

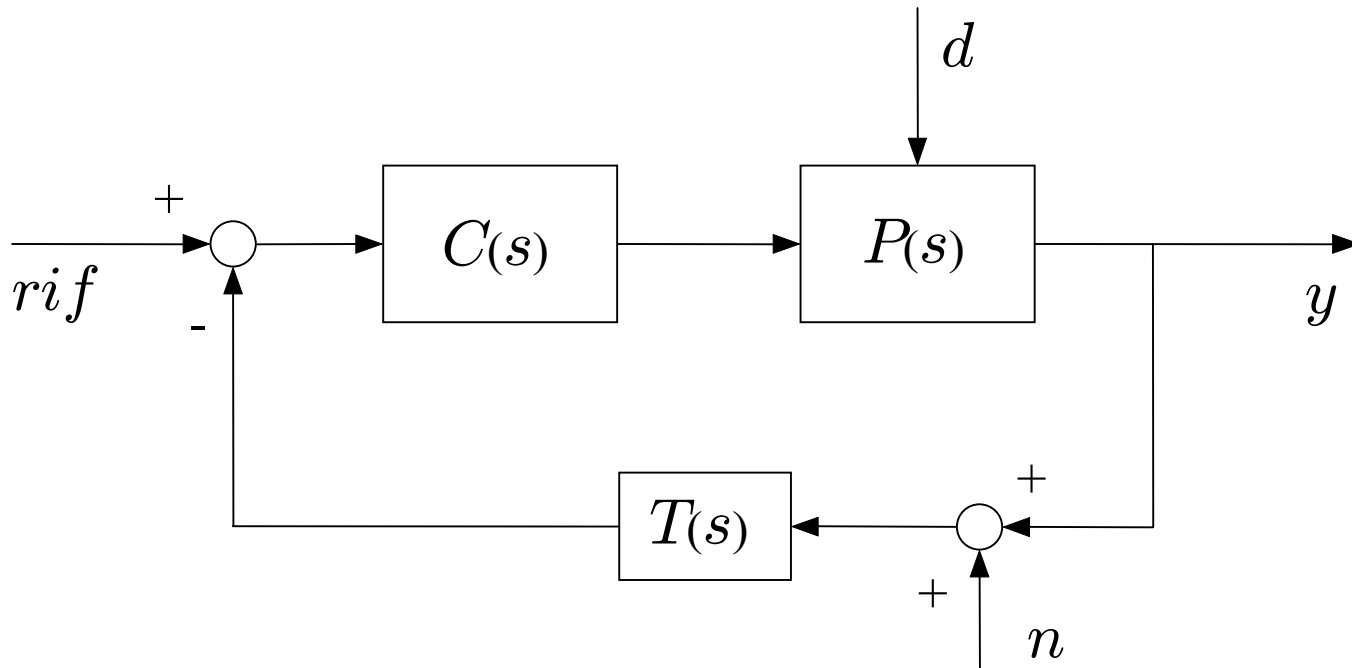
Controllo di motori in corrente continua

A cura di:

Ing. Massimo Cefalo

Ing. Fabio Zonfrilli

Sistema di Controllo



$C(s)$ *Controllore*

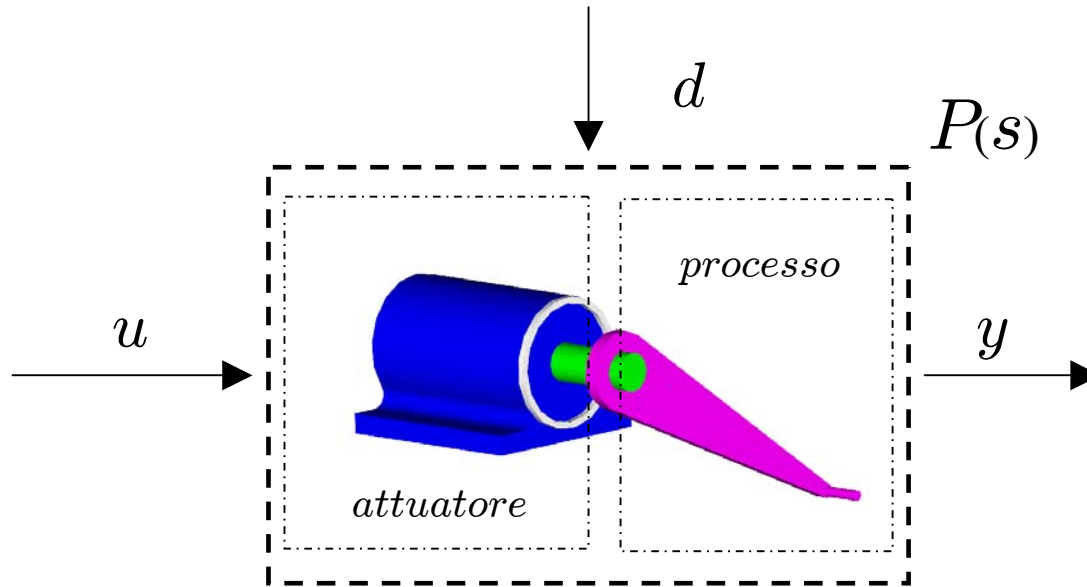
$P(s)$ *Sistema*

$T(s)$ *Trasduttore*

d *Disturbo*

n *Rumore*

Processo e Attuatore



d disturbo, può rappresentare dinamiche non modellate, fenomeni di attrito, ingressi non manipolabili, etc.

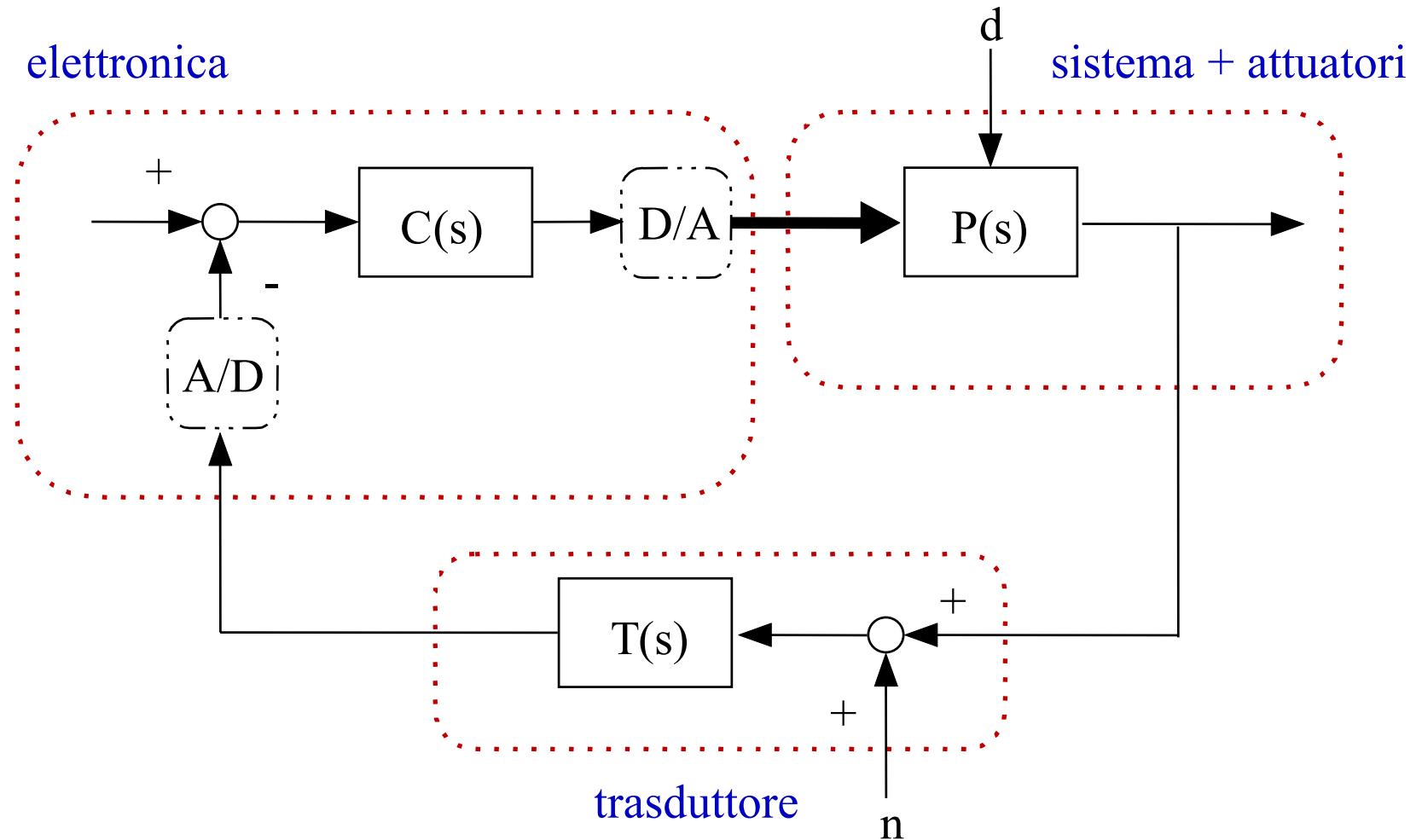
Attuatori più comuni

- **Elettrici:** Semplici da pilotare, ampia gamma di potenze, risposta molto veloce, efficienti ad elevate velocità
- **Idraulici e Pneumatici:** Silenziosi, di solito per medie e alte potenze, velocità di funzionamento bassa

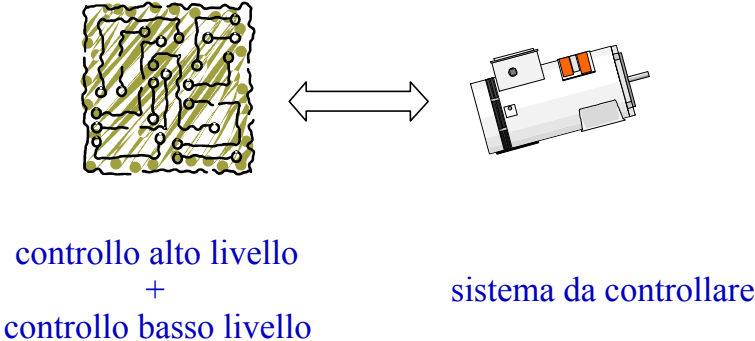
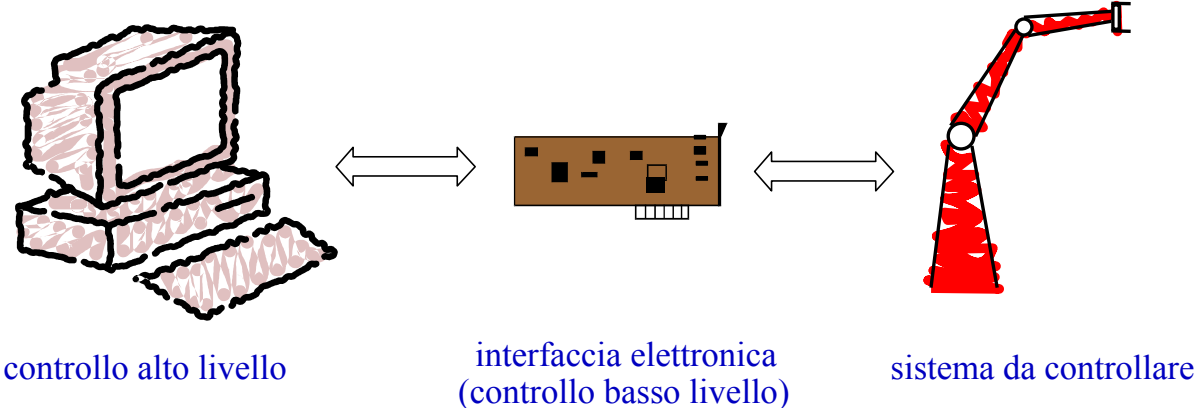
Alcune tipologie di motori elettrici

