

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**  
Dipartimento di Sistemi e Informatica

Tesi di dottorato

**Controllo del regime di minimo  
per sistemi “*Torque Based*”:  
Un approccio polinomiale**

**Claudio Gambelli**

Coordinatore:  
**Prof. Edoardo Mosca**

Relatori:  
**Prof. Alessandro Casavola**  
**Ing. Andrea Balluchi**

**Firenze 2007**

# Contesto

Attività svolta in collaborazione fra:

- Dipartimento di Sistemi e Informatica dell'Università di Firenze
- Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica dell'Università della Calabria
- Azienda Magneti Marelli Powertrain S.p.A. di Bologna
- Laboratorio di ricerca P.A.R.A.D.E.S. di Roma

# Sommario

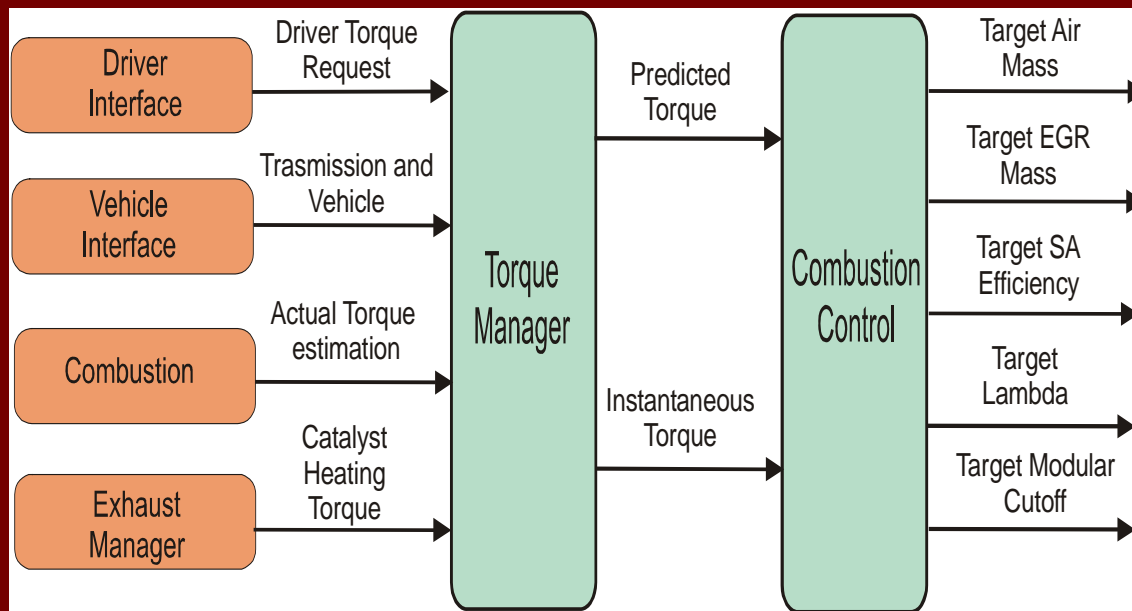
- Introduzione
- Sistemi “Torque Based”
- Modelli: Fisico, Ibrido, Virtuale
- Struttura, Sintesi e Taratura del Controllo
- Implementazione
- Prove Sperimentali
- Conclusioni

# Introduzione

- *Il Metodo:* Teoria + Applicazione
- *Il problema:* Il regime di minimo
- *Novità e Contributi:*
  - Struttura e Tecniche di controllo
  - Tecniche di implementazione
- *Ambiente di sviluppo:* Matlab, Simulink, Target Link
- *Ambiente di validazione:* Sperimentale

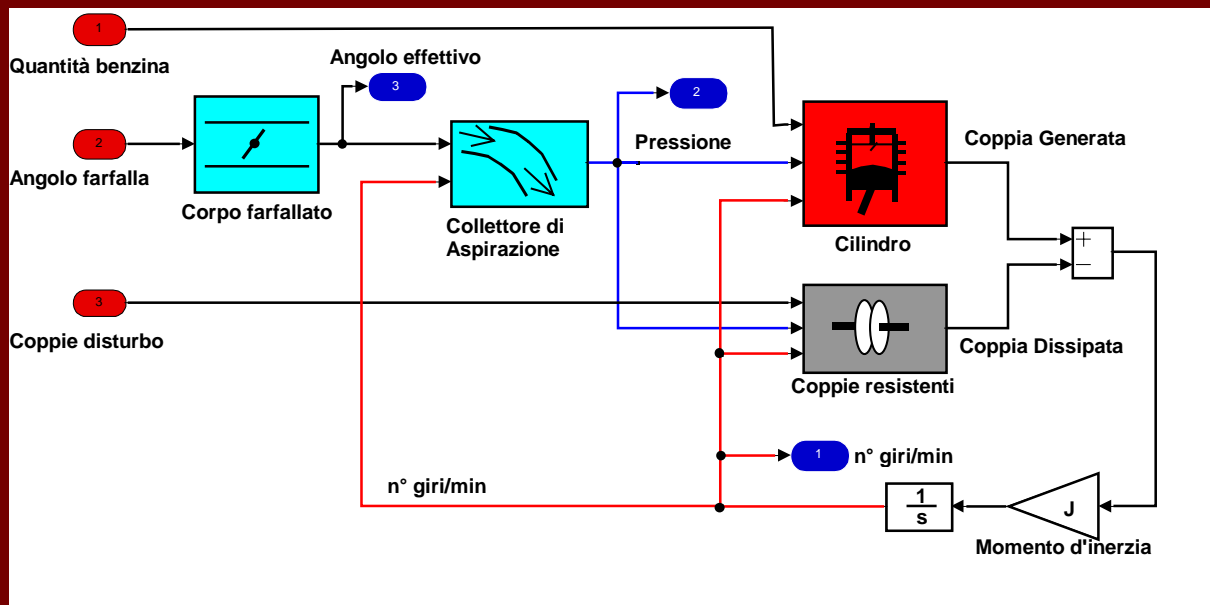
# Sistemi “Torque Based”

- Architettura Software
- Caratteristiche:
  - Disaccoppiamento Funzionale
  - Espandibilità



# Modello Fisico

- Parti principali
  - Corpo farfallato
  - Collettore di aspirazione
  - Generazione coppia motore
  - Coppie resistenti



