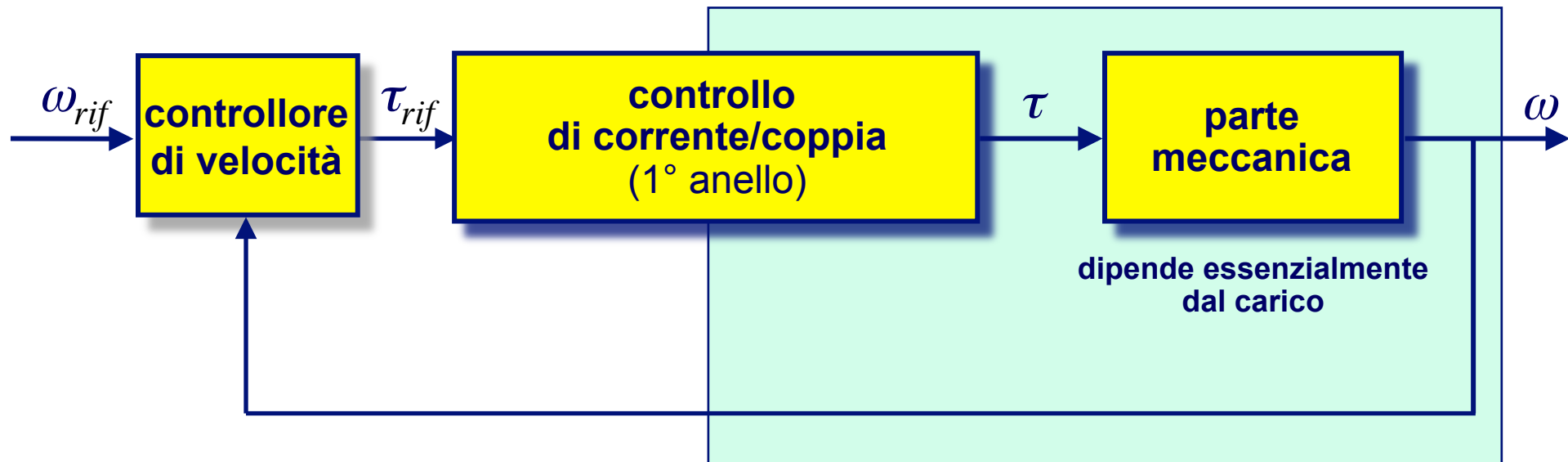
1° anello (più interno) di corrente (o di coppia)

- ❑ risente degli effetti dell'amplificatore
- ❑ risente direttamente della natura del motore
- ❑ usa la relazione coppia-corrente statica (non si ha una misura diretta di coppia)



## 2° anello (intermedio) di velocità

- ❑ l'anello più interno è visto come un attuatore "ideale" (o quasi) di coppia
- ❑ risente indirettamente della natura del motore
- ❑ risente direttamente della natura meccanica del carico

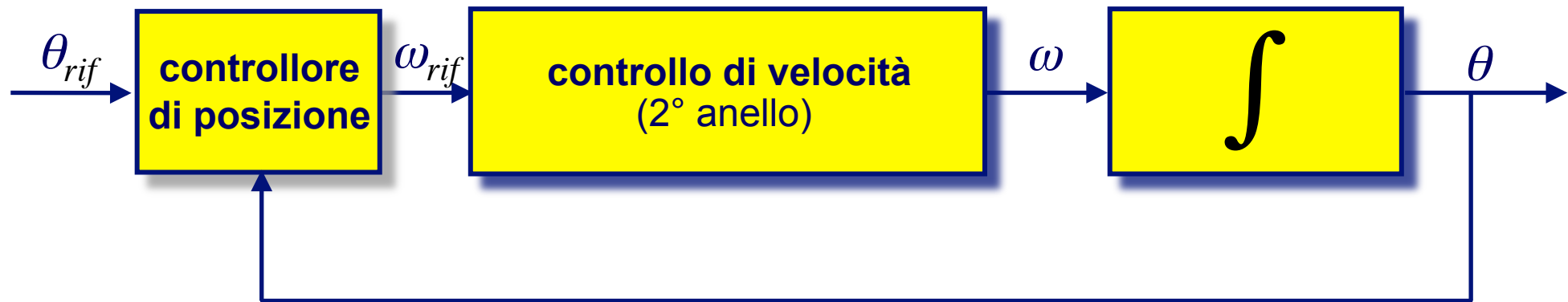


# Controllo del motore DC

## 3° anello (esterno) di posizione

- ❑ il secondo anello interno è visto come un attuatore “ideale” (o quasi) di velocità
- ❑ risente indirettamente della natura elettrica del motore
- ❑ risente indirettamente della natura meccanica del carico

} puramente cinematico



### ❑ nel progetto effettivo

- ➔ si parte dall'anello più esterno e si procede verso quelli interni (assumendo gli anelli più interni come ideali)
- ➔ l'uscita di comando di un anello esterno è l'ingresso di riferimento per l'anello immediatamente più interno

# Controllo del motore DC

Che tipo di regolatori si usano **nei diversi loop** di controllo?

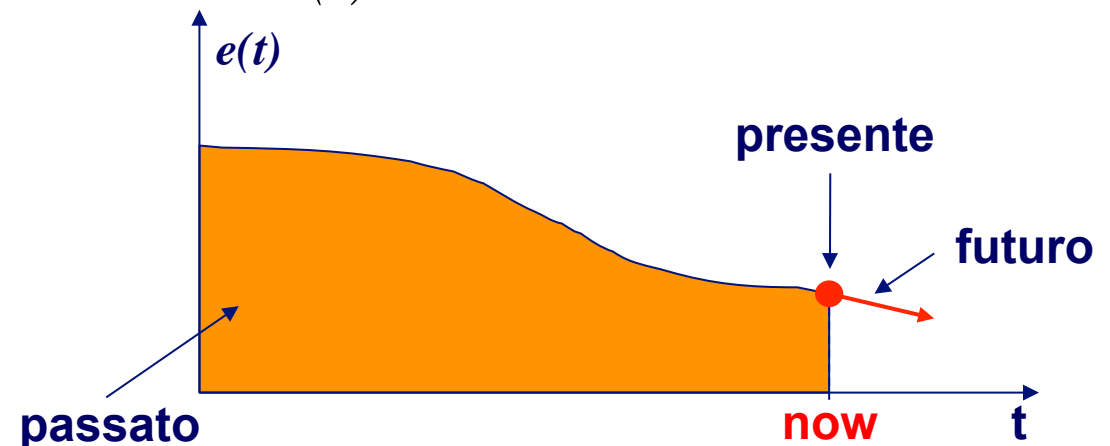
## ❑ caratteristiche desiderate

- ➔ basso costo
- ➔ standardizzazione
- ➔ semplicità della legge (algoritmi complessi non servono, le limitazioni maggiori sono imposte dalla tecnologia)
- ➔ semplicità di taratura dei parametri (tuning)

## ❑ soluzione più comune $\Rightarrow$ regolatori PID

Quali informazioni sul segnale di errore  $e(t)$  si introducono nell'azione di controllo?

- ❑ presente:  $e(t)$
- ❑ passato:  $\int e(t)dt$
- ❑ futuro:  $de(t)/dt$



## Regolatore Proporzionale-Integrale-Derivativo (PID)

- ❑ produce in generale tre azioni, ciascuna proporzionale a
  - ➔ errore istantaneo (azione P)
  - ➔ integrale del segnale di errore (azione I)
  - ➔ (stima) della derivata del segnale di errore (azione D)
- ❑ è ampiamente usato in automazione (**standard**)
  - ➔ semplice da tarare (solo tre parametri)
  - ➔ con procedure automatiche (che non usano in genere informazioni sul modello)
  - ➔ comportamento piuttosto robusto rispetto a incertezze
- ❑ è un sistema dinamico (se l'azione integrale è effettivamente presente)