- **Motore DC con collettore (Brush Motor):** Molto comune, economico, semplice da usare, problema: consumo spazzole, disturbi elettromagnetici
- **Motore DC Brushless:** Silenzioso, affidabile, robusto, necessita di elettronica di controllo più complicata
- **Motore Passo-Passo (Stepper Motor):** Ottimo per compiti di posizionamento, più costoso, coppia non costante, elettronica di controllo complicata, di solito si usa per basse potenze

Struttura del sistema di controllo dal punto di vista fisico

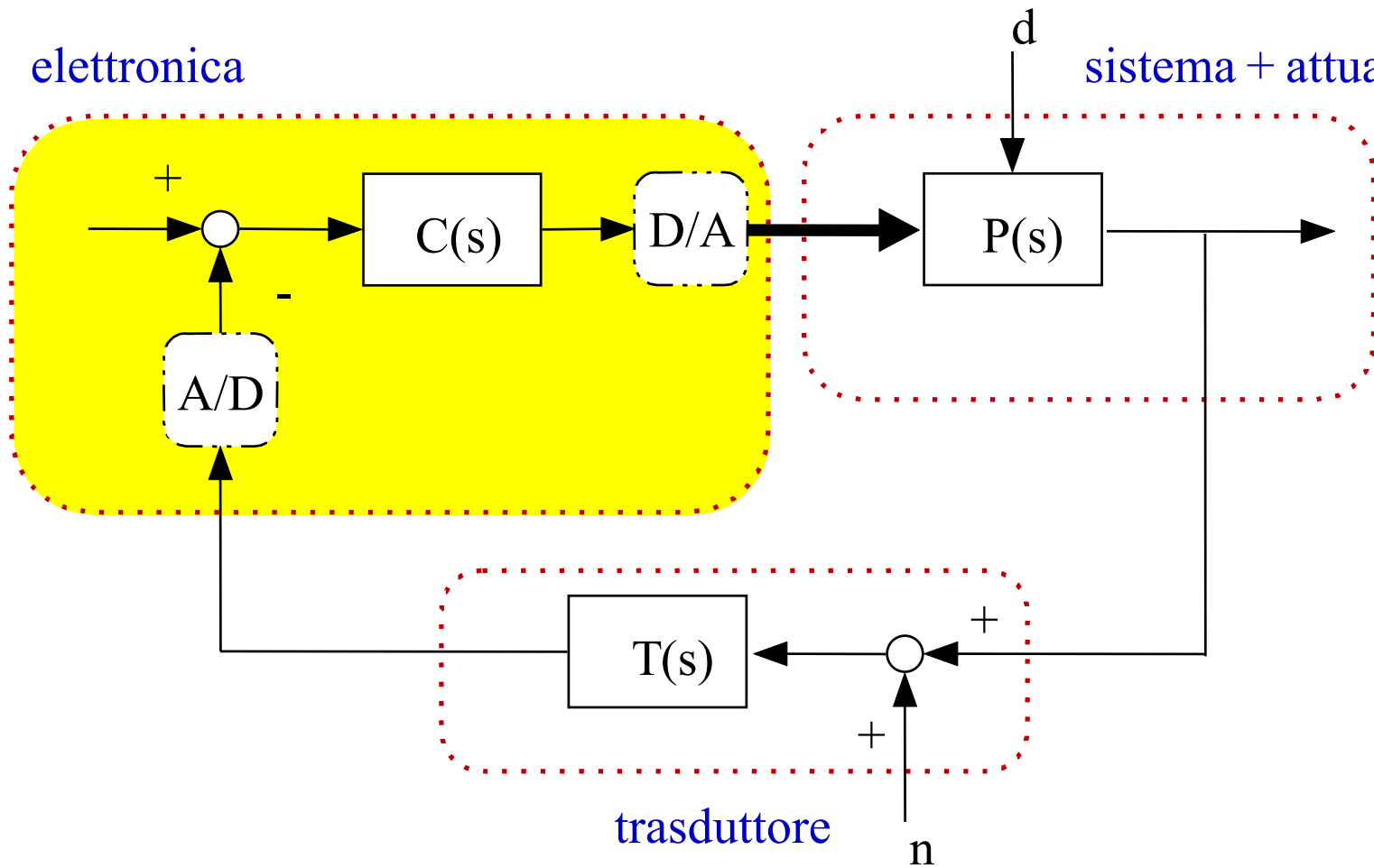


L'elettronica può interfacciarsi con un PC o essere stand-alone



elettronica

sistema + attuatori

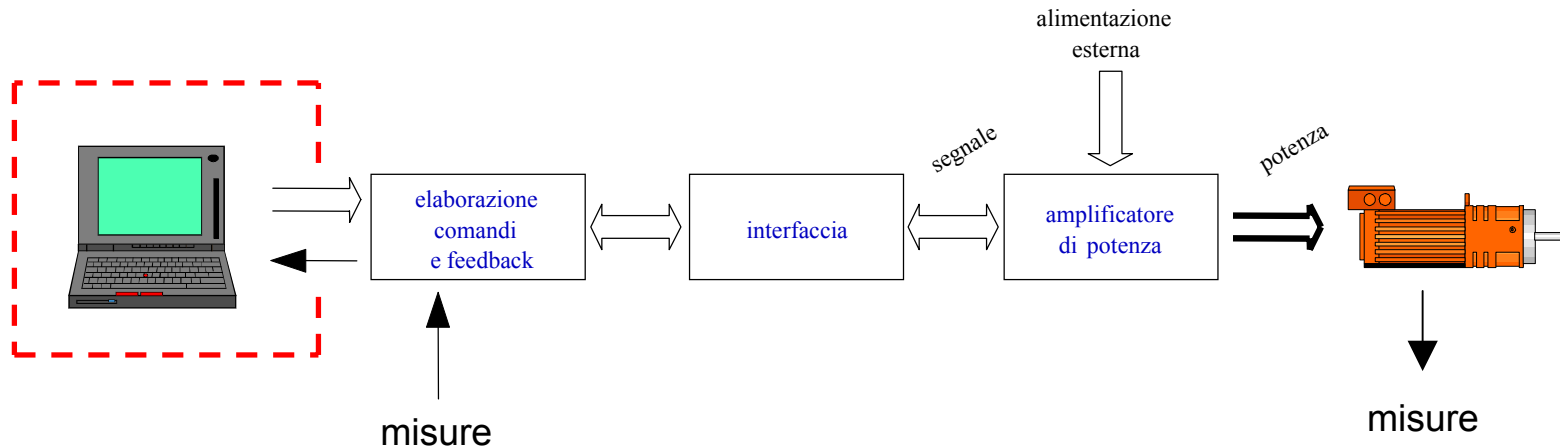


Composizione strutturale della scheda di controllo

Ad esempio con μ -controllori
(simili a μ -processori)
e.g. PIC della Microchip

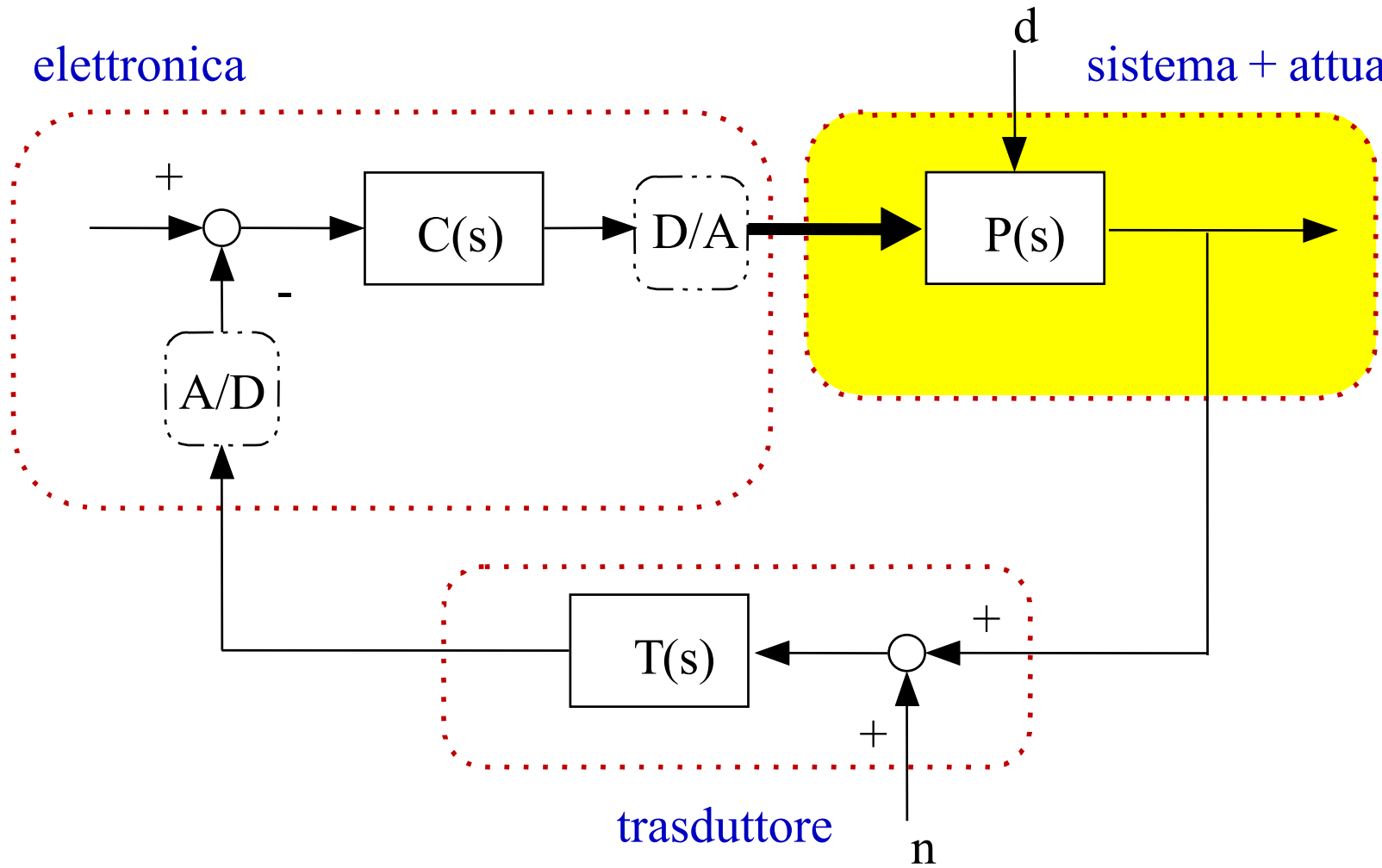
Componentistica elettronica
(spesso nota sotto
il nome di driver)

Realizzato a transistor
(componenti discreti
o integrati)