# Modello Ibrido

- Grandezze:
  - Tempo continue
  - Tempo discrete

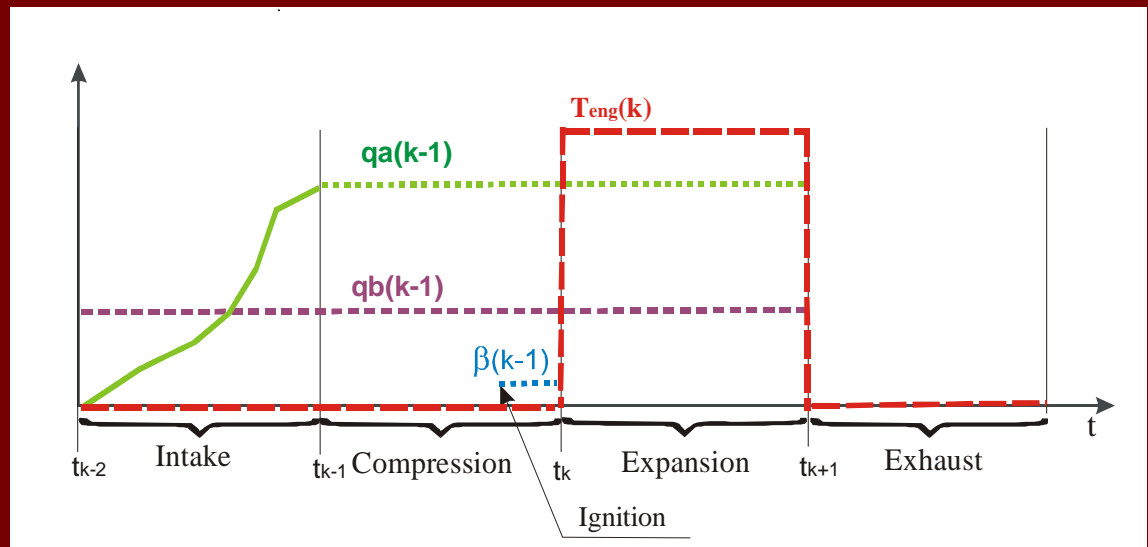
$T_{eng}(k)$  = Coppia Generata

$Qa(k)$  = Quantità d'aria

$Qb(k)$  = Quantità Benzina

$\beta(k)$  = Anticipo Accensione

$t_k$  = Evento di PMS



# Modello Ibrido

- Equazione di generazione coppia:

$$T_{eng}(t) = T_{pot}(q_a(t_{k-1}), n(t_k)) \cdot \eta_\beta(\beta(t_{k-1}))$$
$$t \in [t_k, t_{k+1})$$

- Equazioni di stato:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{n}(t) = K_j (T_{pot}(q_a(t_{k-1}), n(t_k)) \cdot \eta_\beta(\beta(t_{k-1})) - T_{load}(t)) \\ \dot{p}(t) = k_p (F_{th}(\alpha_e(t), p(t)) - F_{cyl}(n(t), p(t))) \\ \dot{\alpha}_e(t) = -\frac{1}{\tau_a} \alpha_e(t) + \frac{1}{\tau_a} \alpha(t - D_\alpha) \end{array} \right.$$



# Modello Virtuale

## ■ Interfaccia “*Torque Based*”

### Nuove Grandezze:

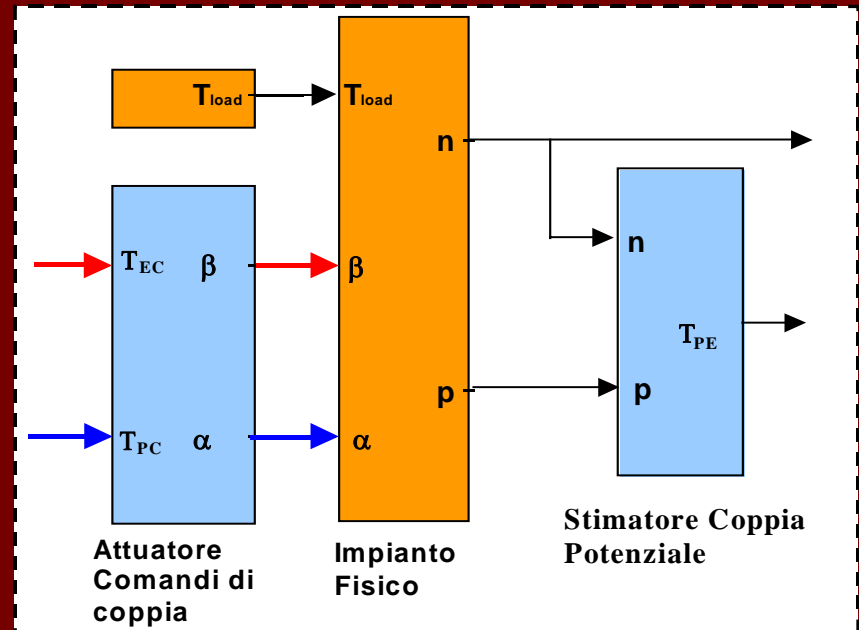
- Coppia Istantanea

$$T_{ec}(t_k) = T_{pot0} \cdot \eta_{\beta}(\beta(t_k))$$

$$T_{eng}(t_k) = T_{ec}(t_{k-1})$$

- Coppia Predetta
- Coppia Potenziale Stimata
- Riserva di coppia:

$$T_r(t) = T_{pot0} - T_{eng}(t)$$



# Modello Virtuale Multifrequenza

## ■ Equazioni Tempo continuo:

F.d.t. Coppia Istantanea - N°Giri :

F.d.t. Coppia Disturbo - N°Giri :

F.d.t. Coppia Predetta – Coppia Potenziale S.

$$\frac{N(s)}{T_{ec}(s)} = \mathbf{P}_1(S) = e^{-0.044s} \cdot \left( \frac{76}{s} \right)$$

$$\frac{N(s)}{T_{load}(s)} = \mathbf{P}_{1d}(S) = \left( \frac{76}{s} \right)$$

$$\frac{T_{pe}(s)}{T_{pc}(s)} = \mathbf{P}_2(S) = e^{-0.044s} \cdot \left( \frac{2}{s+2} \right)$$

## ■ Modello Tempo Discreto Multifrequenza:

$$\begin{cases} n(d) = \mathbf{P}_1(d)T_{EC}(d) + \mathbf{P}_{1d}(d)T_{load}(d) \\ T_{PE}(d) = \mathbf{P}_2(d)T_{PC}(d) \end{cases}$$

$$\mathbf{P}_1(d) = \frac{B_1(d)}{A_1(d)} \quad \mathbf{P}_2(d) = \frac{B_2(d)}{A_2(d)} \quad \mathbf{P}_{1d}(d) = \frac{C_1(d)}{A_1(d)}$$