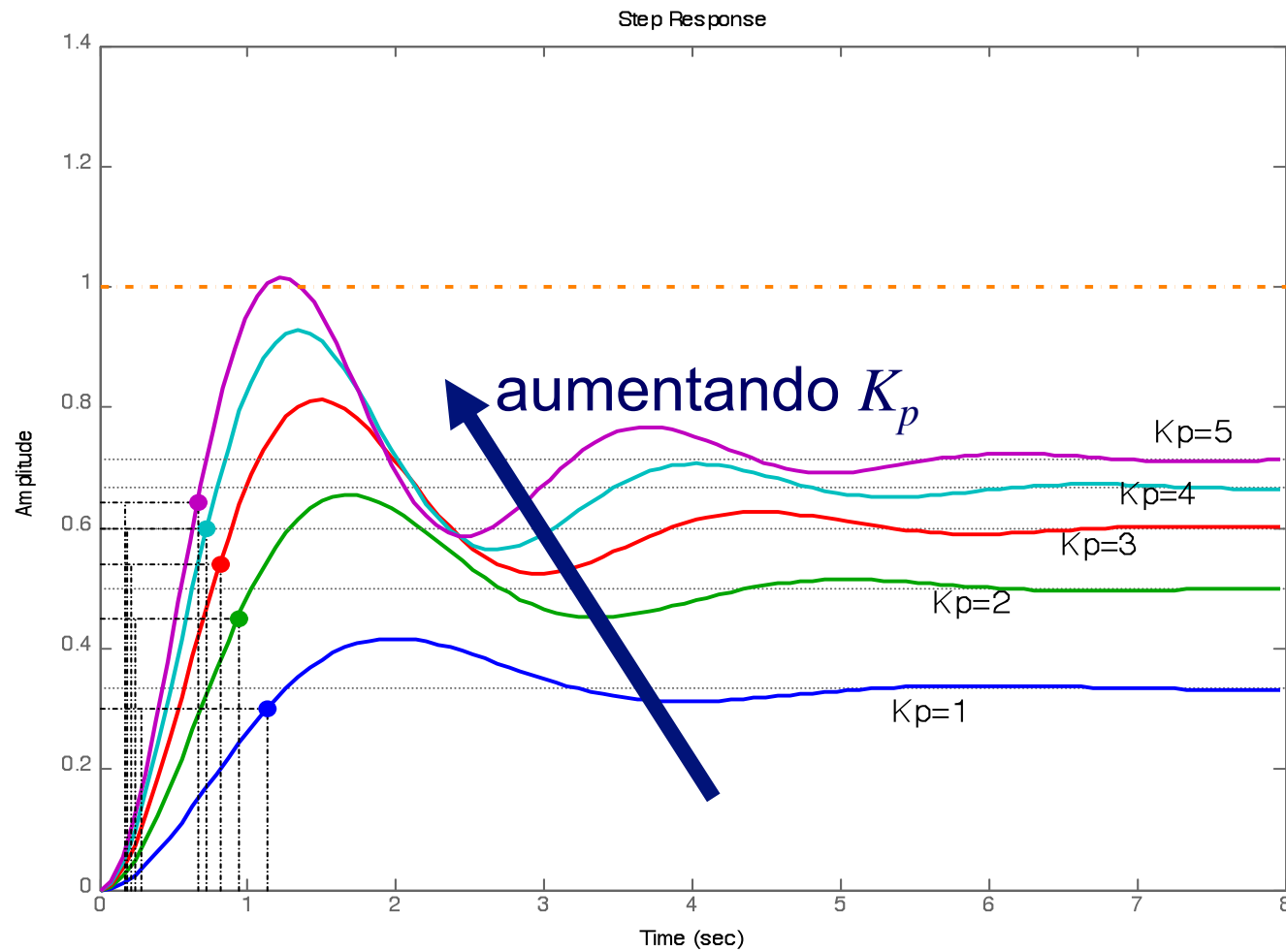
$$e(t) = y_{rif}(t) - y(t)$$

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

## Azione P

- accelera il comportamento transitorio del sistema
- **riduce** l'errore a regime
  - ➔ per avere errore a regime nullo, il guadagno  $K_p$  dovrebbe essere infinito (per avere un'azione non trascurabile anche in presenza di errore molto piccolo)
  - ➔ per questo motivo si introduce l'azione integrale...
- svantaggio: tende a destabilizzare il sistema

## Azione P



## Azione I

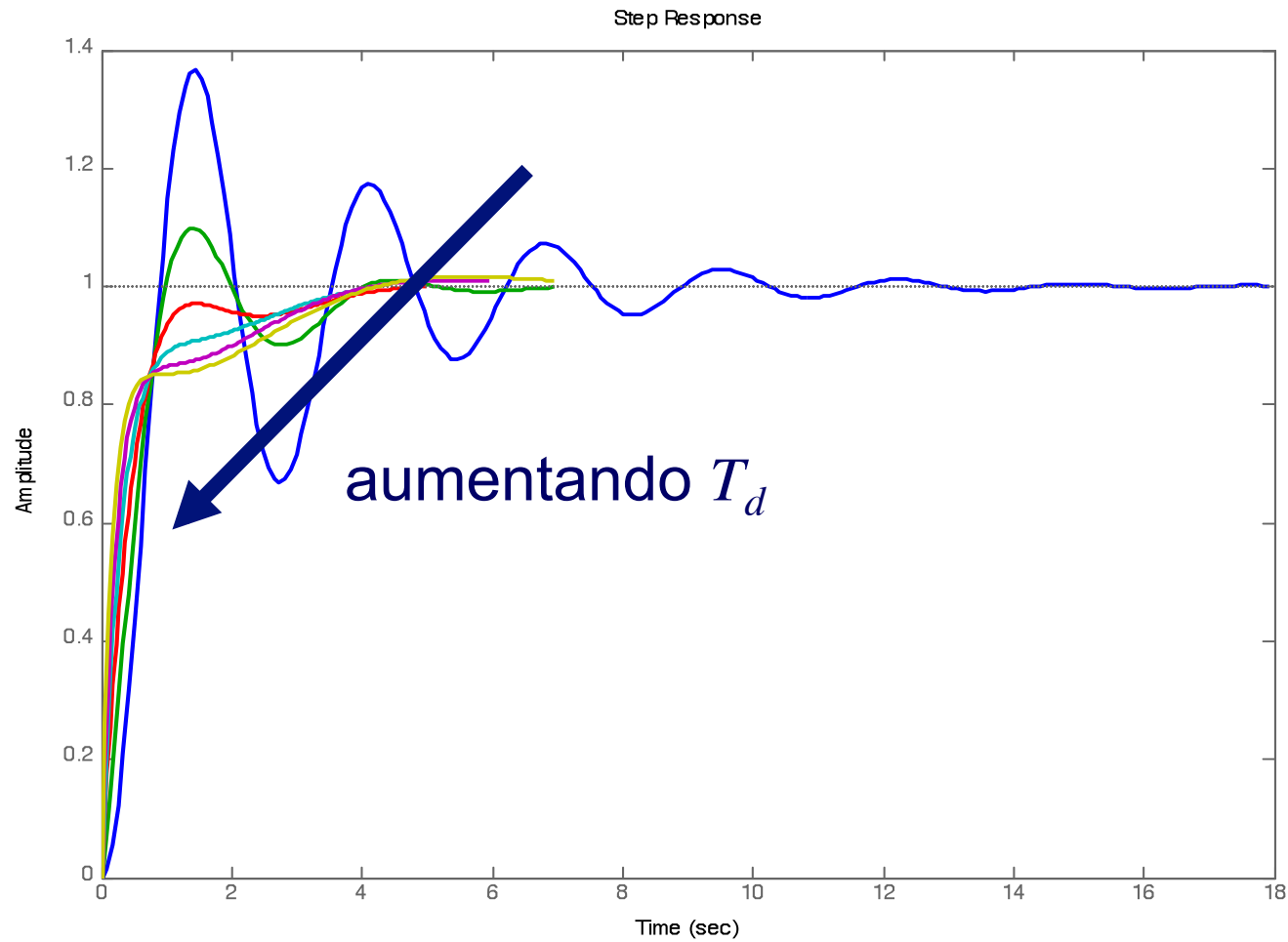
- ❑ azione diversa da zero anche quando  $e(t) = 0$
- ❑ **annulla** l'errore a regime per riferimenti costanti
  - ➔ equivale ad un guadagno proporzionale infinito per segnali costanti (a frequenza nulla)
- ❑ svantaggio: tende a destabilizzare il sistema



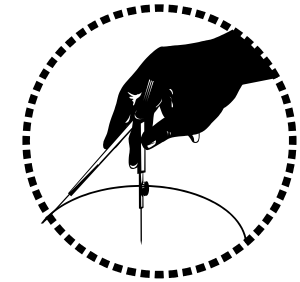
## Azione D

- azione basata su stima dell'evoluzione futura del sistema
  - ➔ per motivi di causalità, si può solo “approssimare” la derivata del segnale di errore
- **anticipa** l'errore, evitando che l'uscita si allontani dal riferimento a causa dell'accelerazione data dall'azione proporzionale
- tende a stabilizzare il sistema
- svantaggio: rallenta la risposta del sistema

## Azione D



regole di massima sulle  
singole azioni di controllo

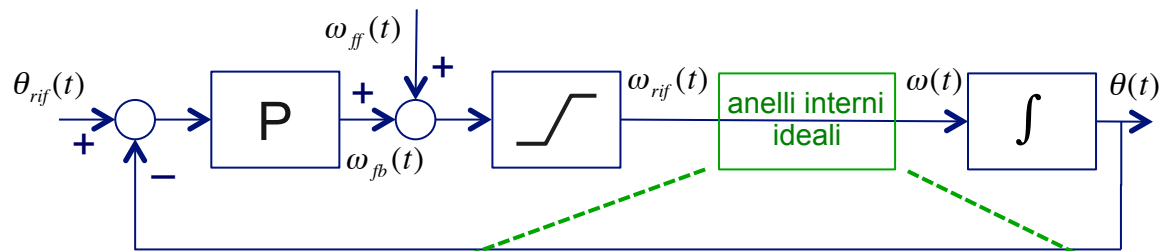


aumentando l'azione	prontezza di risposta	marginе di stabilità	errore a regime
<b>P</b> $K_p \uparrow$	<b>aumenta</b>	<b>diminuisce</b>	<b>diminuisce</b>
<b>I</b> $T_i \downarrow$	<b>diminuisce</b>	<b>diminuisce</b>	<b>nullo</b> (se azione presente)
<b>D</b> $T_d \uparrow$	<b>diminuisce</b>	<b>migliora</b> (se azione presente)	<b>ininfluente</b>