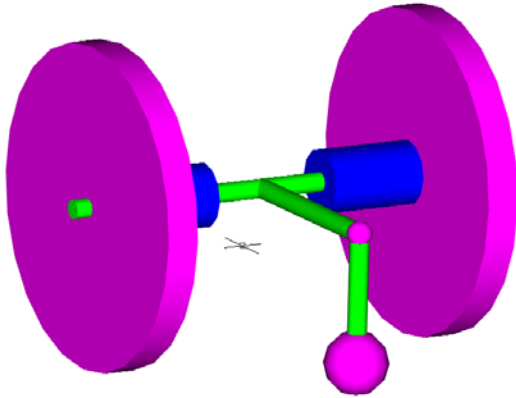


elettronica

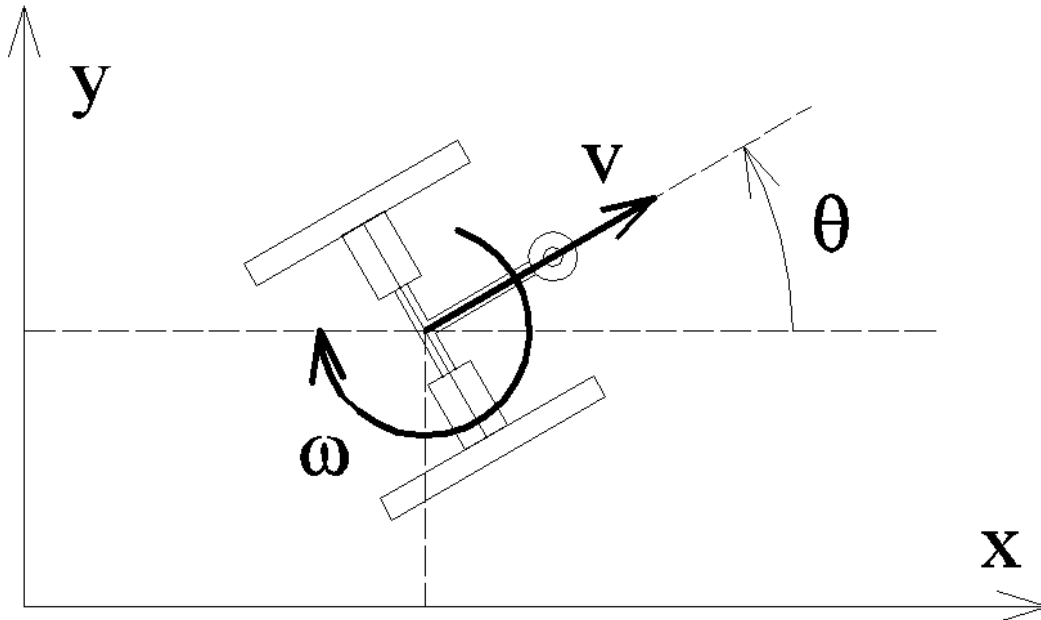
sistema + attuatori



Robot Mobile



- Due ruote attuate separatamente da due motori
- “Castor” frontale per mantenere l’equilibrio

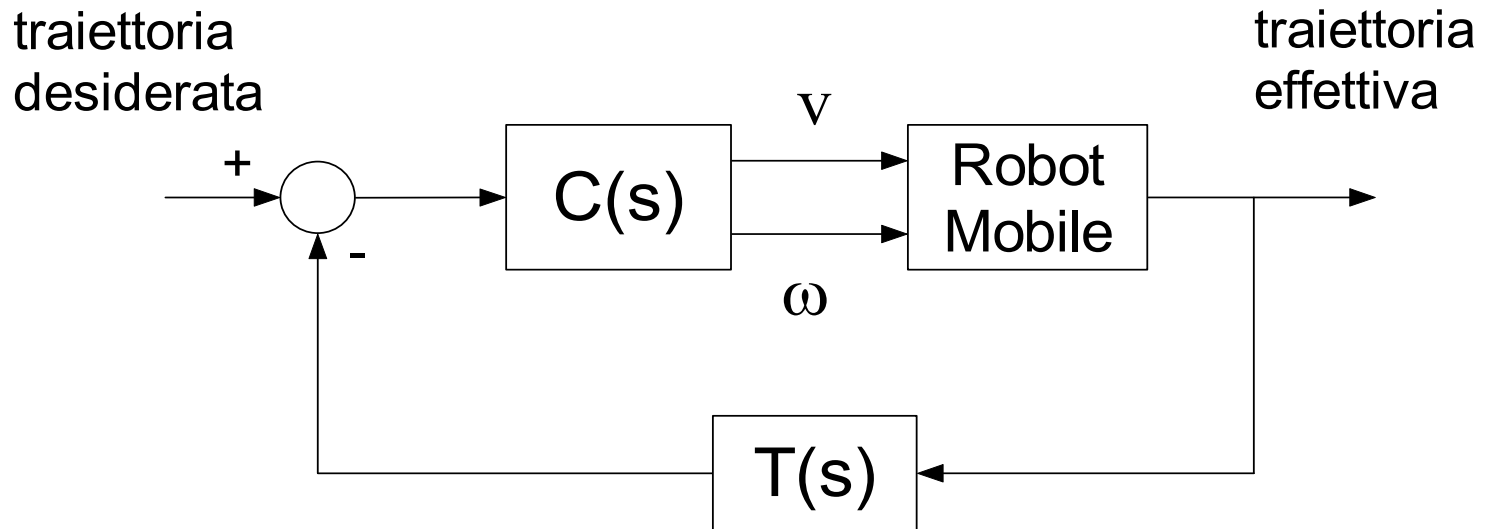


$$\dot{x} = v \cdot \cos(\theta)$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin(\theta)$$

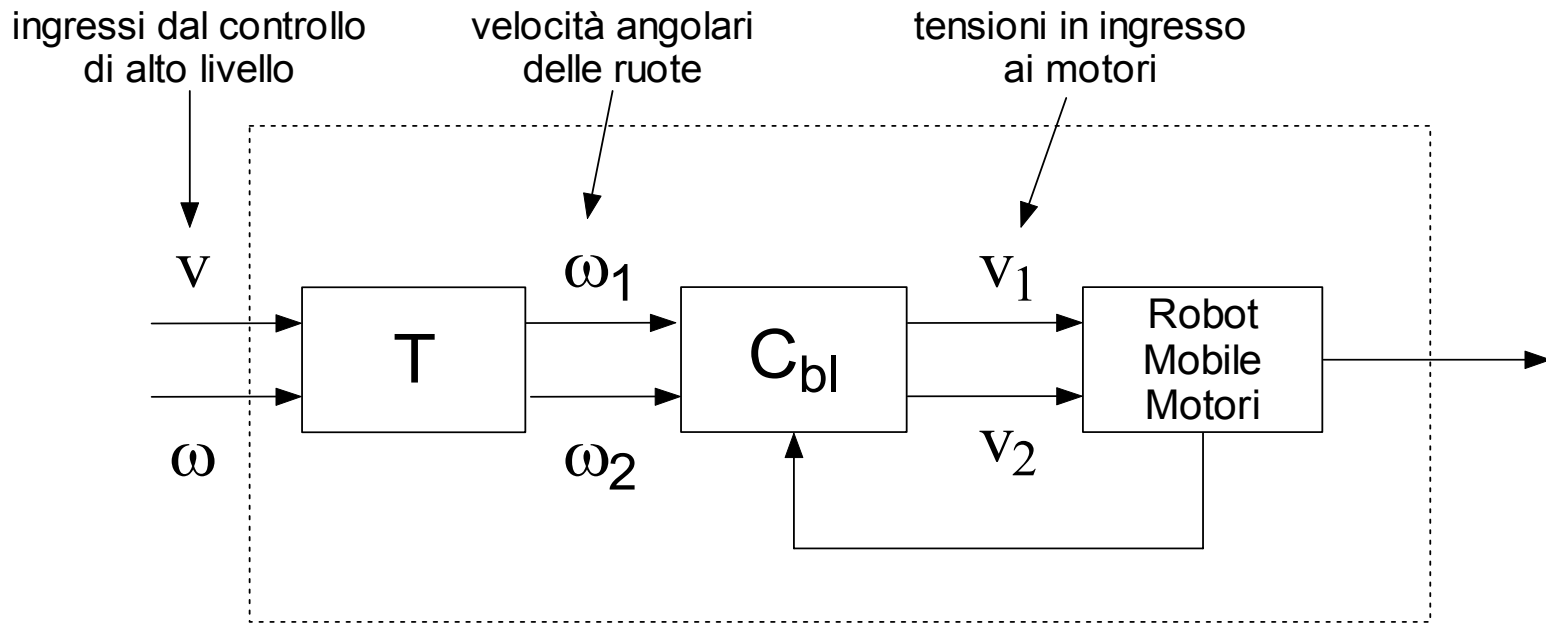
$$\dot{\theta} = \omega$$

Robot Mobile: Controllo ad alto livello



- Il controllo di alto livello agisce sulla traiettoria che il robot esegue
- Le variabili di controllo sulle quali agisce sono ω e v

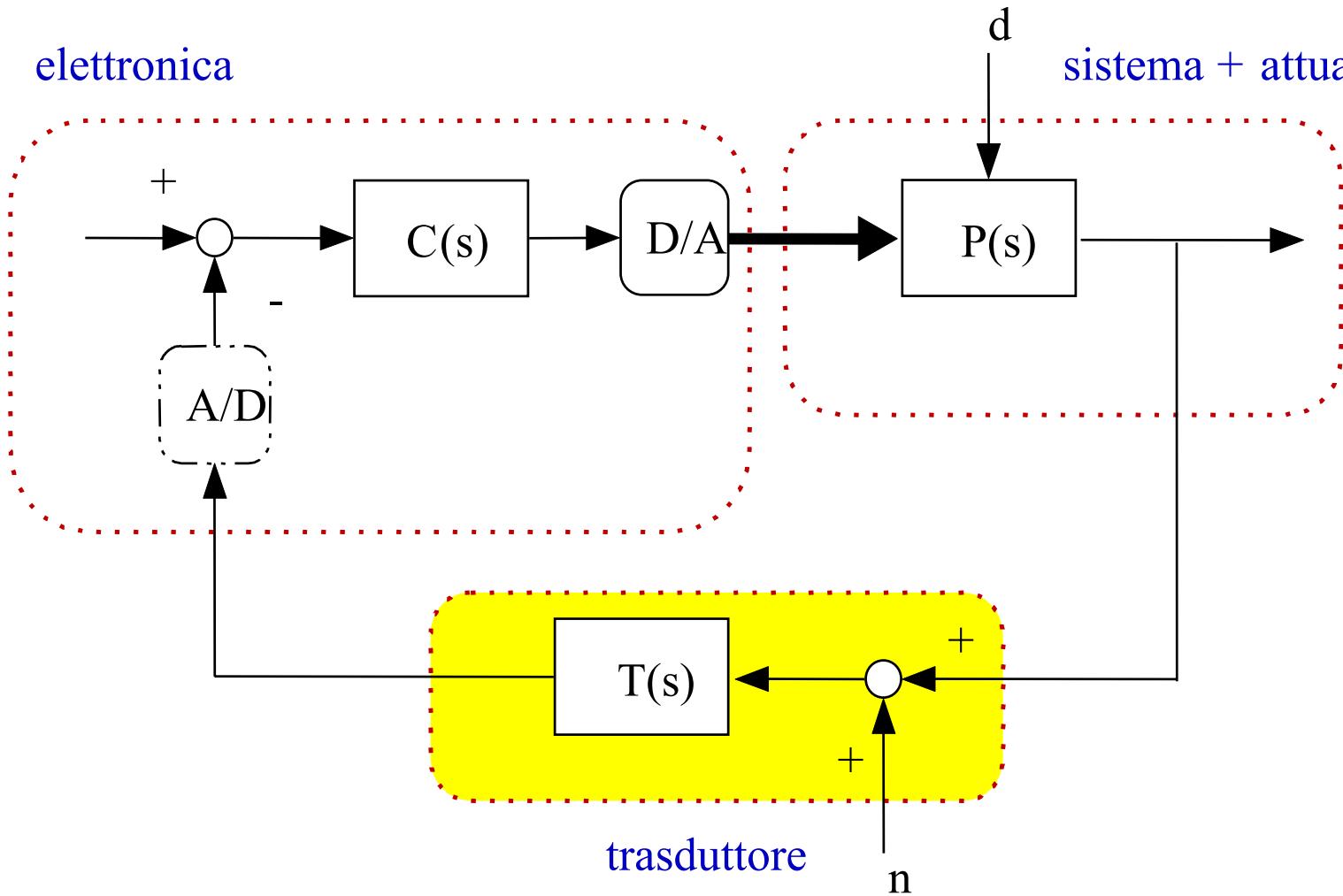
Robot Mobile: Controllo a basso livello



- Il controllore di basso livello gestisce tutte le dinamiche che non sono state esplicitamente prese in considerazione ad alto livello