# Struttura di controllo

## ■ Condizioni di disaccoppiamento

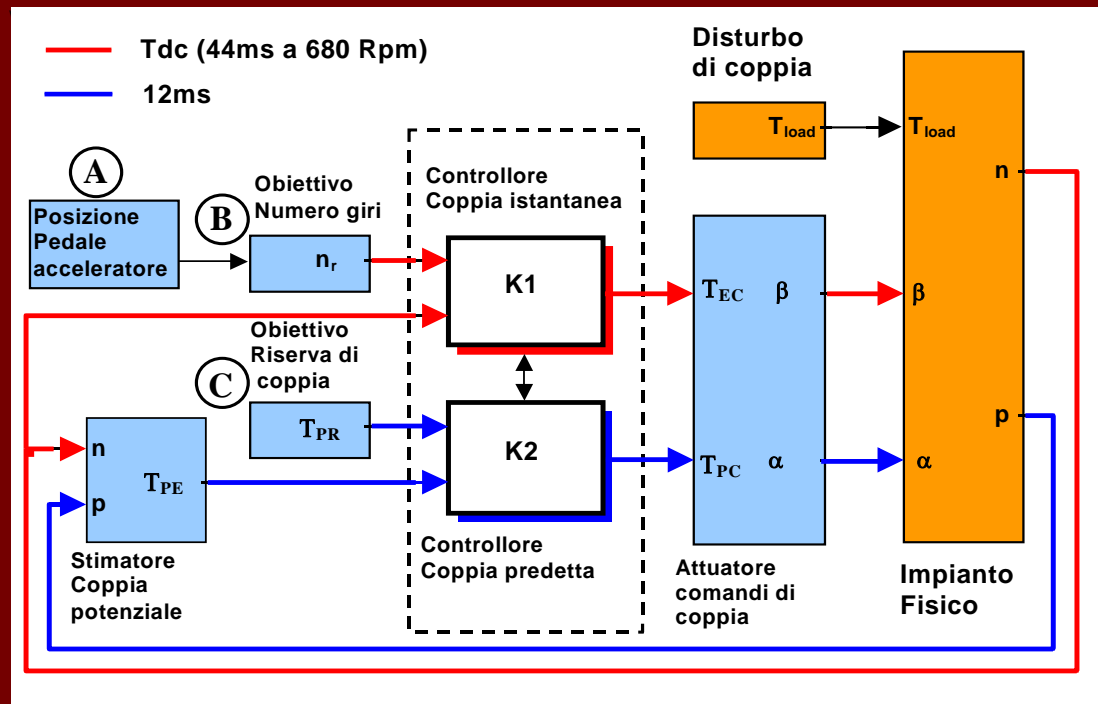
- Variazione del numero di giri limitata
- Mantenimento di una determinata quantità di riserva di coppia

## ■ Riferimenti:

- Numero giri
- Riserva di coppia

## ■ Composizione:

- 2 regolatori SISO



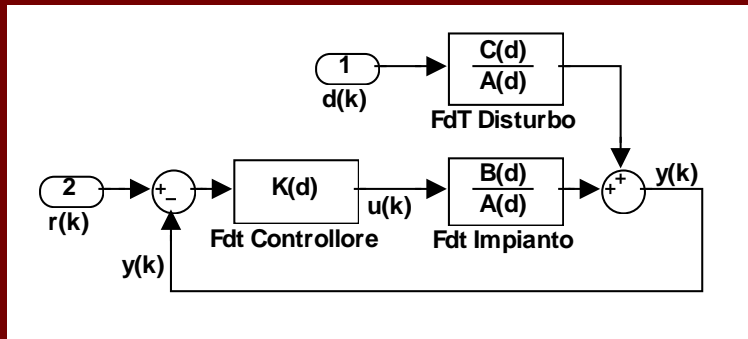
# Scelta dei controllori

- **K1(d) – Coppia Istantanea**
  - Alta capacità di reiezione ai disturbi di coppia
  - Regolazione del numero di giri
  
- **K2(d) – Coppia Predetta**
  - Regolazione riserva di coppia
  - Prestazioni in termini di sovraelongazione e tempi di salita

# K1(d) - Sintesi Deadbeat $\ell-\infty$

## ■ Specifiche:

- Reiezione ai disturbi a gradino in tempo minimo



$$Y(d) = \frac{B(d)}{A(d)}U(d) + \frac{C(d)}{A(d)}D(d)$$

## ■ Legge di controllo

$$U(d) = -K(d)Y(d)$$

Classe dei controllori stabilizzanti

$$K(d) = \frac{S(d) + A(d)Q(d)}{R(d) - B(d)Q(d)}$$

con

$$A(d)R(d) + B(d)S(d) = 1$$

$Q(d)$

f.d.t. causale e asintoticamente stabile

# K1(d) - Sintesi Deadbeat $\ell-\infty$

- Definizione del parametro di Youla  $Q(d)$

$$Q = \frac{Z_o + A_d(T_o + B^+W)}{C^+B^+B_d^+}$$

- Risposta dell'uscita di tipo Deadbeat

$$Y = Y_o - C^-B^-B_d^-[T_o + B^+W]$$

- Risposta dell'ingresso di tipo FIR (cond. *ripple-free*)

$$\Delta U = GB_d^-(SC^+B_d^+ + A[V_o + A_dW])$$

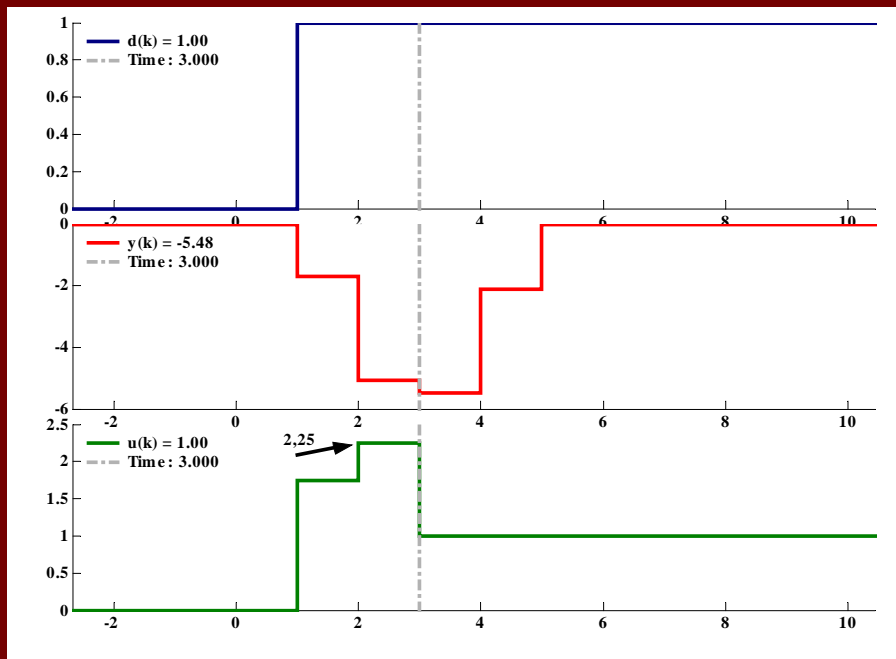
- Funzionale di costo e definizione del polinomio  $W(d)$