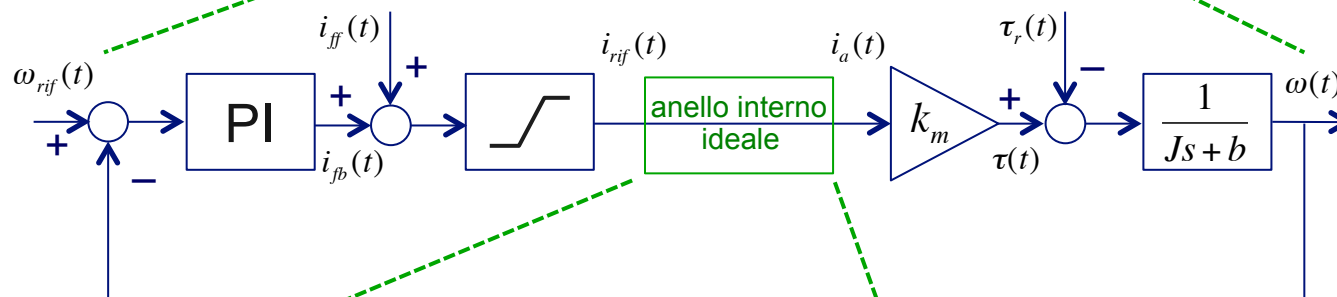
N.B. Più avanti nel programma, metodi empirici di 'auto-tuning'/sintonizzazione dei guadagni e possibili implementazioni digitali dei PID

# Progetto dei singoli anelli per un motore DC

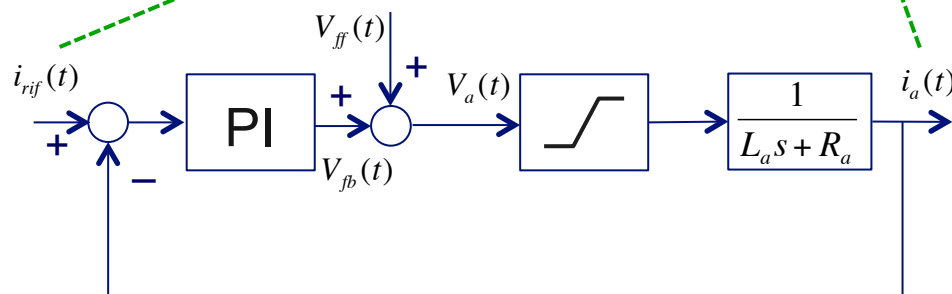
- nell'ipotesi di separazione dinamica, si procede a ritroso dall'anello più esterno: posizione  $\Rightarrow$  velocità  $\Rightarrow$  corrente



- $\Rightarrow$  regolatore **P** di posizione
- $\Rightarrow$  il processo è un integratore (sistema di tipo 1!)

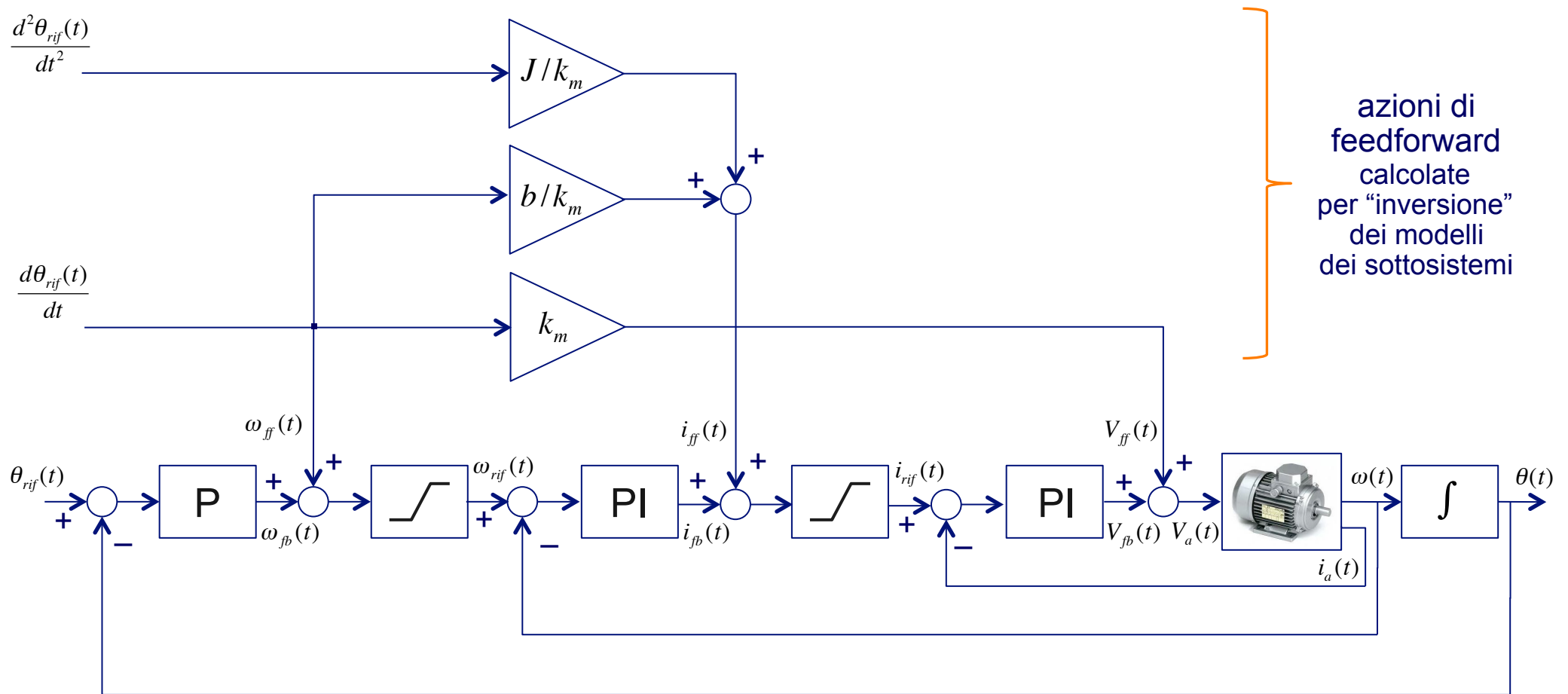


- $\Rightarrow$  regolatore **PI** di velocità
- $\Rightarrow$  azione integrale per reiezione del disturbo (di coppia)



- $\Rightarrow$  regolatore **PI** di corrente
- $\Rightarrow$  azione integrale per robustezza a incertezze dei parametri elettrici

# Schema di controllo finale di un motore DC

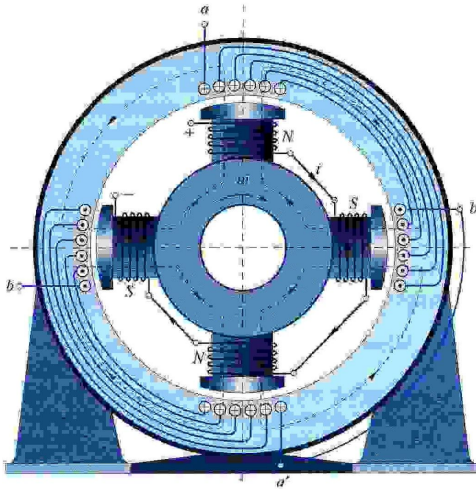


- ❑ **anelli di feedback:** PI su corrente; PI su velocità; P su posizione
- ❑ **compensazioni (feedforward):** per inseguimento di traiettoria e rimozione FCEM

# Altri azionamenti elettrici

- oltre al motore DC visto nel dettaglio, c'è un'enorme varietà di altri motori elettrici con le relative architetture di controllo
- un azionamento elettrico (motore elettrico + sistema di controllo) è caratterizzato da
  - ➔ potenza meccanica (la "taglia" deve soddisfare le richieste del task di movimentazione)
  - ➔ parametri elettro-meccanici
  - ➔ costo di realizzazione (HW del motore e dispositivi annessi)
  - ➔ costo del sistema di controllo (HW/SW, dettato dalle specifiche sulle prestazioni)
- qualche "rule of thumb"..
  - motore di semplice realizzazione  $\Leftrightarrow$  modello complesso  $\Leftrightarrow$  algoritmo di controllo sofisticato
  - applicazioni di piccola taglia: motori complessi, ma con hardware di controllo semplice
  - applicazioni di media/grande taglia: motori di semplice realizzazione con controlli complessi
- aspetti rilevanti nella scelta di un azionamento elettrico per automazione industriale
  - ➔ prestazioni in regolazione e inseguimento (tracking), risposta dinamica nel transitorio
  - ➔ capacità di erogare extra coppia e/o velocità oltre i valori nominali
  - ➔ taglia (potenza e/o coppia massima erogabile), costi e diffusione
  - ➔ *inoltre*: allocazione fisica, raffreddamento, influenza su meccanica del restante sistema