elettronica

sistema + attuatori

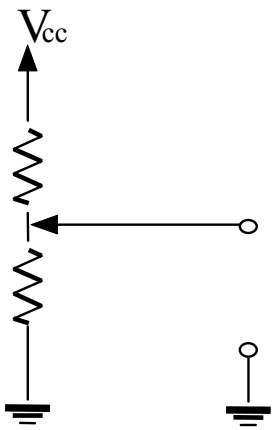


Trasduttori cinetici usati nel controllo d'asse

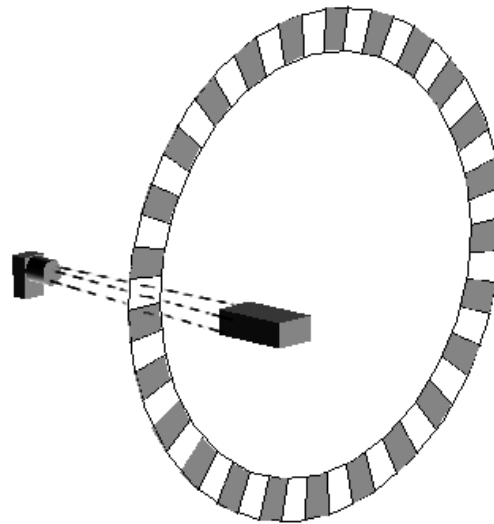
- di posizione { Encoder incrementale
Encoder assoluto
Potenziometro
Resolver

- di velocità { Dinamo
tachimetrica

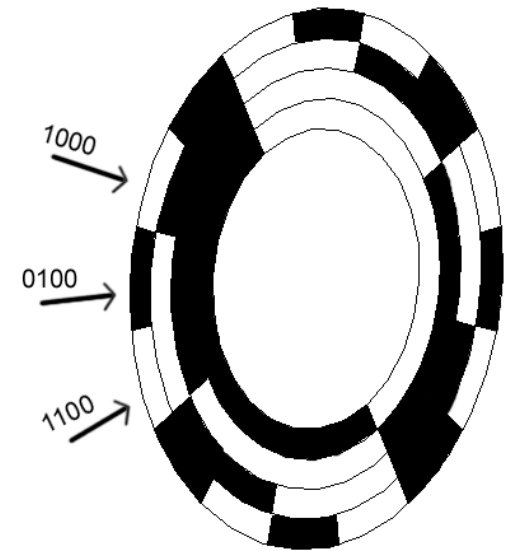
Esempio trasduttori di posizione:



potenziometro (analogico)

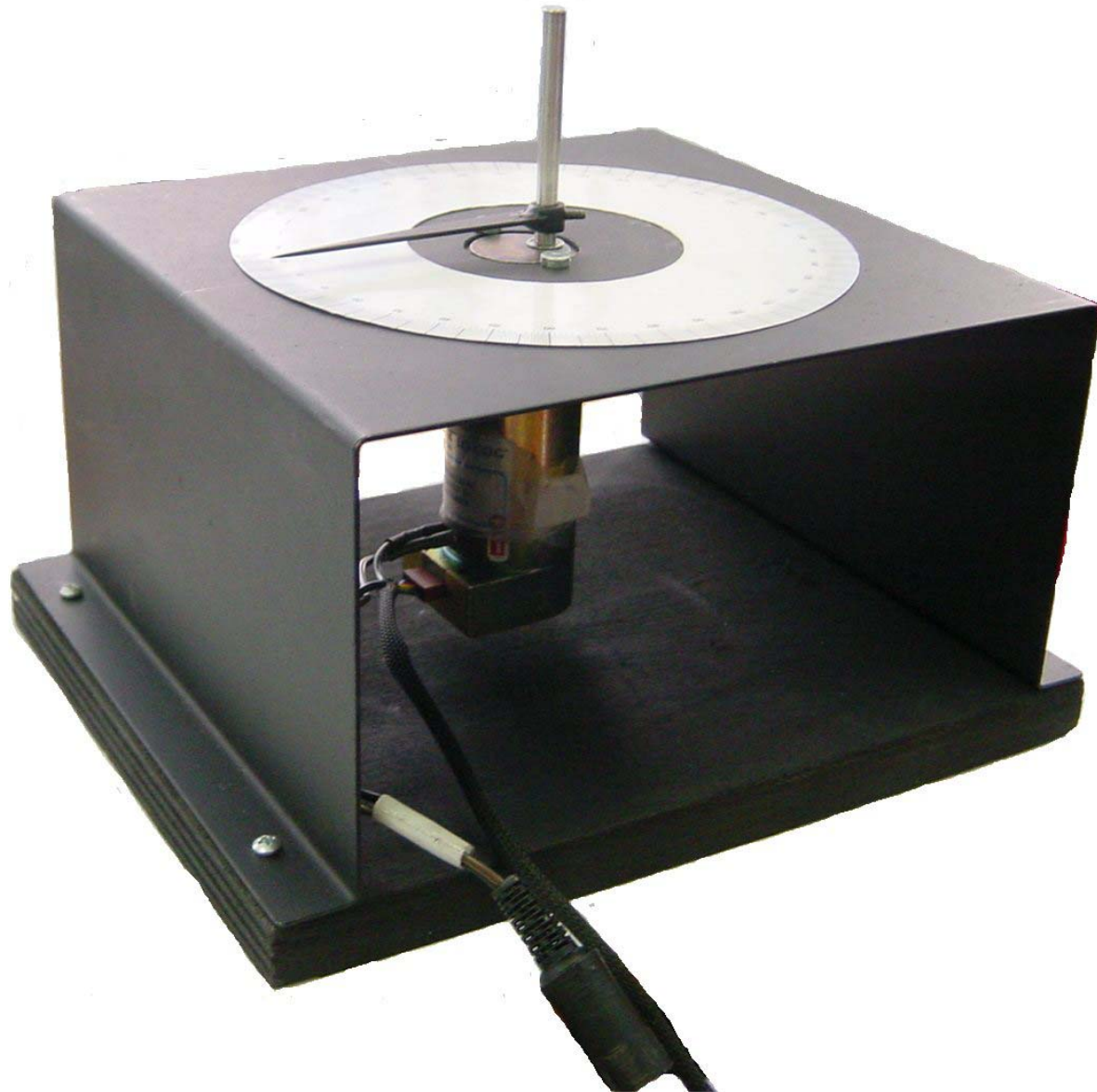


encoder incrementale(digitale)



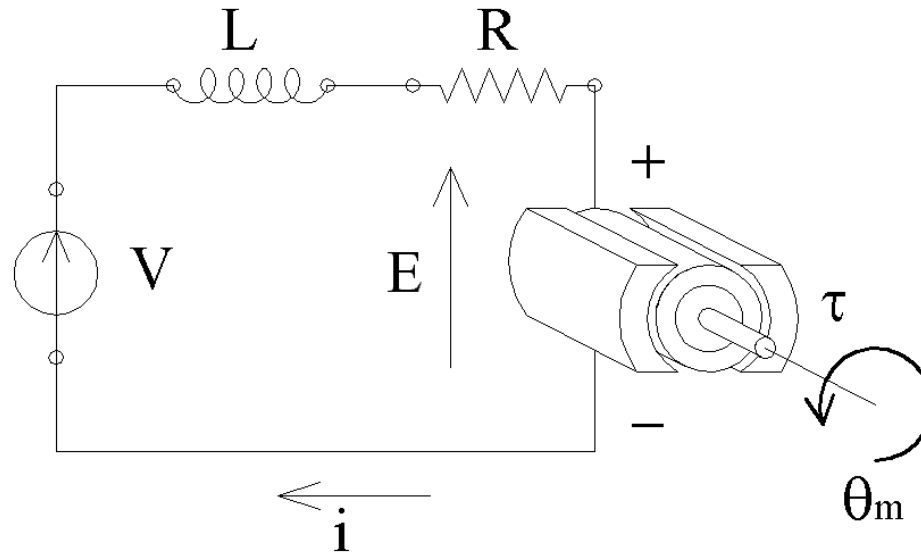
encoder assoluto(digitale)

Motore con lancetta



Circuito elettrico equivalente di un motore CC a magneti permanenti

Dal punto di vista elettrico, il motore può essere assimilato al seguente circuito



$$E(t) = K_e \cdot \dot{\theta}_m(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$$

$$V(t) = E(t) + R \cdot I(t) + L \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

K_e costante di velocità

R resistenza d'armatura

L induttanza d'armatura

Circuito elettrico equivalente di un motore CC

Trasformando nel dominio di Laplace e ipotizzando $I(0)=0$ si ottiene

$$V(s) = K_e \cdot \omega_m(s) + (R + L \cdot s) \cdot I(s)$$

per un motore in corrente continua possiamo inoltre sempre scrivere

$$\tau = K_t \cdot I(t)$$

dove K_t è la costante di coppia del motore

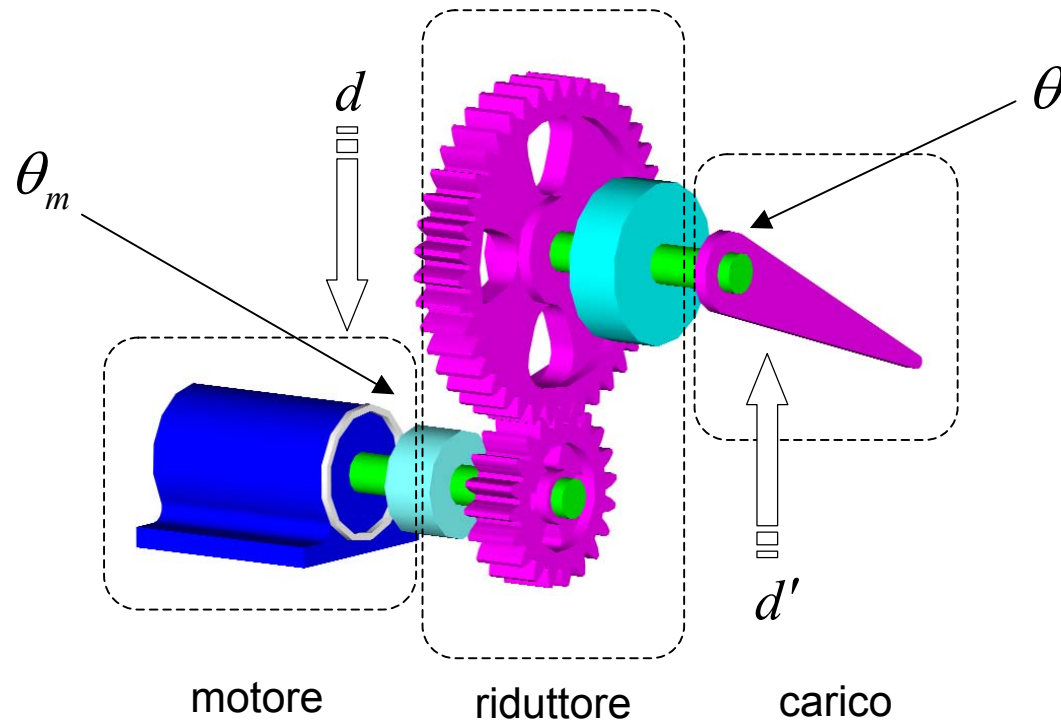
Dinamica del motore e del carico

La parte meccanica del motore può essere così modellata:

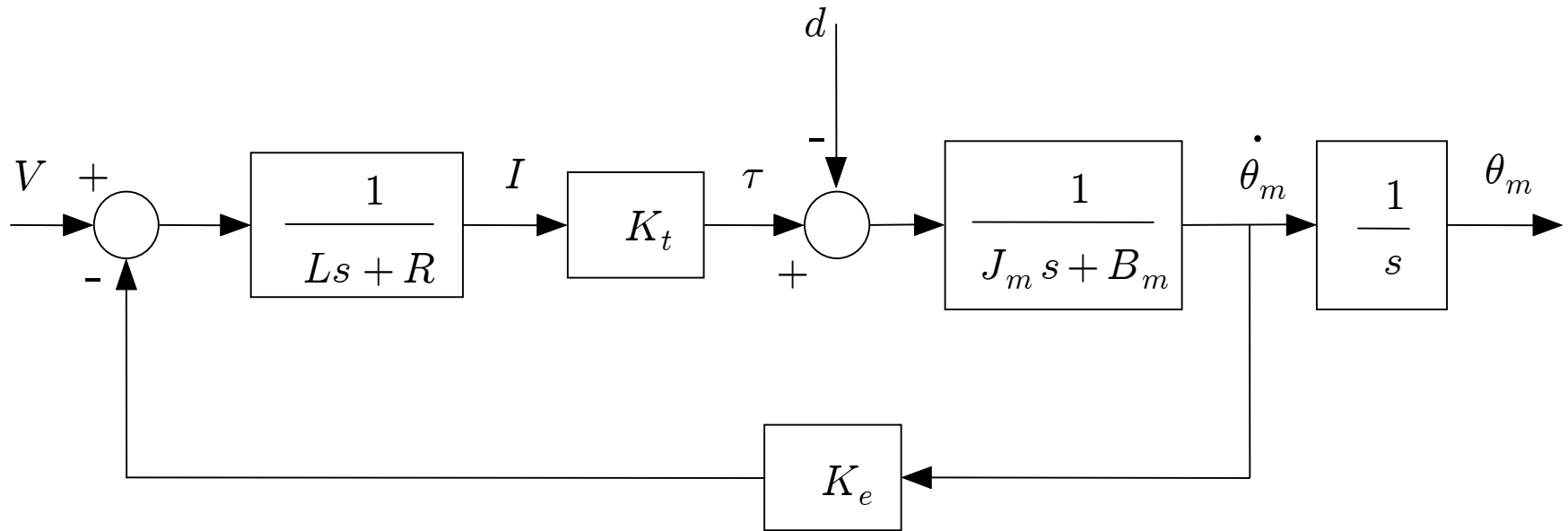
$$\tau = J_m \cdot \ddot{\theta}_m + B_m \cdot \dot{\theta}_m + d + \tau_c$$

Un'equazione analoga descrive la dinamica di un carico:

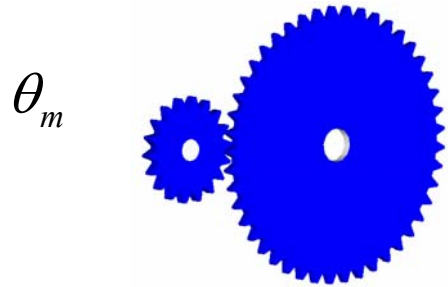
$$\tau' = J_c \cdot \ddot{\theta} + B_c \cdot \dot{\theta} + d'$$



Schema a blocchi del motore senza riduttore e senza carico



Dinamica del motore e del carico



$$\theta = \frac{1}{n} \cdot \theta_m$$

$$\theta = \frac{\theta_m}{n} \implies \dot{\theta} = \frac{\dot{\theta}_m}{n} \implies \ddot{\theta} = \frac{\ddot{\theta}_m}{n}$$

Rapporto di riduzione $\frac{1}{n}$

Imponendo $\xi \cdot \tau_c \cdot \dot{\theta}_m = \tau' \cdot \dot{\theta}$

$$\implies \tau_c = \frac{\tau'}{n \cdot \xi}$$

per esteso: $\tau_c = J_c \cdot \frac{\ddot{\theta}_m}{n^2 \cdot \xi} + B_c \cdot \frac{\dot{\theta}_m}{n^2 \cdot \xi} + \frac{d'}{n \cdot \xi}$

Il riduttore riduce l'effetto dei disturbi agenti sul carico!

e sostituendo nell'equazione della dinamica del motore...

$$\tau = \left(J_m + \frac{J_c}{n^2 \cdot \xi} \right) \cdot \ddot{\theta}_m + \left(B_m + \frac{B_c}{n^2 \cdot \xi} \right) \cdot \dot{\theta}_m + \frac{d'}{n \cdot \xi} + d$$

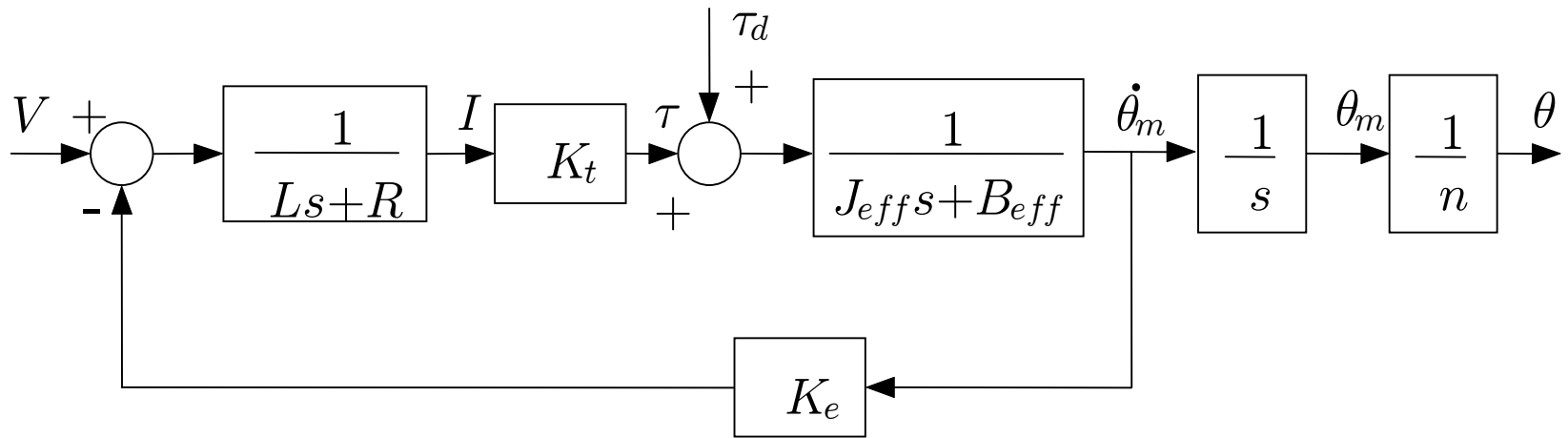
ovvero

$$\tau = J_{eff} \cdot \ddot{\theta}_m + B_{eff} \cdot \dot{\theta}_m - \tau_d$$

dove

$$-\tau_d = \frac{d'}{n \cdot \xi} + d$$

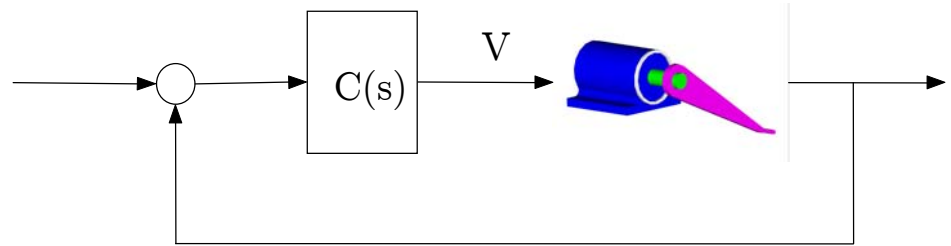
Schema a blocchi del motore con riduttore e carico



Due scelte possibili

Controllo in tensione

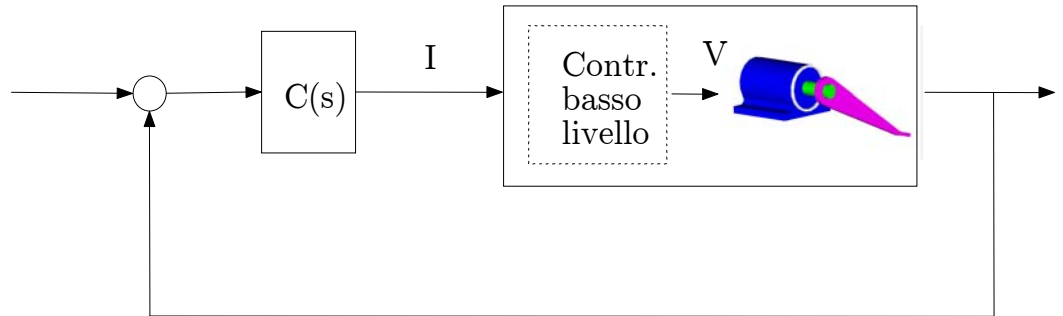
La variabile di controllo è $V(t)$



Controllo in corrente

La variabile di controllo è $I(t)$
(es. di controllo ad alto livello)

$C(s)$ più semplice (attuatore $\tau=K_t I(t)$)