$$\min_{W \in \mathbf{R}^w[d]} \|\Delta U\|_{\mathbf{A}\infty}$$

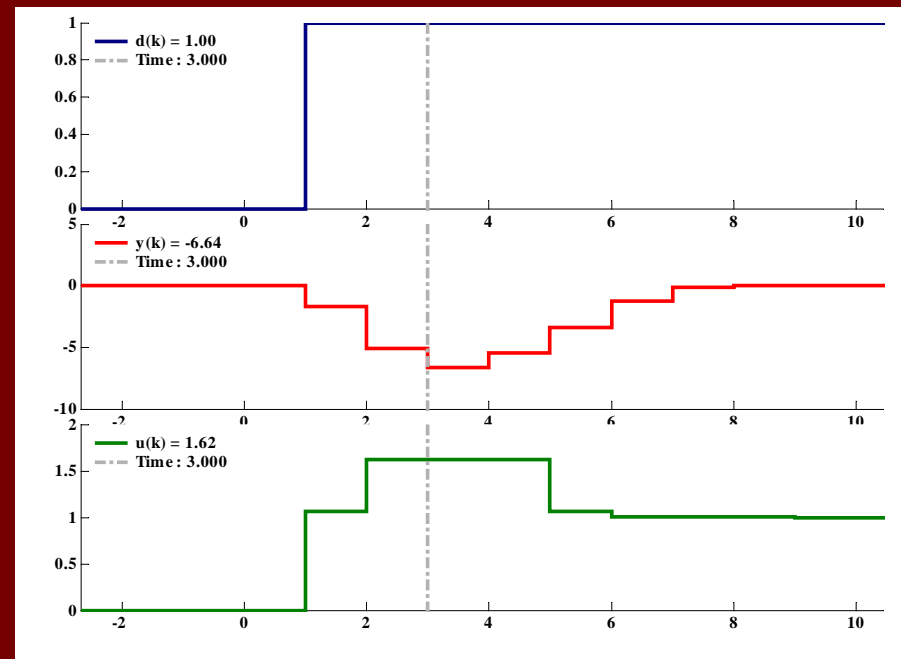
# K1(d) - Taratura

## ■ Scelta della lunghezza di W(d)

N=3

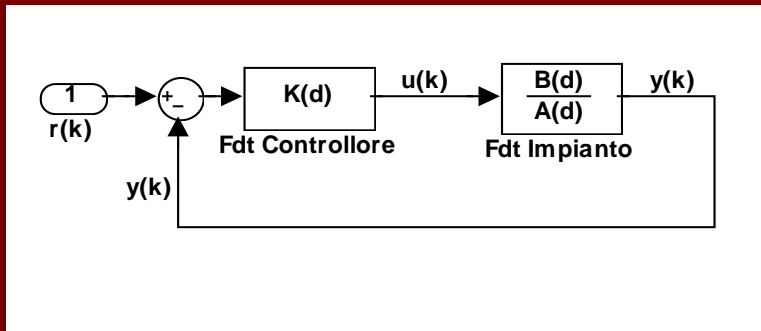


N=5



# K2(d) - Sintesi analitica “Pole Placement”

- Specifiche:
  - Prestazioni alla risposta al gradino di riferimento
  - Robustezza alla stabilità



- Imposizione risposta ad anello chiuso del 2° Ordine

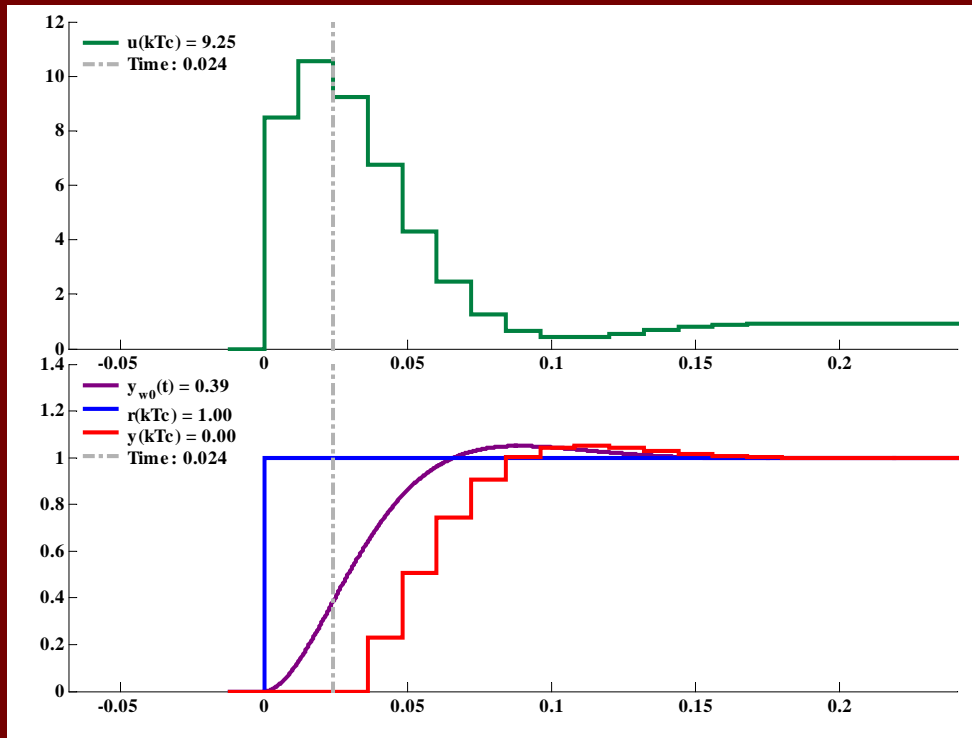
$$W_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\begin{cases} s_M = e^{\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} & t_s \cong \frac{2.5}{B_{3db}} \\ B_{3db} = \omega_n \sqrt{1-2\xi^2 + \sqrt{2-4\xi^2 + 4\xi^4}} \end{cases}$$