# Altri motori per azionamenti elettrici



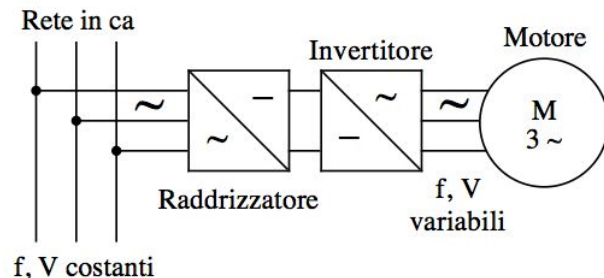
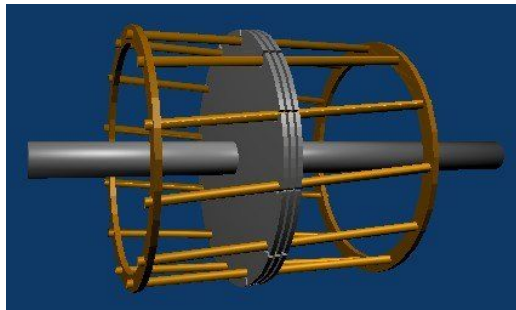
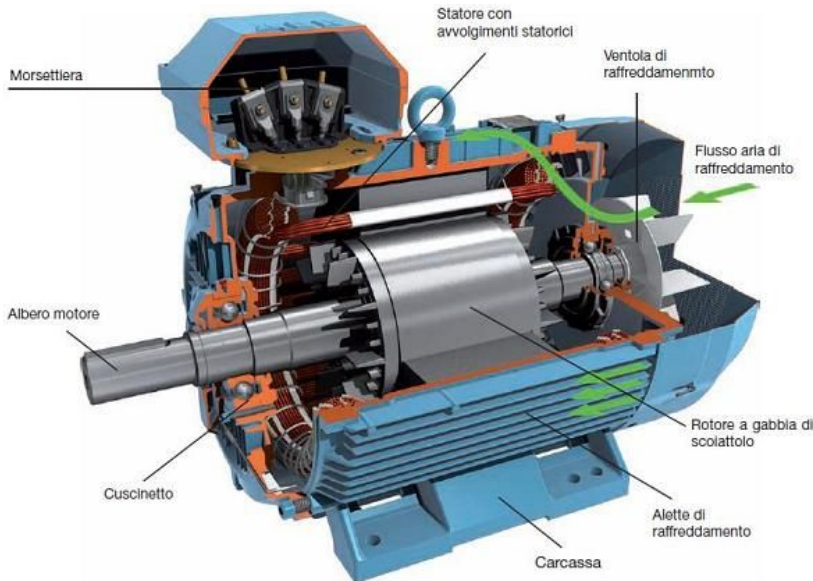
## motore sincrono

- *brushless*, alimentato in corrente alternata (AC)
- statore con avvolgimenti organizzati in (3-6) fasi
- rotore a magnete permanente
- logica di switching per alimentare ciclicamente le fasi in modo da generare un campo magnetico ortogonale a quello del rotore
- i due campi rimangono sempre sincroni e sfasati per generare coppia
- problemi di ondulazione della coppia (*cogging*) a velocità ridotta
- velocità di rotazione resta costante e proporzionale alla frequenza di alimentazione (da cui il nome “sincrono”) in tutto il campo di coppie ammissibili
- problemi nell’avviamento da fermo
- due realizzazioni
  - *a campo trapezoidale*
  - *a campo sinusoidale* (controllo più complesso)

# Altri motori per azionamenti elettrici

## motore asincrono (a induzione)

- alimentato in corrente alternata (AC)
- sistema *trifase*
  - statore con tre avvolgimenti uguali (*fasi*) disposti a  $120^\circ$  sui quali circolano correnti sinusoidali a pulsazione  $\omega$  sfasate di  $120^\circ$
  - si genera un campo magnetico di ampiezza costante e rotante alla stessa pulsazione  $\omega$
  - sul rotore (a *gabbia di scoiattolo*), con tre fasi analoghe e cortocircuitate, si “inducono” correnti che lo mettono in rotazione (da cui il nome)
- il rotore insegue il campo magnetico rotante, ma sempre con uno scorrimento relativo (*slip*)
- due schemi di comando/controllo
  - commutatore elettronico (*inverter*) comanda ad anello aperto la tensione  $V$  e la frequenza  $f$  per modulare la velocità
  - controllo vettoriale (a *orientamento di campo*) ad anello chiuso per disaccoppiare la regolazione del flusso di induzione e della coppia

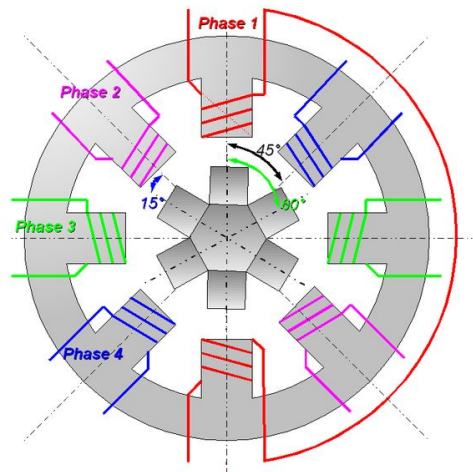




# Altri motori per azionamenti elettrici

## motore passo-passo (stepper motor)

- statore con  $F_s$  avvolgimenti eccitabili in modo separato (*fasi unipolari*),  $F_s = 4, 6, \text{ o } 8$
- rotore ferromagnetico con  $E_r$  espansioni polari, spesso  $E_r = 50$
- principio di *minima riluttanza magnetica*
  - quando la corrente circola in una delle fasi dello statore, il rotore si dispone in modo da minimizzare la riluttanza (massimizzare il flusso)
  - ad ogni commutazione dell'elettronica di pilotaggio, il motore ruota di un angolo  $\alpha$  (*passo*)
  - l'angolo  $\alpha$  dipende dal numero di fasi dello statore e di espansioni del rotore (come i denti in un ingranaggio)
  - nell'esempio  $\alpha = 15^\circ$
- pensato per il controllo di posizione



$$F_s = 8, E_r = 6$$



# Confronto tra tipi di azionamenti elettrici

TIPO	Regolazione	Tracking	Risposta dinamica	Extra coppia	Extra velocità	Taglia	Diffusione	Costo
<b>DC</b> a magneti permanenti	ottima	ottimo	eccellente	≤ 6-8 volte con motori speciali	no	fino a 3-4 MW, se collettore con circuito di eccitazione	ampia, in calo	contenuto per basse potenze
<b>sincrono brushless</b> a campo trapezoidale	ottima, buona ad alta velocità	buono	buona	≤ 2-4 volte	no (solo con soluzioni particolari)	≤ 5 KW	ampia, in calo	contenuto
<b>sincrono brushless</b> a campo sinusoidale	ottima, cogging a bassissima velocità	eccellente	massima	≤ 4-6 volte	no (solo con soluzioni particolari)	≤ 10 KW	standard industriale	elevato, in calo
<b>asincrono</b> (a induzione) con inverter	scadente (comando ad anello aperto in V/f)	scadente	discreta	≤ 2-4 volte	si, con deflussaggio	0.5 ÷ 1 KW	molto ampia, standard industriale	minimo (per KW)
<b>asincrono</b> (a induzione) vettoriale	eccellente	eccellente	eccellente (poco meno del sincrono)	≤ 4-6 volte	si, con deflussaggio	≤ 500 KW	modesta, in grande crescita	elevato, in calo
<b>passo-passo</b> (stepper) a riluttanza variabile	buona	buono	discreta	no	no, problemi alle alte velocità	≤ 5 KW	ampia per piccole potenze	contenuto

# Sincronizzazione dei moti

- se abbiamo più assi (arbitrariamente complessi) da muovere in modo coordinato, utilizziamo un solo attuatore o più attuatori?

video



video

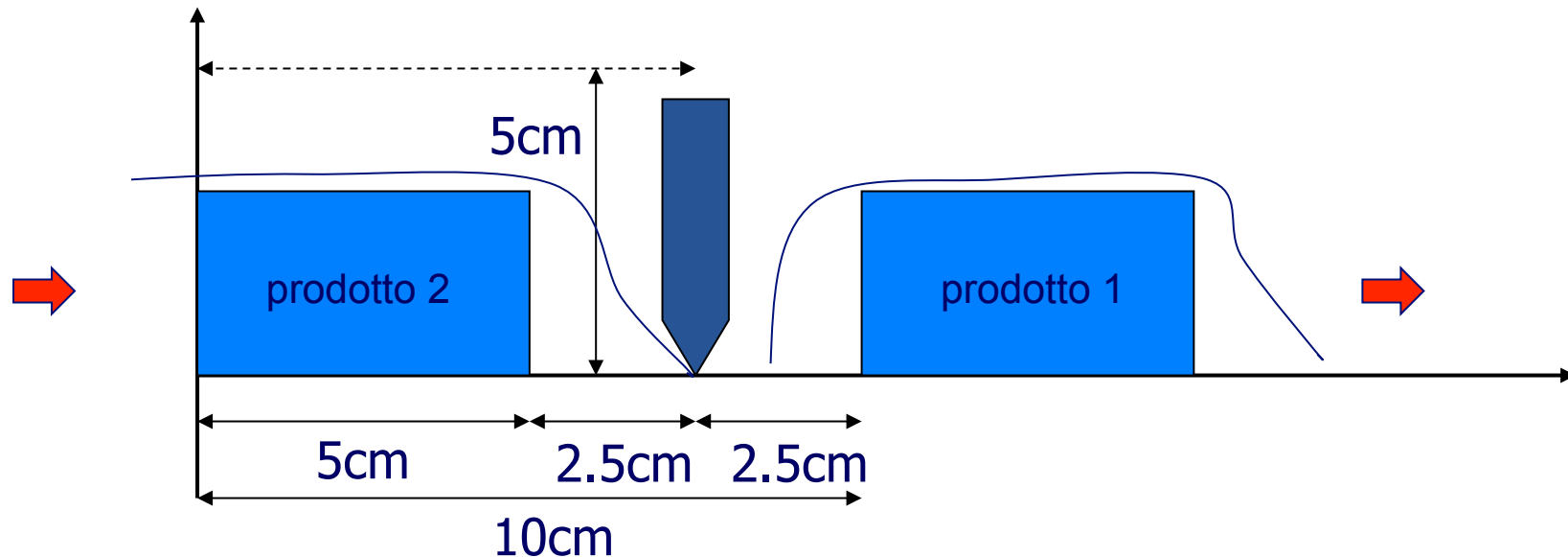


Automati della Maison Rouillet-Decamps, costruiti nel XIX-XX secolo (ognuno ha un solo motore)  
Musée de l'Automate, Soulliac sur Dordogne, France  
<http://www.musee-automate.fr>