Metodi di Controllo

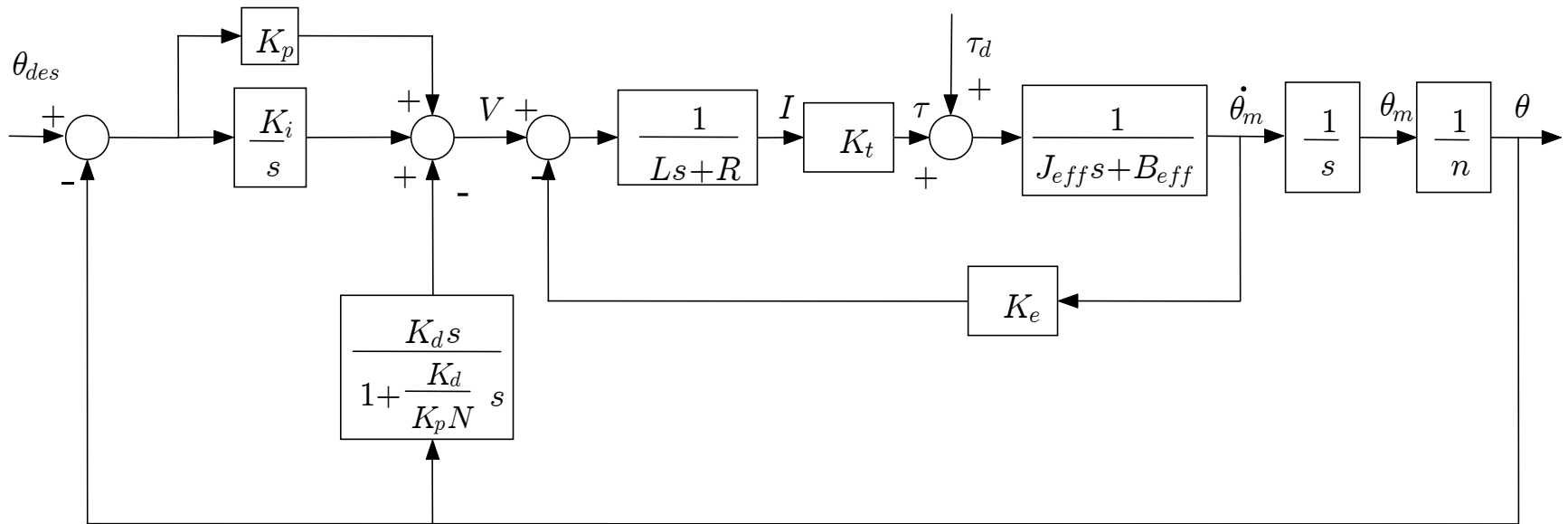
Per la sintesi del controllore si possono utilizzare i metodi noti:

- Sintesi per tentativi
- Luogo delle radici
- Metodi diretti
- Assegnazione autovalori + osservatore asintotico

Esempio di specifiche per il controllore

- Errore a regime permanente nullo per ingressi a gradino
- Tempo di salita $t_s \leq 0.3$ sec
- Sovraelongazione $s \leq 5\%$
- Astatismo rispetto a disturbi costanti nel ramo diretto

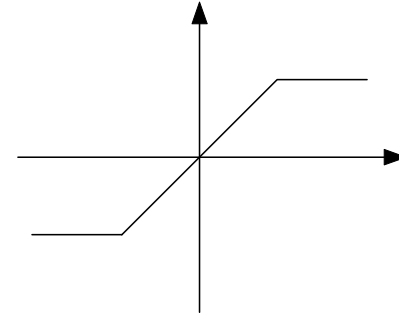
Schema di controllo ideale (esempio con PID)



Non linearità tipiche

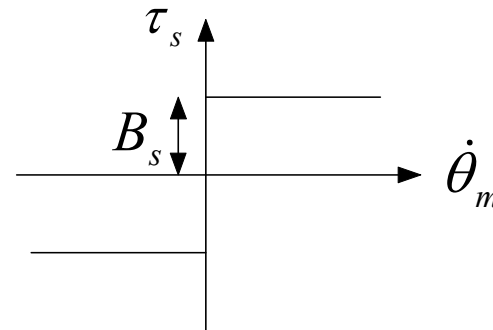
Saturazione

(ad esempio presenza di un limitatore di corrente)



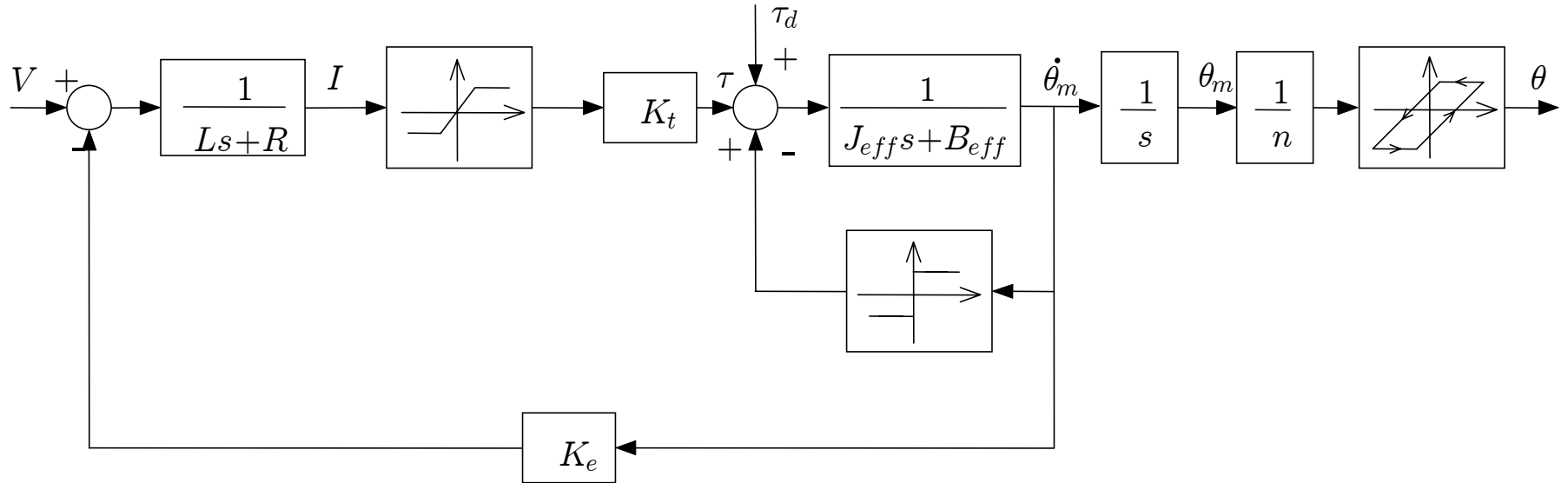
Attrito secco

$$\tau_s = B_s \text{sign}(\dot{\theta}_m)$$

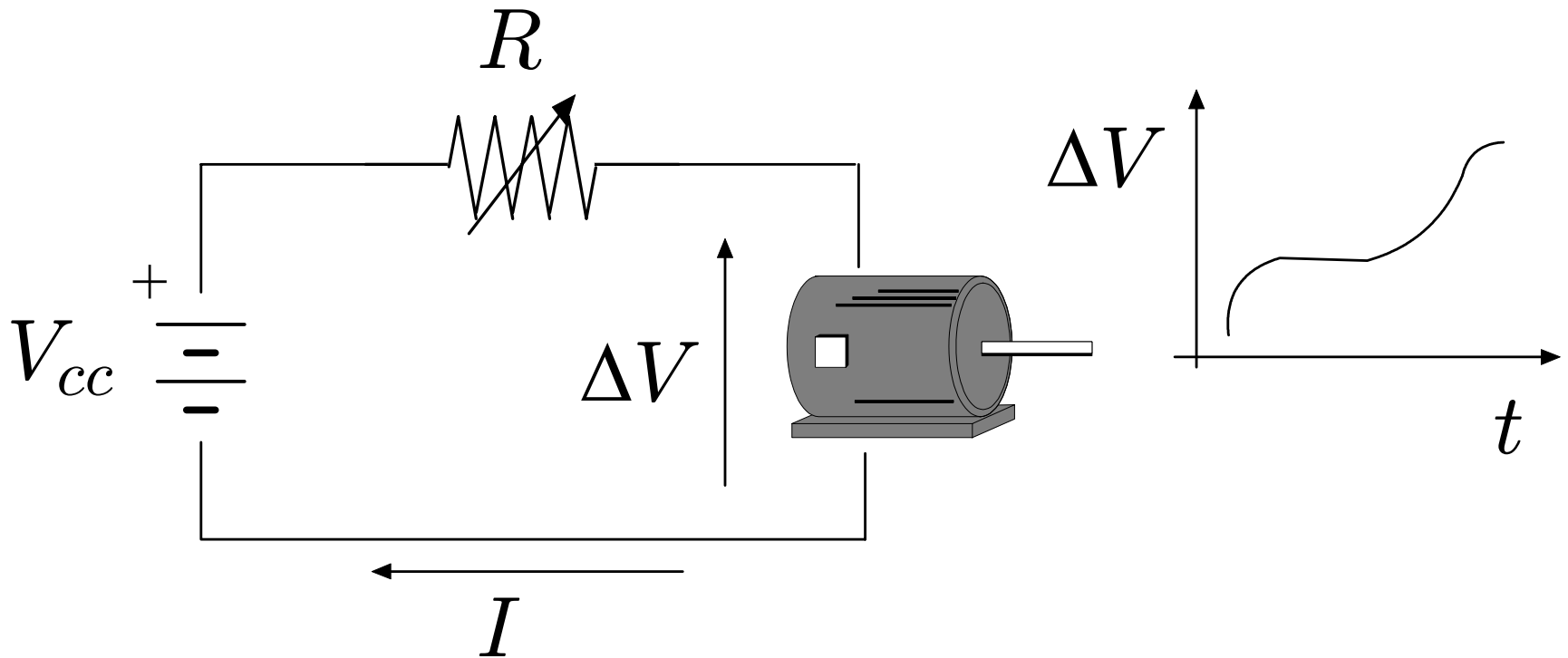


Isteresi del riduttore (eventuale gioco tra ingranaggi)

Modello simulativo più realistico (+ isteresi, + saturazione, + attrito secco)