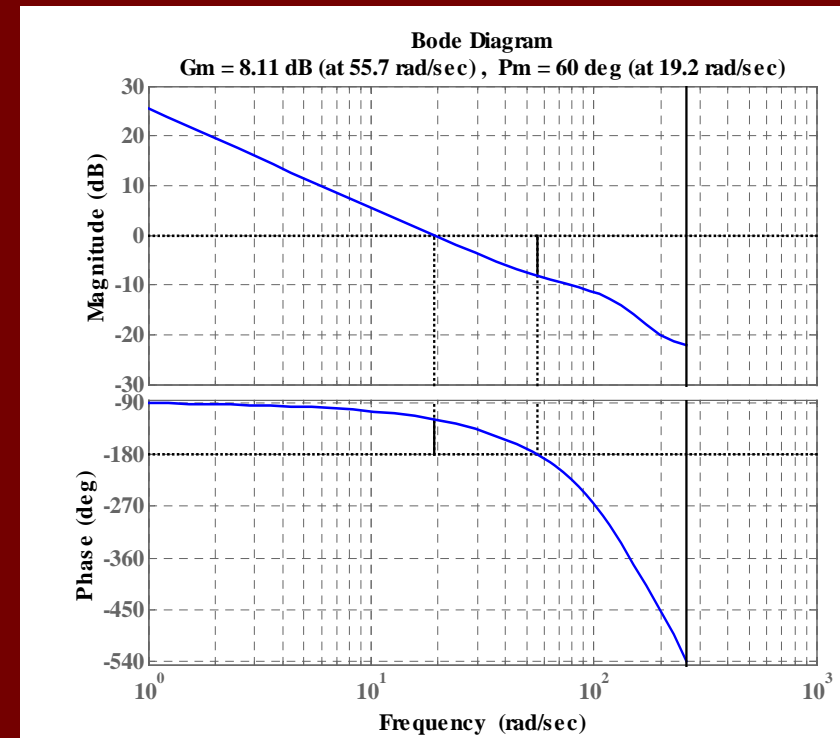


# K2(d) Taratura

## Risposta al gradino



## Margini di stabilità



Overshoot 5%  
Tempo di salita = 50 ms

Margine di fase =  $60^\circ$   
Margine di guadagno = 8.11 dB

# Implementazione SW

- Ambiente di sviluppo
  - Matlab Simulink (sviluppo)
  - TargetLink (generazione automatica codice)
- Vincoli
  - Assenza di unità Floating-Point:
    1. Quantizzazione coefficienti
    2. Errore di arrotondamento
    3. Problemi di Overflow
  - Risparmio utilizzo memoria
  - Risparmio utilizzo potenza di calcolo
- Soluzione
  - Tecniche di elaborazione numerica dei segnali