# Sincronizzazione dei moti

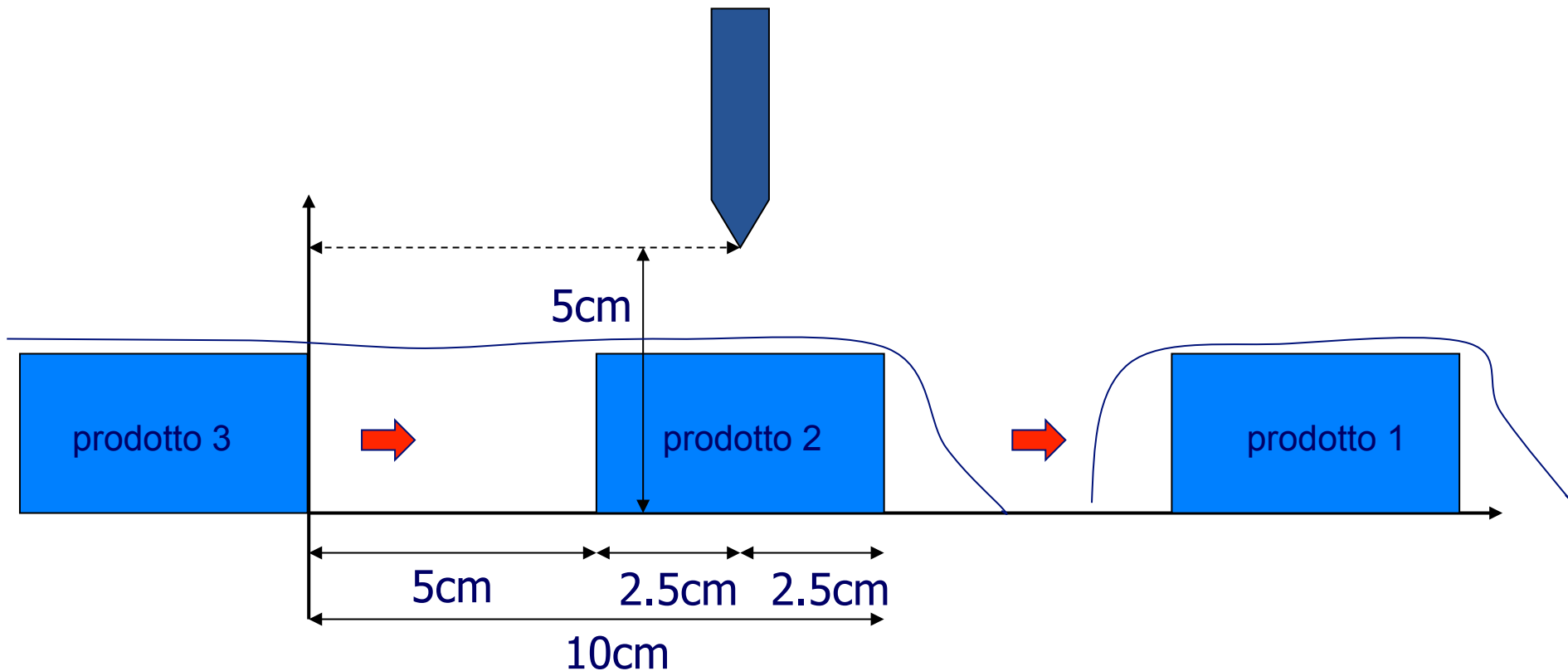
- se abbiamo più assi da muovere in modo coordinato, utilizziamo un solo attuatore o più attuatori?

problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore



# Sincronizzazione dei moti

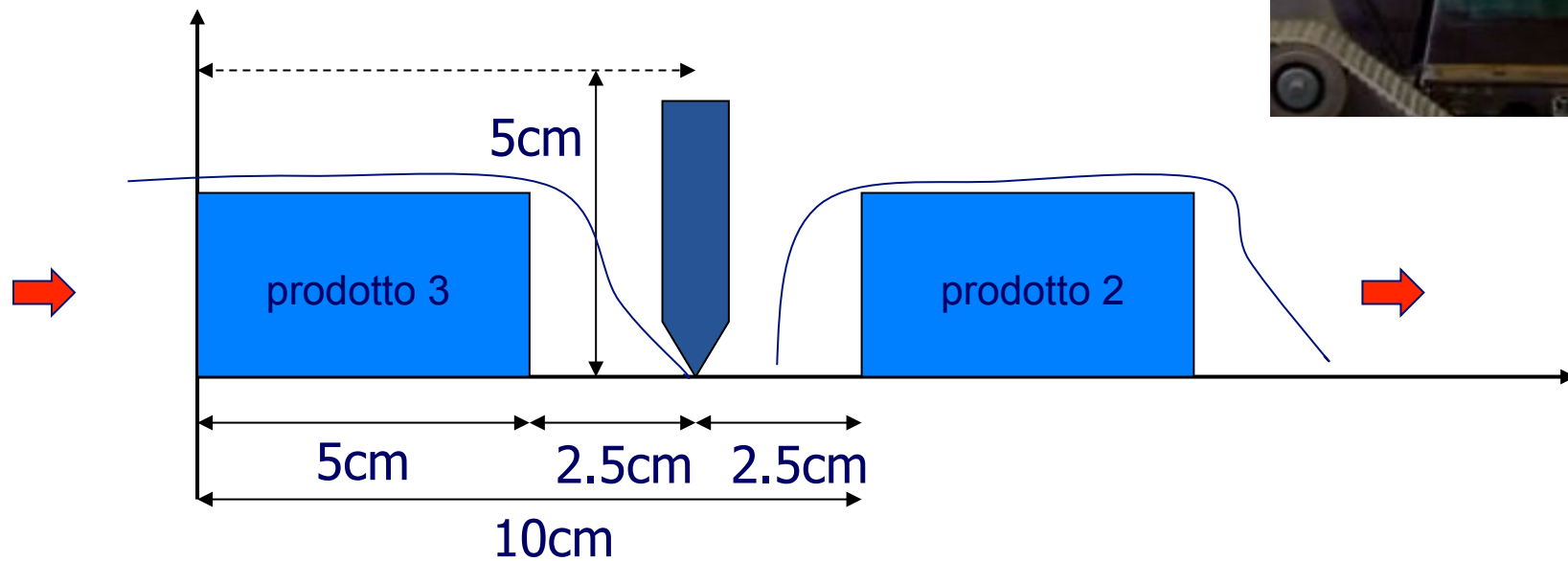
problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore



# Sincronizzazione dei moti

problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore

esempio di prodotto:  
pacco di 6 bottiglie  
di acqua minerale  
"imballate" in plastica

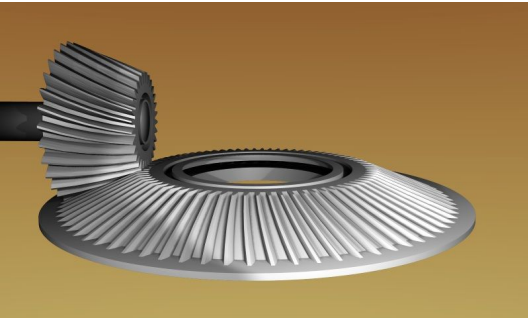


Coordinamento della movimentazione delle parti meccaniche in un sistema mecatronico

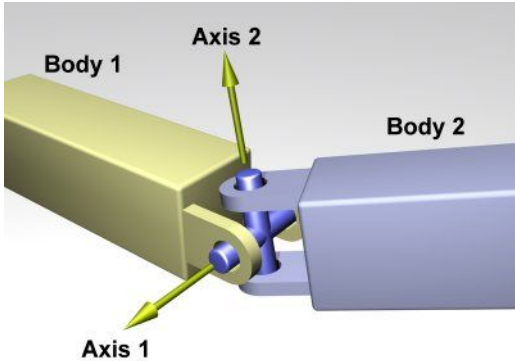
- ❑ meccanica
- ❑ elettronica
- ❑ automatica

Inizialmente il controllo e la distribuzione del moto era demandato a una serie di dispositivi meccanici (**catene cinematiche**) azionati da un'unica sorgente di moto (motore elettrico a velocità costante)

- ❑ soluzione robusta e affidabile, ma estremamente rigida
  - ➔ cambio formato = cambio parti meccaniche
- ❑ macchine automatiche **mono-attuatore**