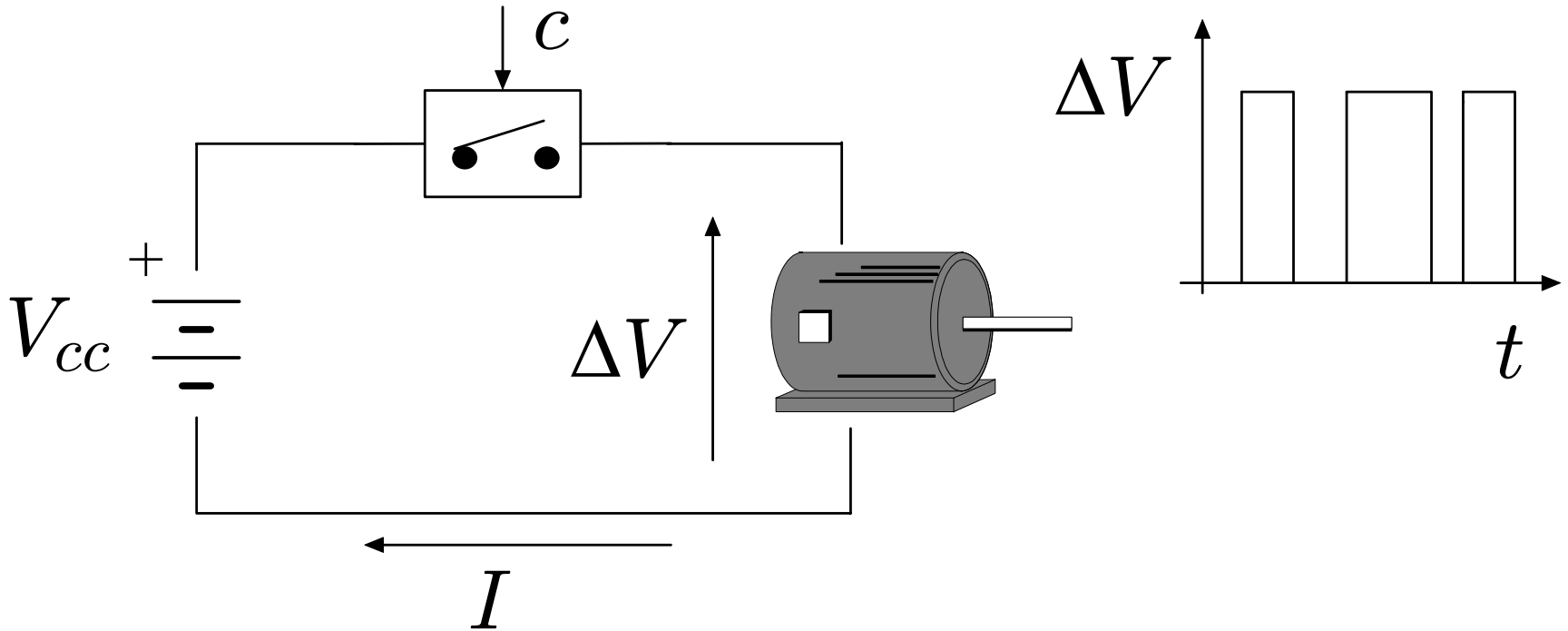


Pilotaggio Analogico Motori DC



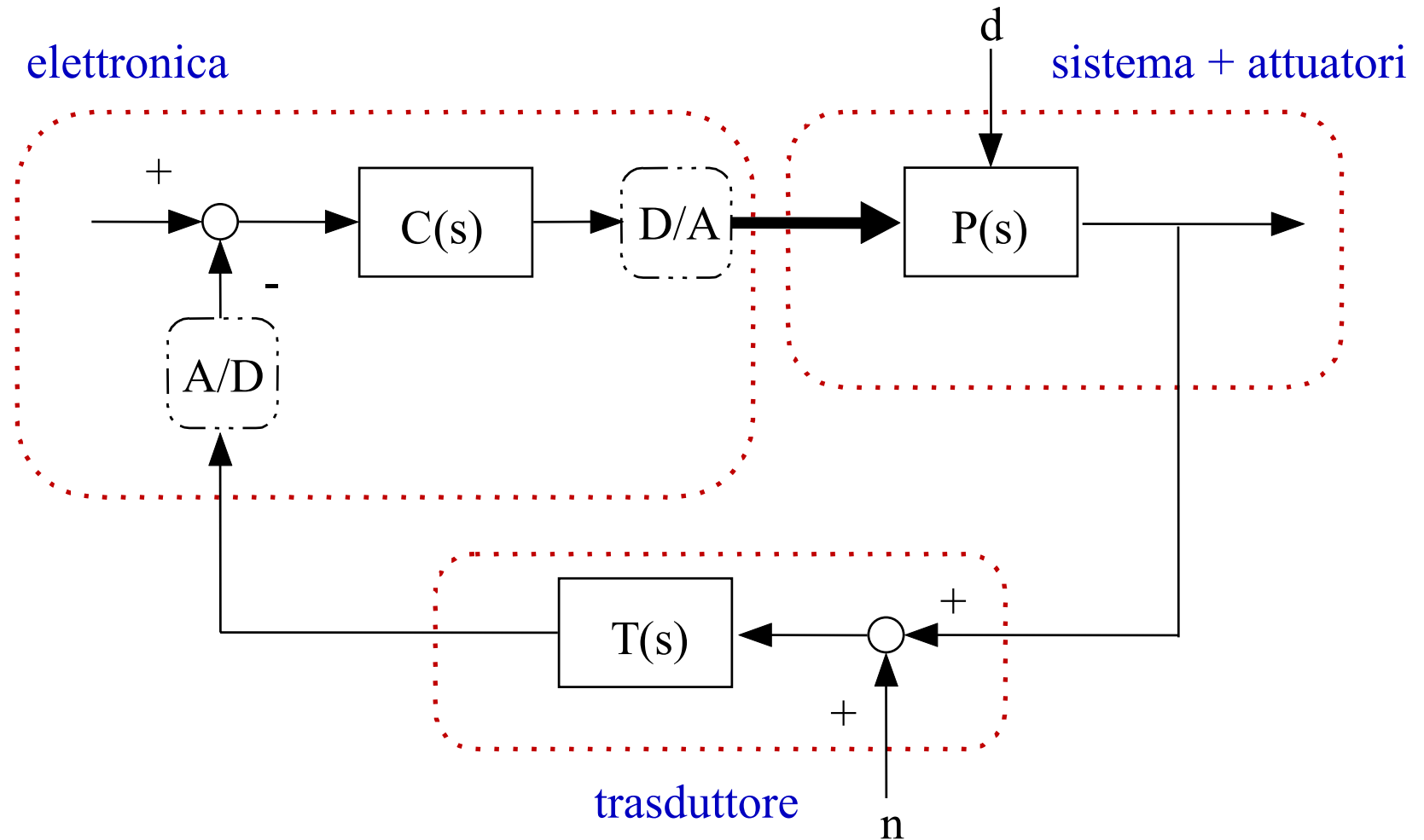
- ΔV applicata al motore varia con continuità in modo "dolce"
- Bassa efficienza a causa della elevata potenza dissipata nella resistenza o nel transistor pilota

Pilotaggio PWM Motori DC

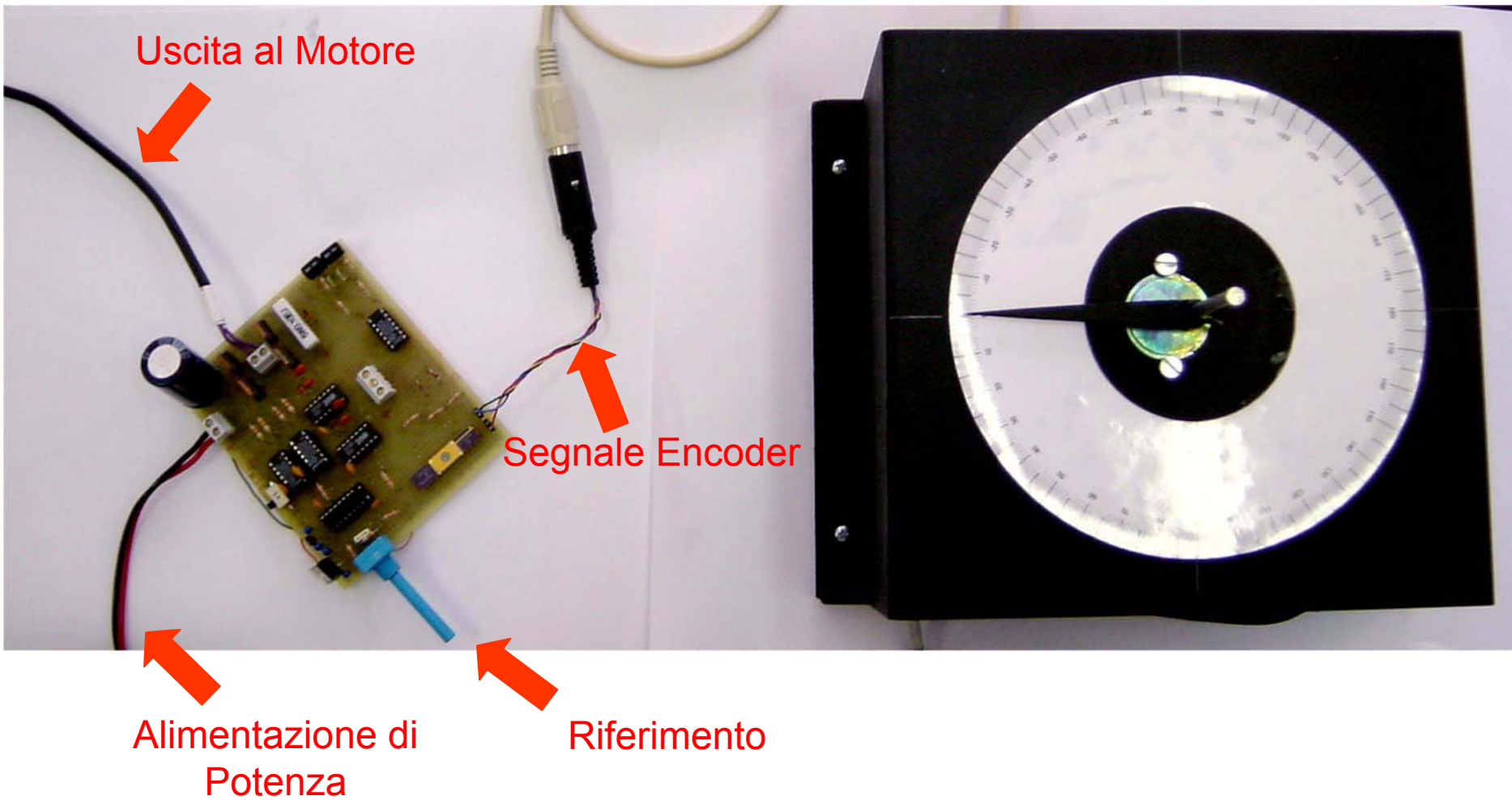


- Alta efficienza, la potenza è trasferita quasi interamente al motore
- Facilità di realizzazione tramite elettronica digitale
- Problemi di emissioni elettromagnetiche

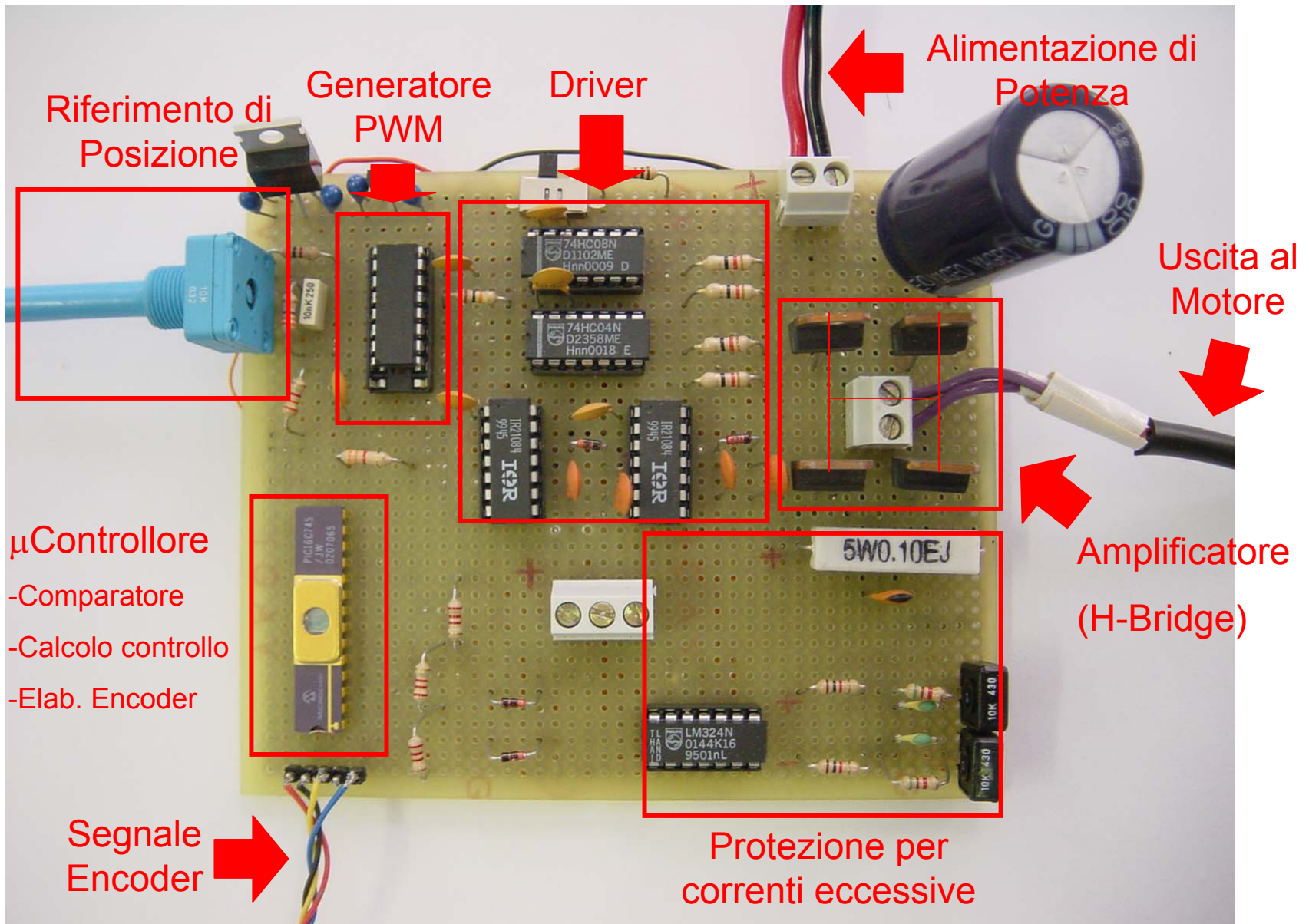
Struttura del sistema di controllo dal punto di vista fisico