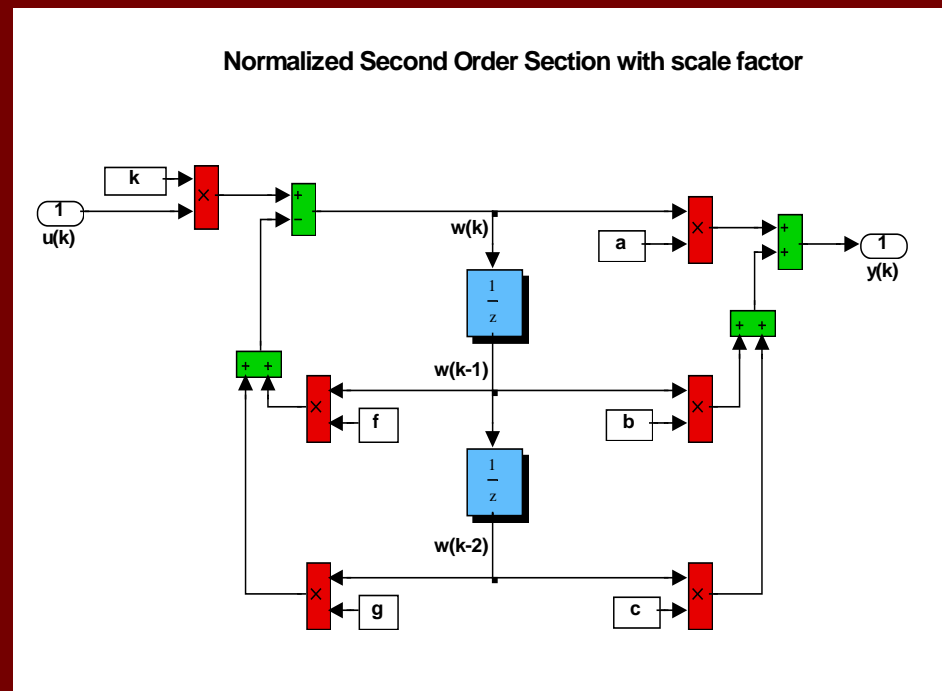
# Second Order Sections

## ■ Struttura Diretta Tipo 2 o Canonica:

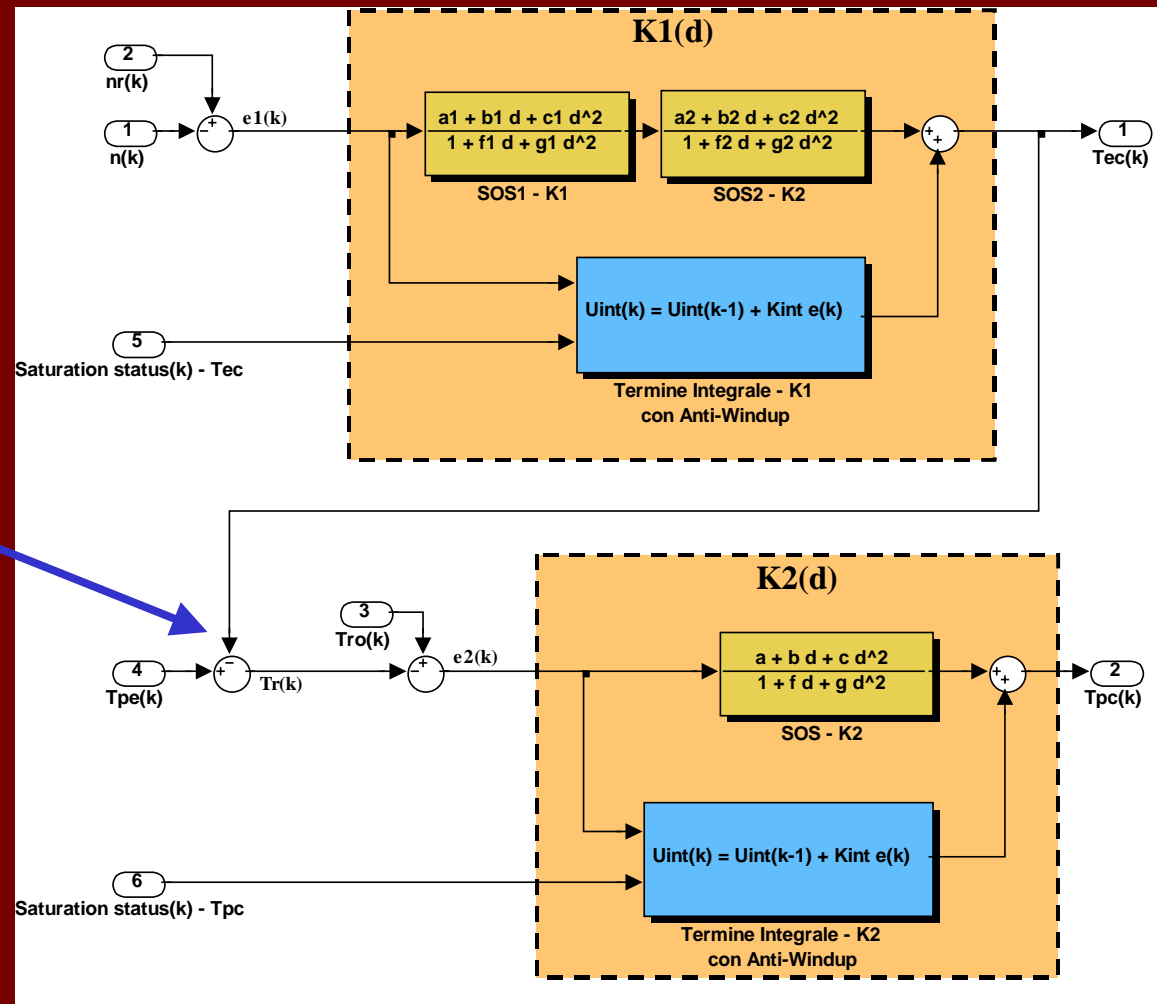
$$\left\{ \begin{aligned} H(d) &= \frac{S(d)}{R(d)} = \frac{\sum_{j=0}^M \beta_j d^j}{1 + \sum_{j=1}^M \alpha_j d^j} = k \prod_{j=1}^{\frac{M}{2}} \left( \frac{a_j + b_j d + c_j d^2}{1 + f_j d + g_j d^2} \right) \\ Y(d) &= H(d)U(d) \end{aligned} \right.$$

Fattore di scala

$$\left\{ \begin{aligned} k &= \frac{1}{\max_{\omega} (H(\omega))} \\ H(\omega) &= H(d) \Big|_{d=e^{-j\omega T_c}} \end{aligned} \right.$$



# Schema a Blocchi complessivo



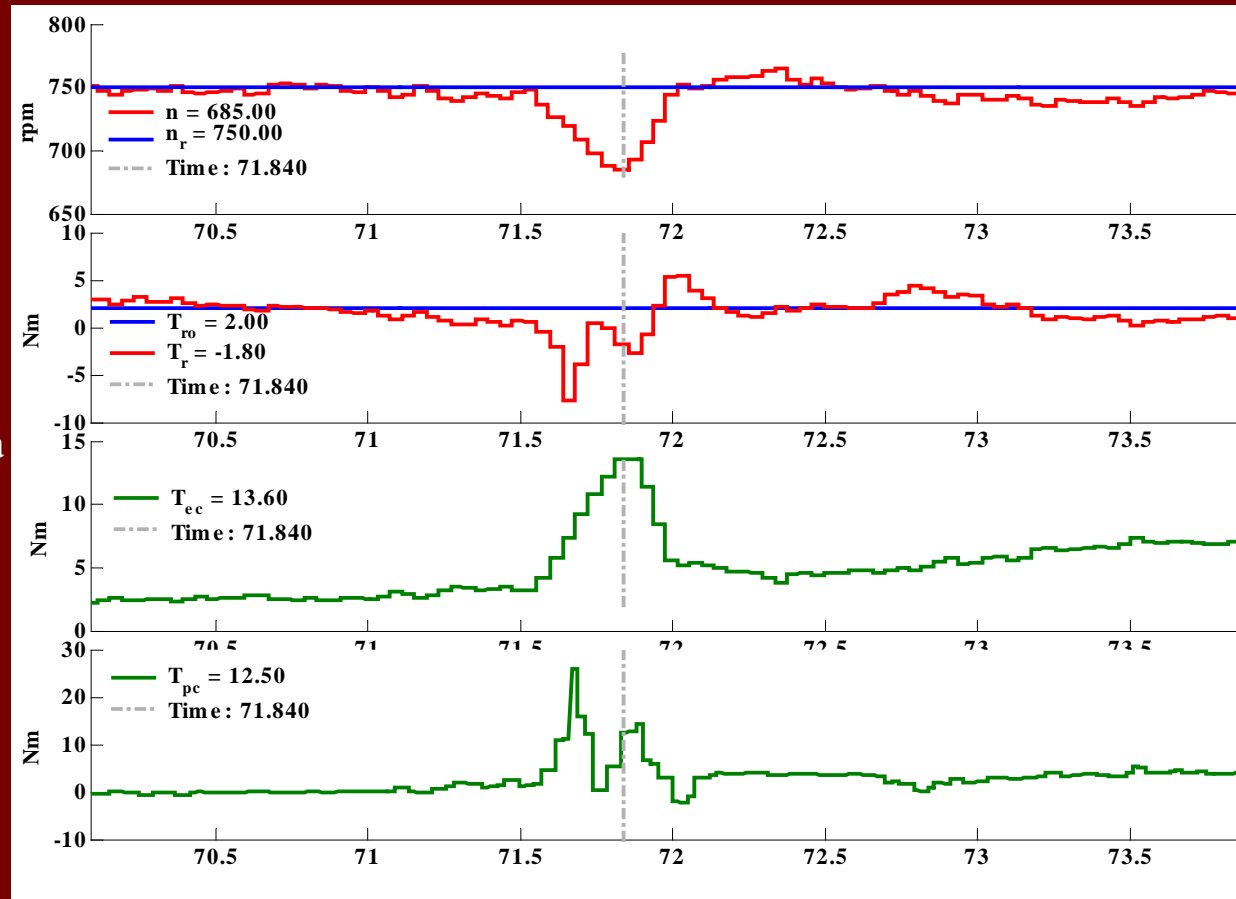
Patent Pending

# Risultati Sperimentali in folle

## ■ Risposta ad un disturbo di coppia imprevedibile

- $N_r$  Velocità di rif. del motore  
unità di misura RPM
- $N$  Velocità misurata del motore  
unità di misura RPM
- $T_r$  Coppia di riserva Stimata  
unità di misura Nm
- $T_{ro}$  Coppia di riserva Obiettivo  
unità di misura Nm
- $T_{ec}$  Comando di coppia istantanea  
unità di misura Nm
- $T_{pc}$  Comando di coppia predetta  
unità di misura Nm