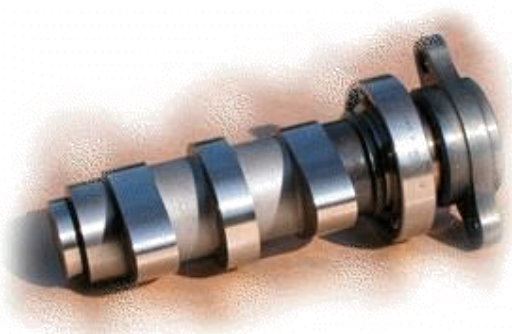
**ruotismi**



**giunti**



**manovellismi**



**camme**

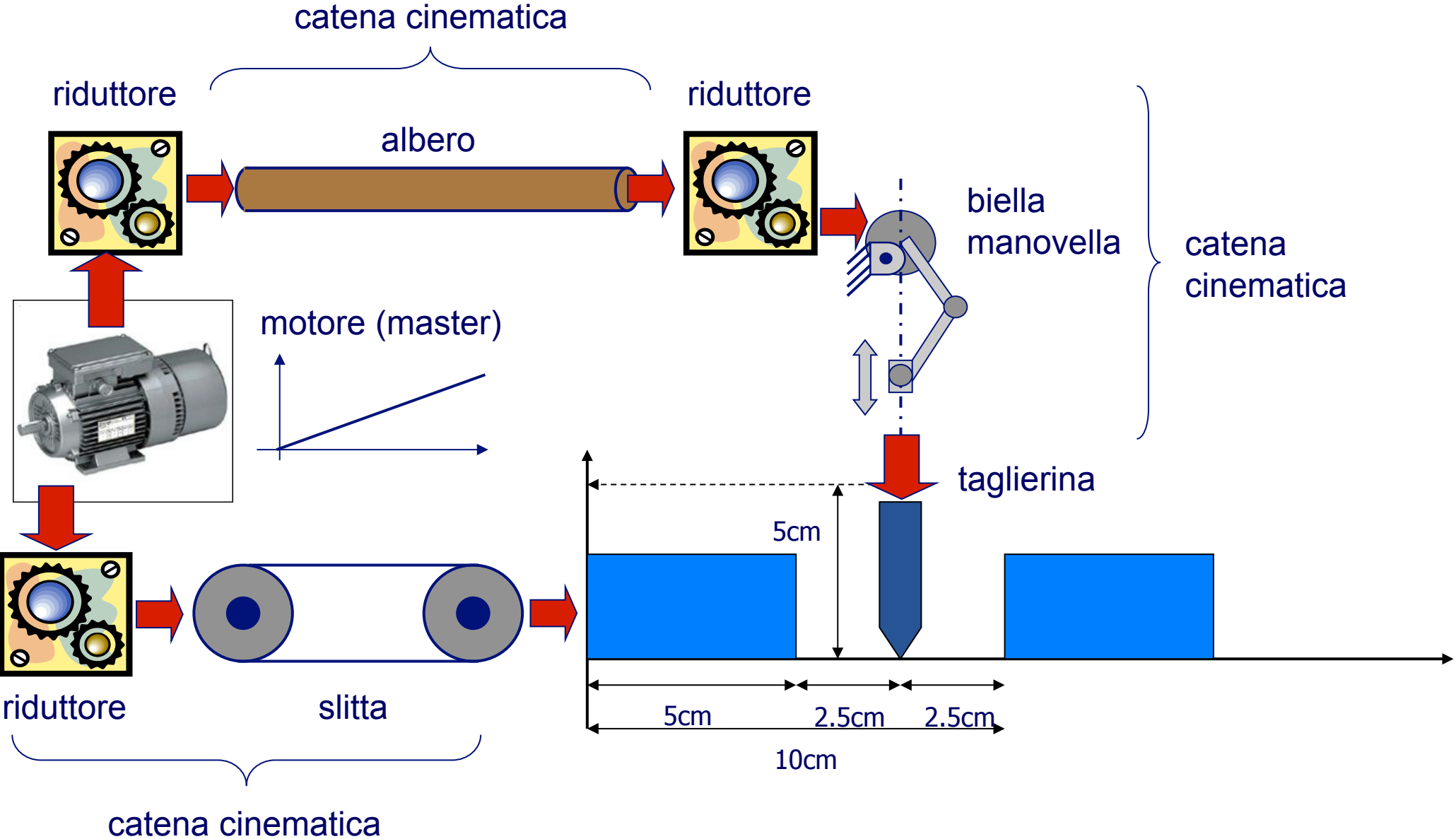


**cinghie/pulegge**



**cremagliere**



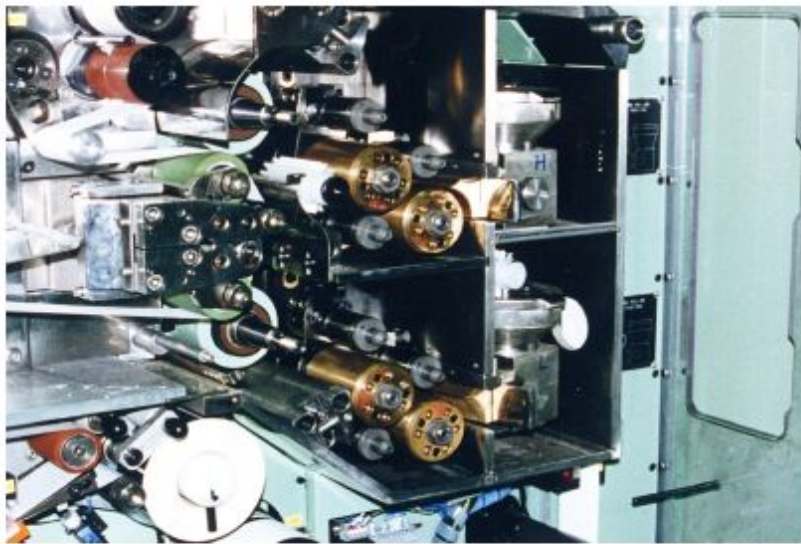


# Sincronizzazione dei moti

Dalla metà degli anni 1980 si è adottata una nuova soluzione basata sul controllo elettronico del moto mediante retroazione

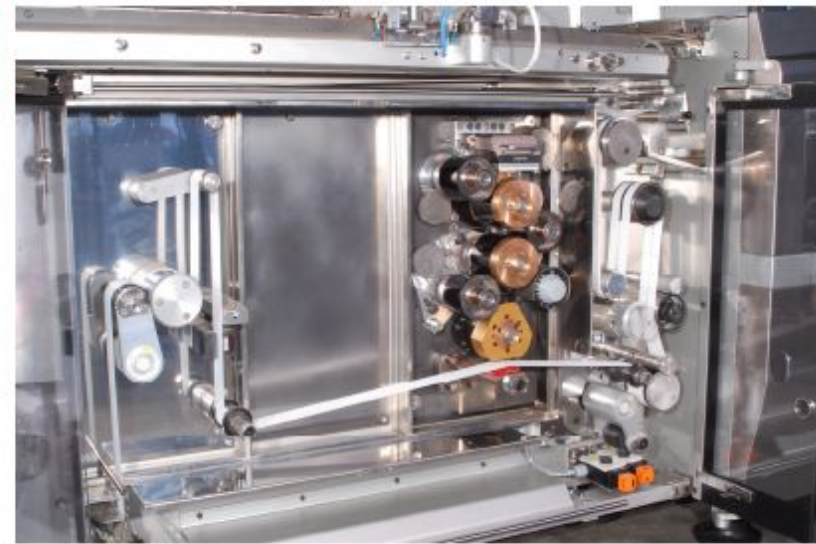
asservire assi elettrici a riferimenti di posizione impostati via software

- ❑ asse principale (master) a cui sono sincronizzati **più** assi secondari (slave) secondo profili di moto gestiti completamente via software
- ❑ sincronizzazione basata sul concetto di “camma elettronica”
- ❑ macchine automatiche **pluri-attuatore** (integrate)