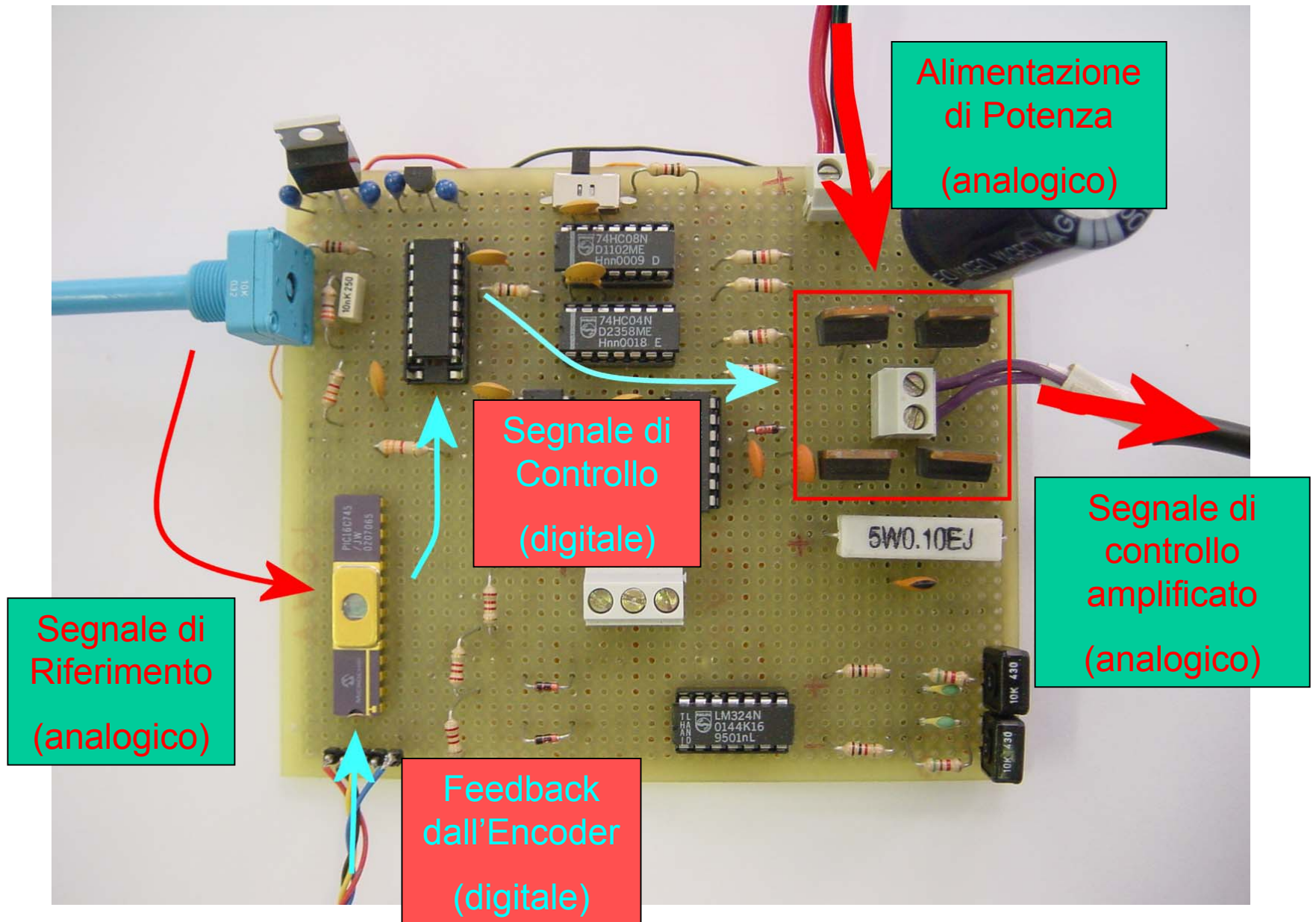
Motore con lancetta



Scheda di controllo



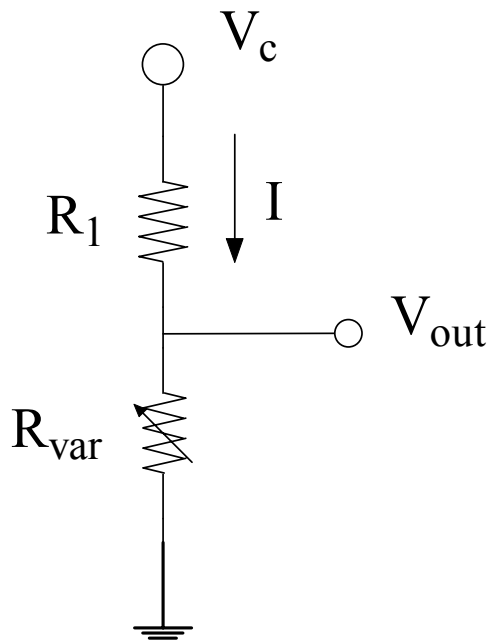
Scheda di controllo



Segnale di Riferimento



Potenziometro: resistenza variabile da 0 al valore di fondo scala



$$I = \frac{V_c}{R_1 + R_{\text{var}}}$$

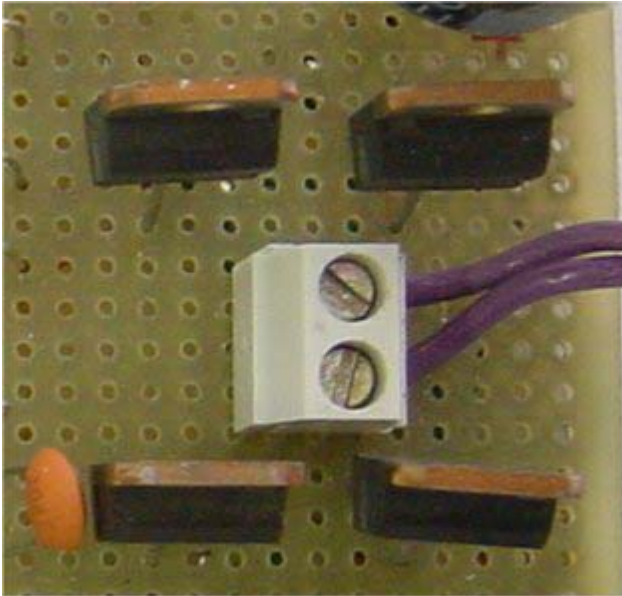
$$V_{\text{out}} = IR_{\text{var}} = \frac{V_c}{R_1 + R_{\text{var}}} R_{\text{var}}$$

PIC: Peripheral Interface Control



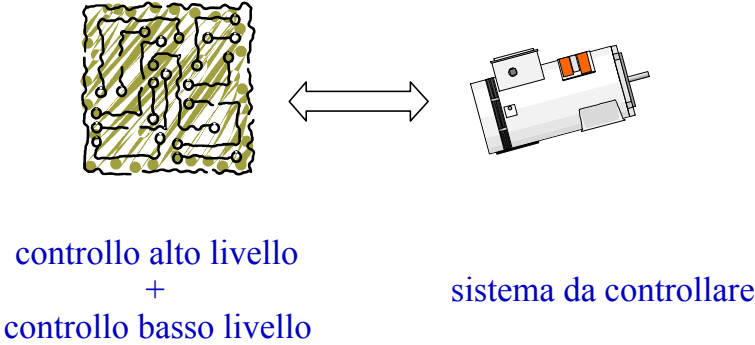
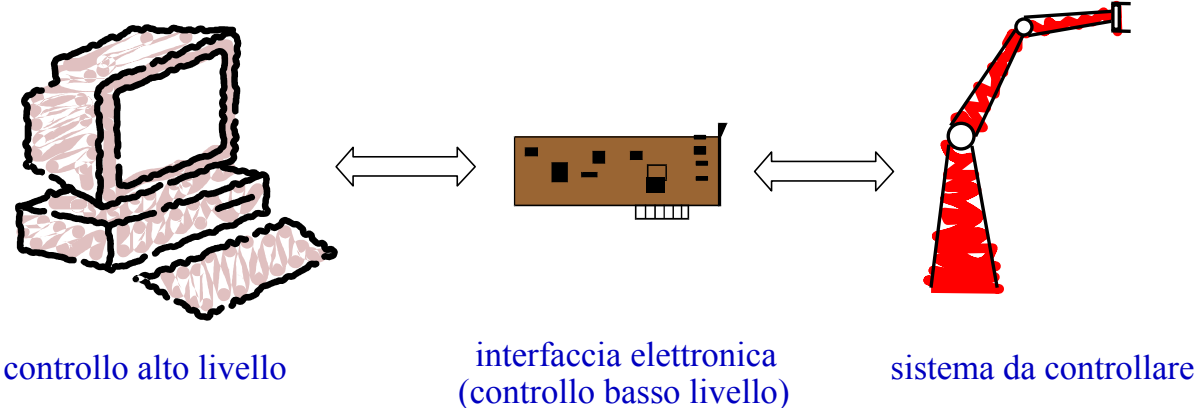
- Famiglia di microcontrollori prodotti dalla Microchip
- Integrano al loro interno un microprocessore, una memoria ROM e una RAM, delle interfacce I/O, e spesso alcune periferiche aggiuntive (convertitori D/A, Timer, etc.)
- Il software può essere compilato su un PC e poi scaricato nella memoria del PIC con dei semplici programmatori
- Il PIC nella foto (PIC16C745) lavora alla velocità di 24MHz, e dispone di una memoria di 8KByte

Amplificatore



- Formato da quattro MOSFet (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) in configurazione Ponte H
- Ogni Mosfet è un amplificatore tensione-corrente fino alla soglia di saturazione, oltre si comporta semplicemente come un circuito chiuso.
- Pilotare l'amplificatore in PWM vuol dire semplicemente alternare fasi in cui i mosfet sono spenti a fasi in cui essi sono in saturazione
- L'amplificatore funziona in maniera analogica quando ogni mosfet viene fatto lavorare nella sua zona attiva, in cui regola la corrente che scorre al suo interno in base alla tensione di controllo applicata

L'elettronica può interfacciarsi con un PC o essere stand-alone



Pendubot

Robot

Alimentazione stadio potenza

Computer + scheda controllo