**Undershoot=85 rpm (1/2 LQ)**

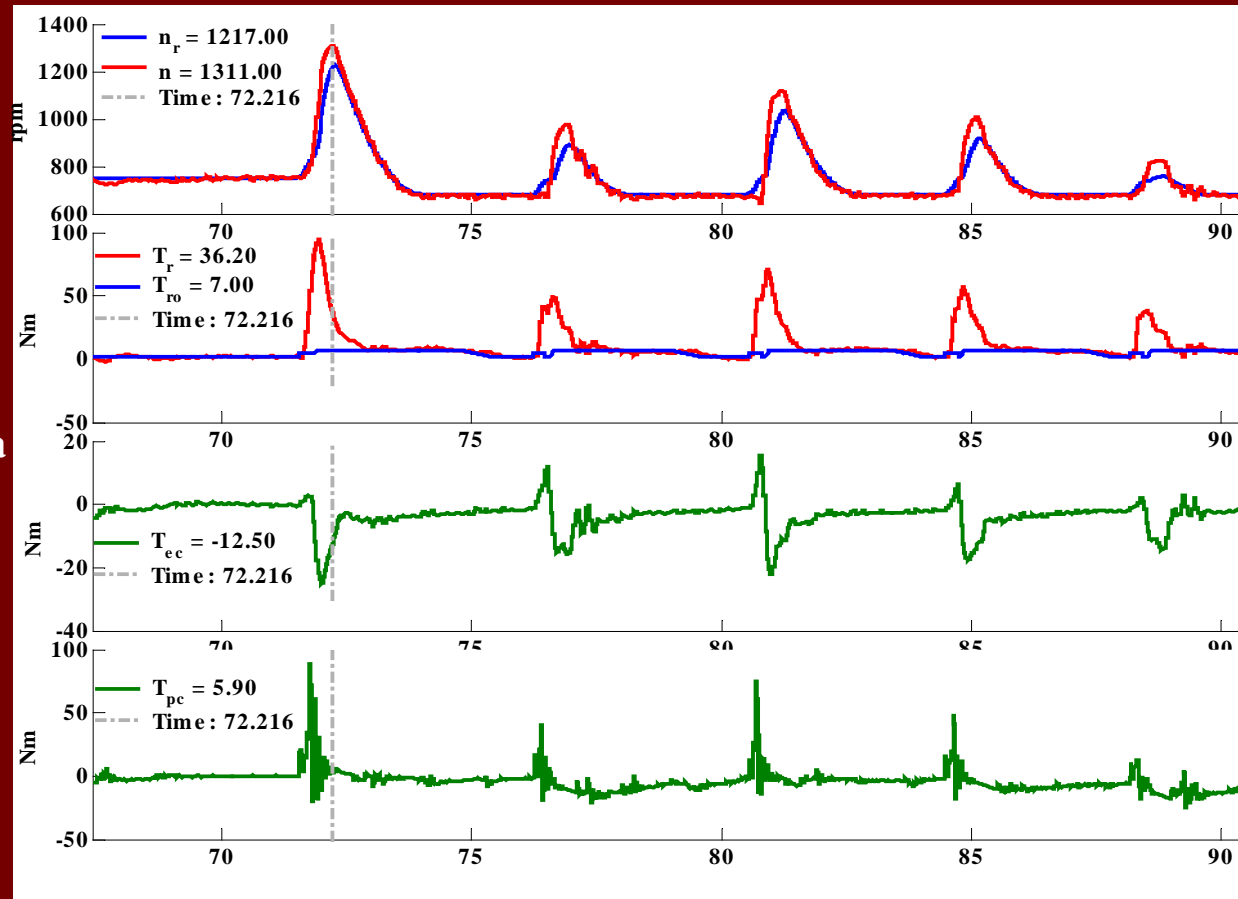


# Risultati Sperimentali in folle

## ■ Commutazione rientri al minimo

- $N_r$  Velocità di rif. del motore  
unità di misura RPM
- $N$  Velocità misurata del motore  
unità di misura RPM
- $T_r$  Coppia di riserva Stimata  
unità di misura Nm
- $T_{ro}$  Coppia di riserva Obiettivo  
unità di misura Nm
- $T_{ec}$  Comando di coppia istantanea  
unità di misura Nm
- $T_{pc}$  Comando di coppia predetta  
unità di misura Nm

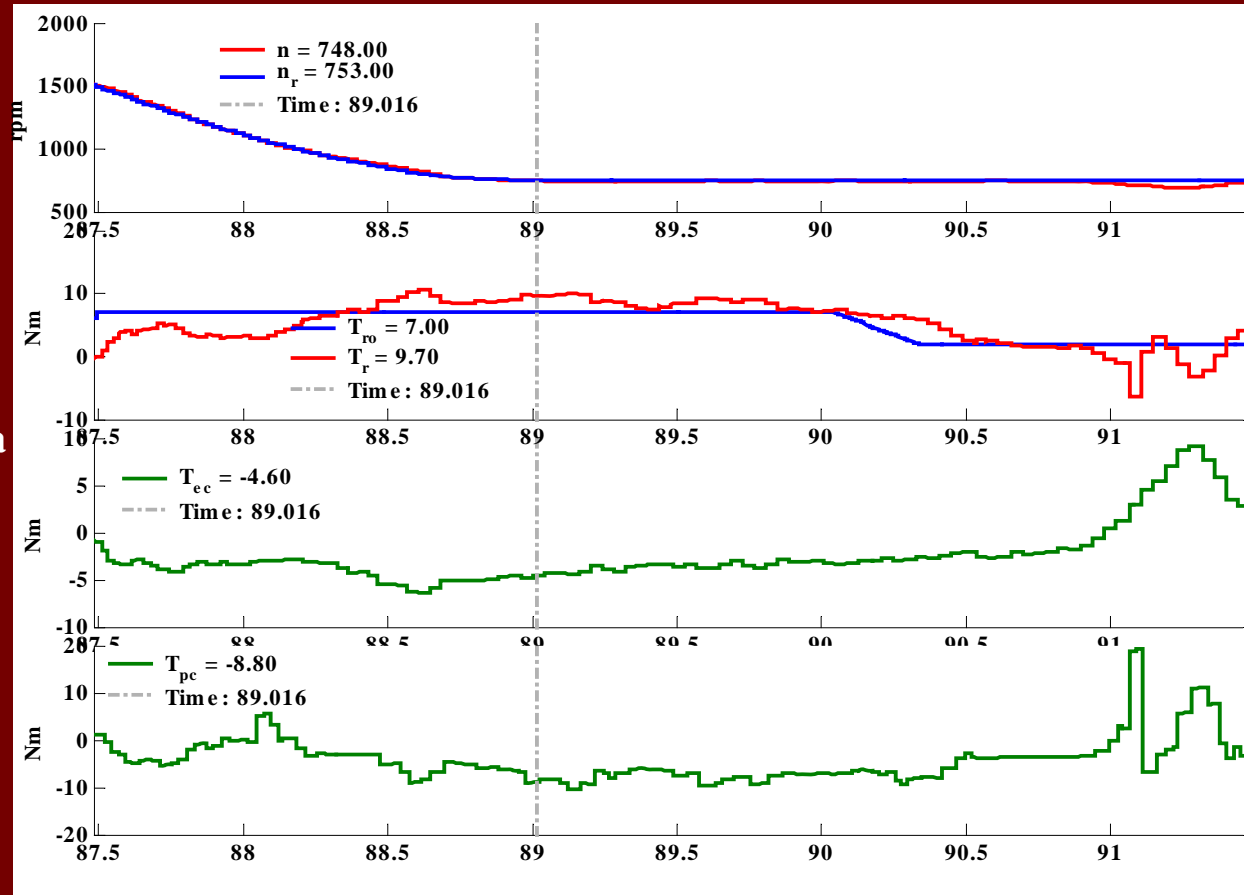
**Assenza di oscillazioni con  
alto utilizzo comandi**