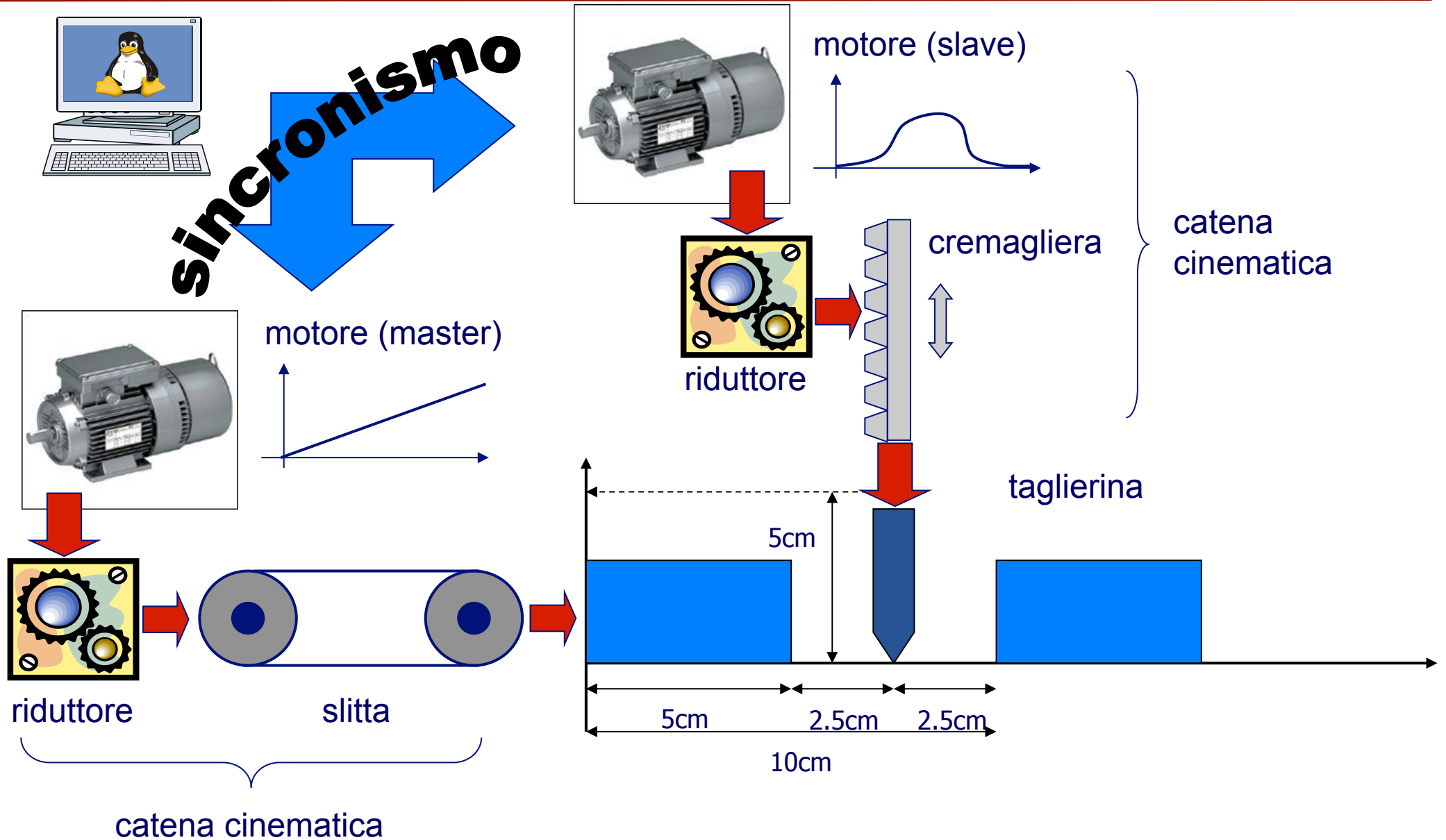
ieri

G.D



oggi

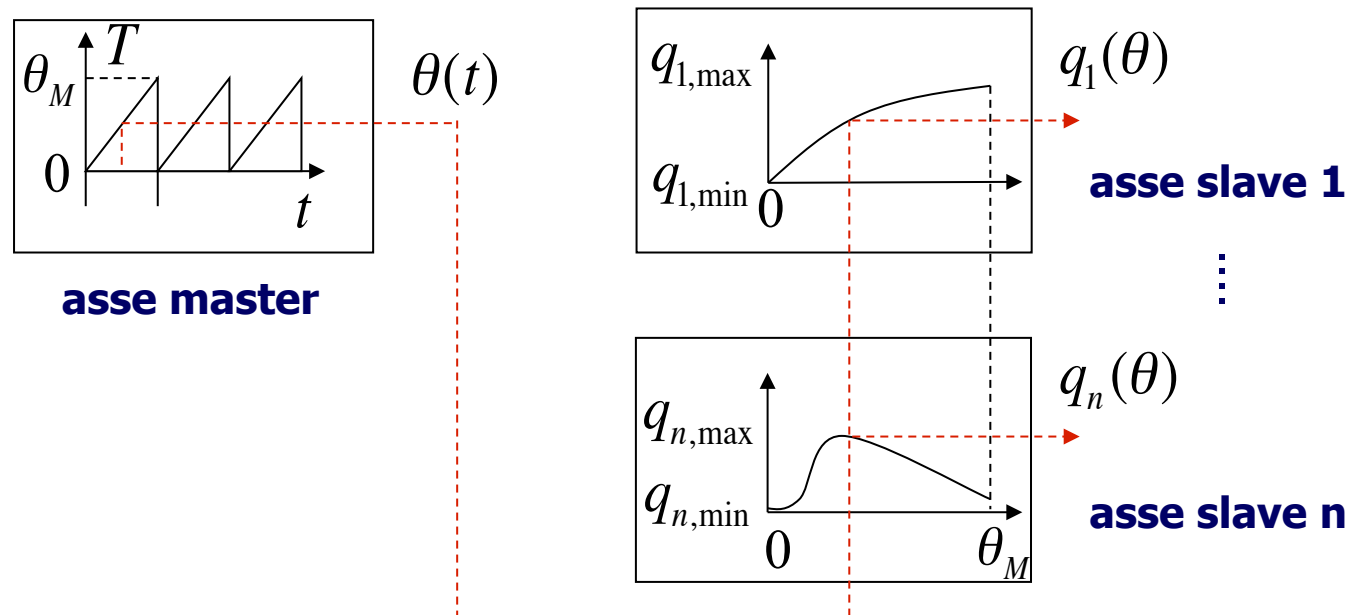
# Sincronizzazione dei moti



# Sincronizzazione dei moti

## □ sincronizzazione master-slave

- asse motore master tipicamente a velocità costante
- profili di moto degli assi dei motori slave parametrizzati sul profilo di moto master
- problema di inseguimento della traiettoria per un motore elettrico



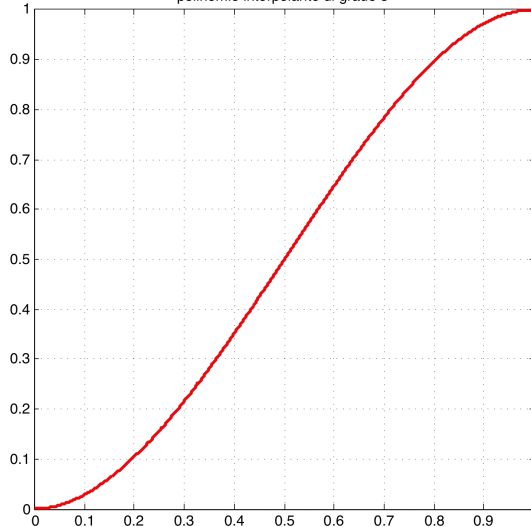


# Profili di moto

- profili binormalizzati di una cubica e una quintica (con derivate nulle al contorno)

$$f_N(\theta_N) = 3\theta_N^2 - 2\theta_N^3$$

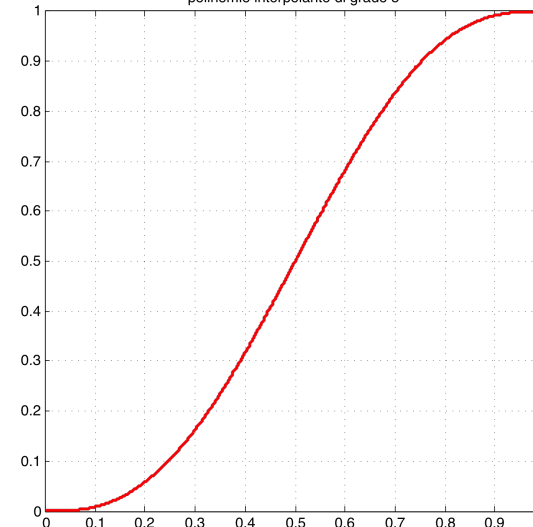
polinomio interpolante di grado 3



posizione

$$f_N(\theta_N) = 10\theta_N^3 - 15\theta_N^4 + 6\theta_N^5$$

polinomio interpolante di grado 5

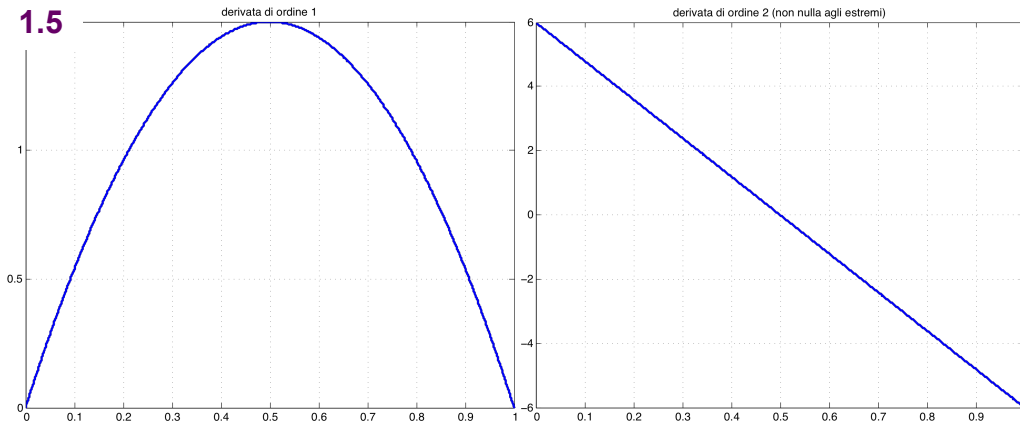


posizione

se le derivate fossero  
rispetto al tempo...

“velocità”

derivata di ordine 1

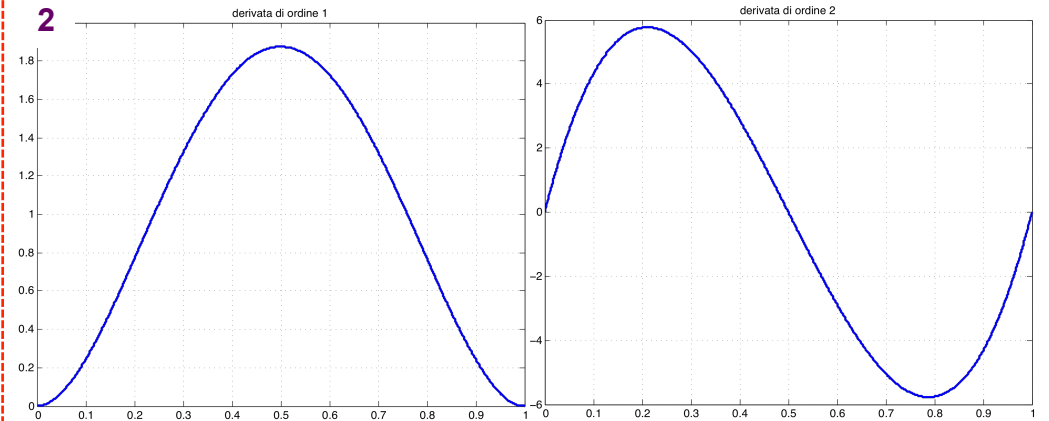


“accelerazione”

derivata di ordine 2 (non nulla agli estremi)

“velocità”

derivata di ordine 1

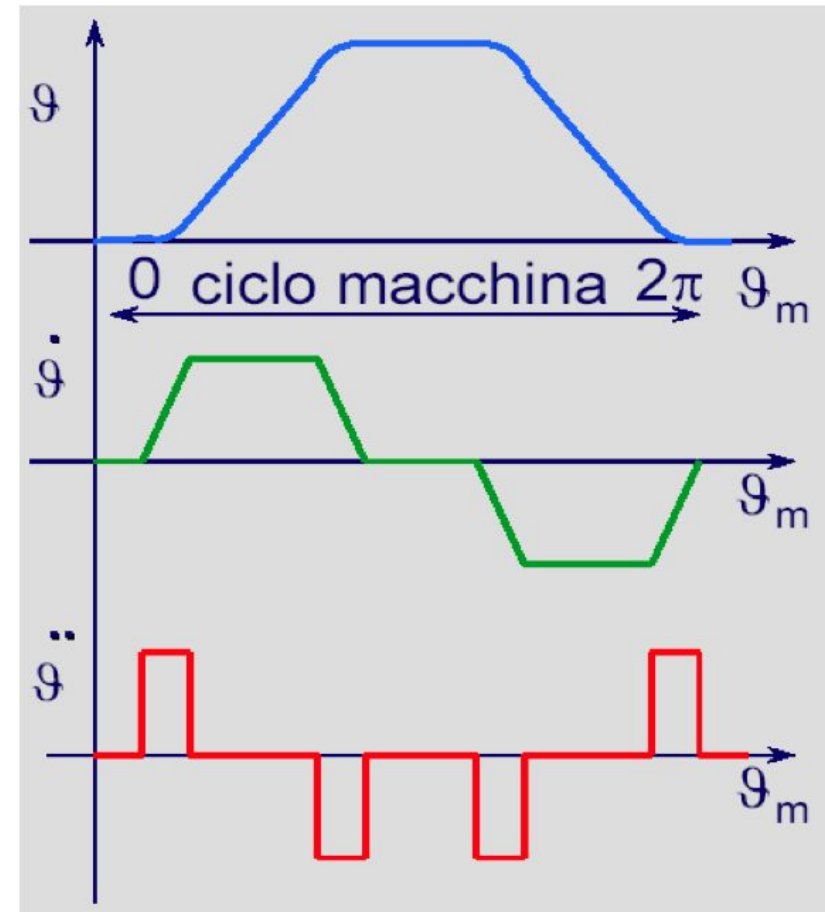
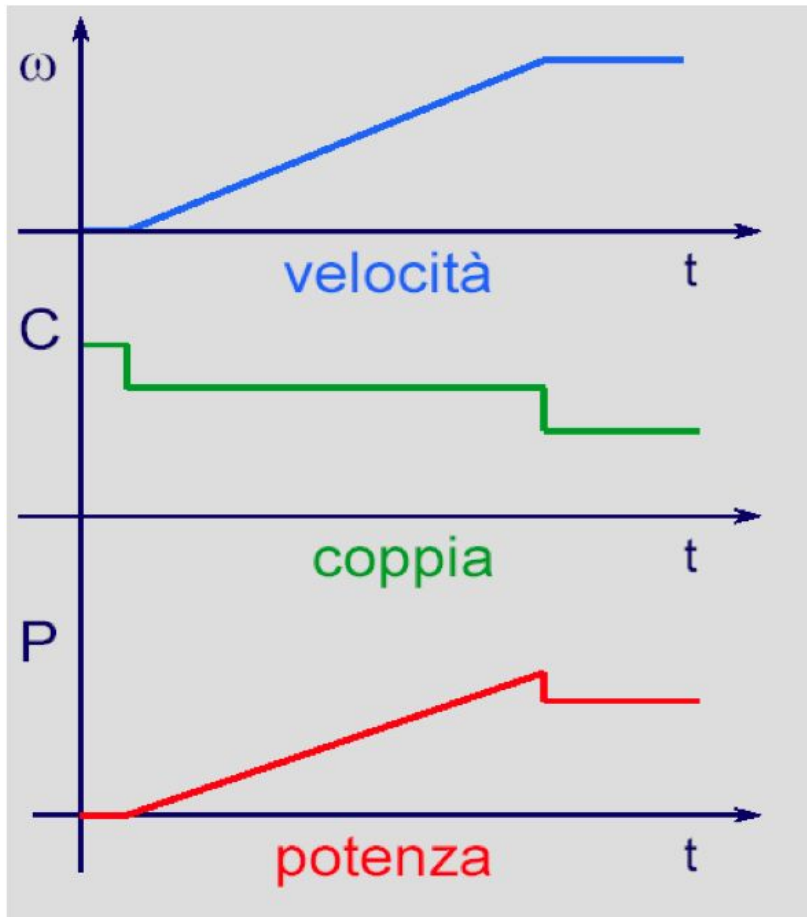


“accelerazione”

derivata di ordine 2

# Profili per moti uniformi o ciclici

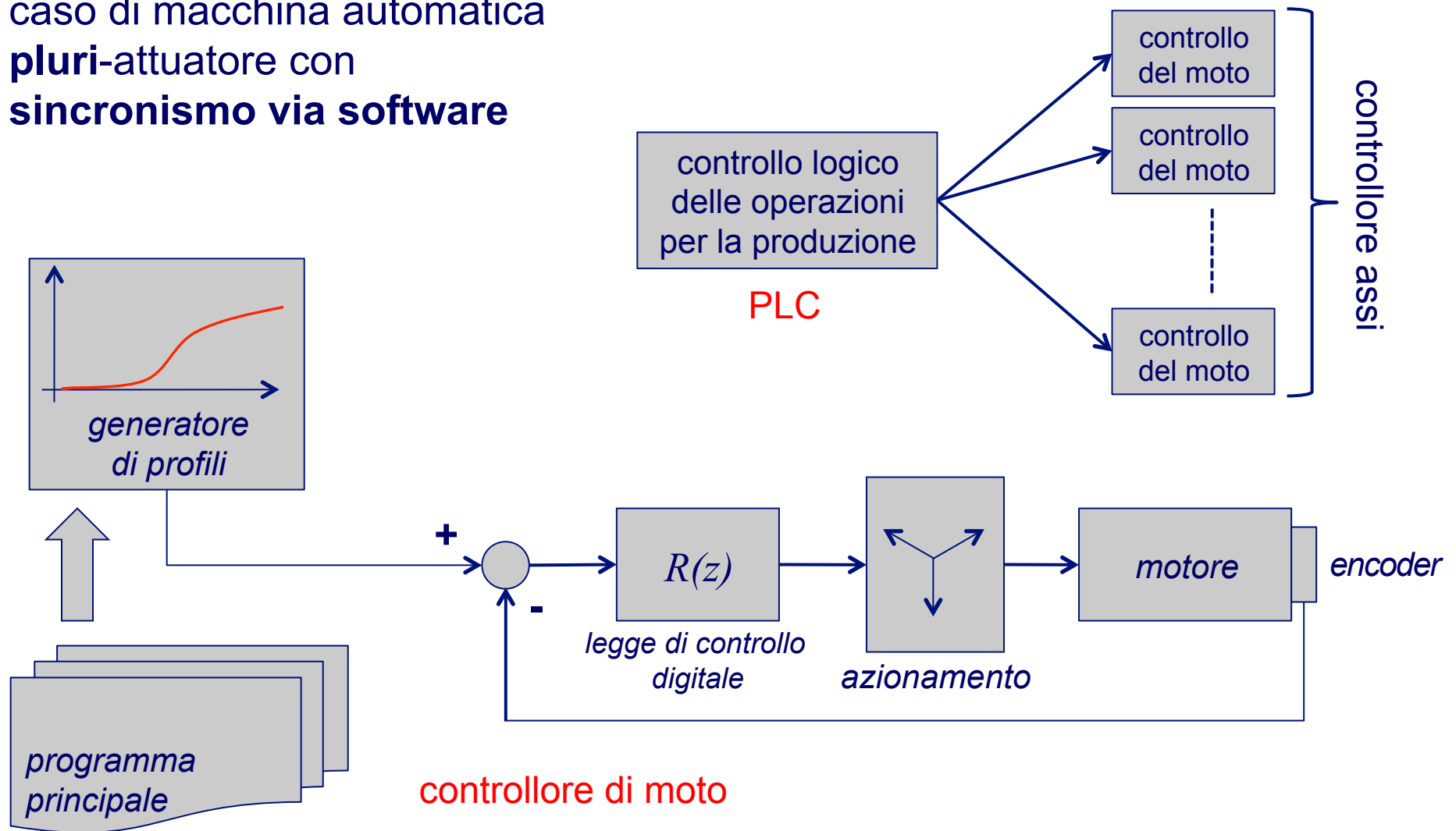
- moto **uniforme**, ad es. rampa di velocità da fermo a velocità costante di regime
- moto **ciclico**, ad es. profilo “a doppia esse” (ritorna alla posizione iniziale)



sono mostrate qui due possibili leggi orarie (**nel tempo**)

# Controllo assi di una macchina automatica

- caso di macchina automatica **pluri-attuatore** con **sincronismo via software**





## Principali produttori

- ❑ [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com)
- ❑ [www.automation.siemens.com](http://www.automation.siemens.com)
- ❑ [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com)
- ❑ [www.controltechniques.com](http://www.controltechniques.com) (Emerson)
- ❑ [www.br-automation.com](http://www.br-automation.com)

## Sezioni 5.1-5.4



### TITOLO

**Sistemi di automazione industriale  
Architetture e controllo**

### AUTORI

Claudio Bonivento  
Luca Gentili  
Andrea Paoli

### EDITORE

McGraw-Hill