# Risultati Sperimentali in folle

## ■ Rientro al minimo

- $N_r$  Velocità di rif. del motore  
unità di misura RPM
- $N$  Velocità misurata del motore  
unità di misura RPM
- $T_r$  Coppia di riserva Stimata  
unità di misura Nm
- $T_{ro}$  Coppia di riserva Obiettivo  
unità di misura Nm
- $T_{ec}$  Comando di coppia istantanea  
unità di misura Nm
- $T_{pc}$  Comando di coppia predetta  
unità di misura Nm

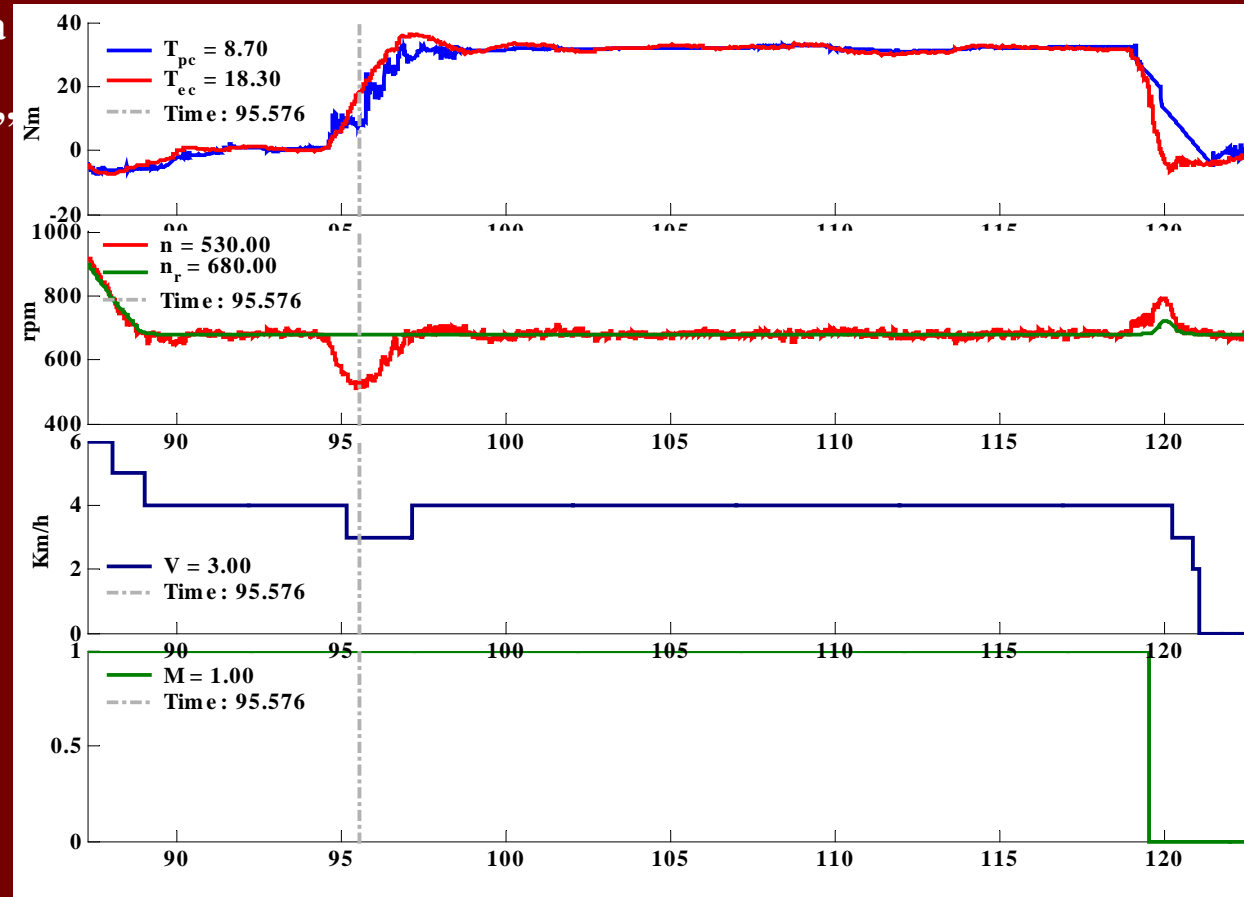


**Undershoot=5 rpm**

# Risultati Sperimentali in trazione

## ■ Attraversamento di una salita in prima marcia

- $T_{ec}$  Comando di coppia istantanea  
unità di misura Nm
- $T_{pc}$  Comando di “coppia predetta”  
unità di misura Nm
- $N_r$  Velocità rif. del motore  
unità di misura RPM
- $N$  Velocità misurata del motore  
unità di misura RPM
- $V$  Velocità del veicolo,  
unità di misura Km/h
- $M$  Marcia inserita, [0:5]



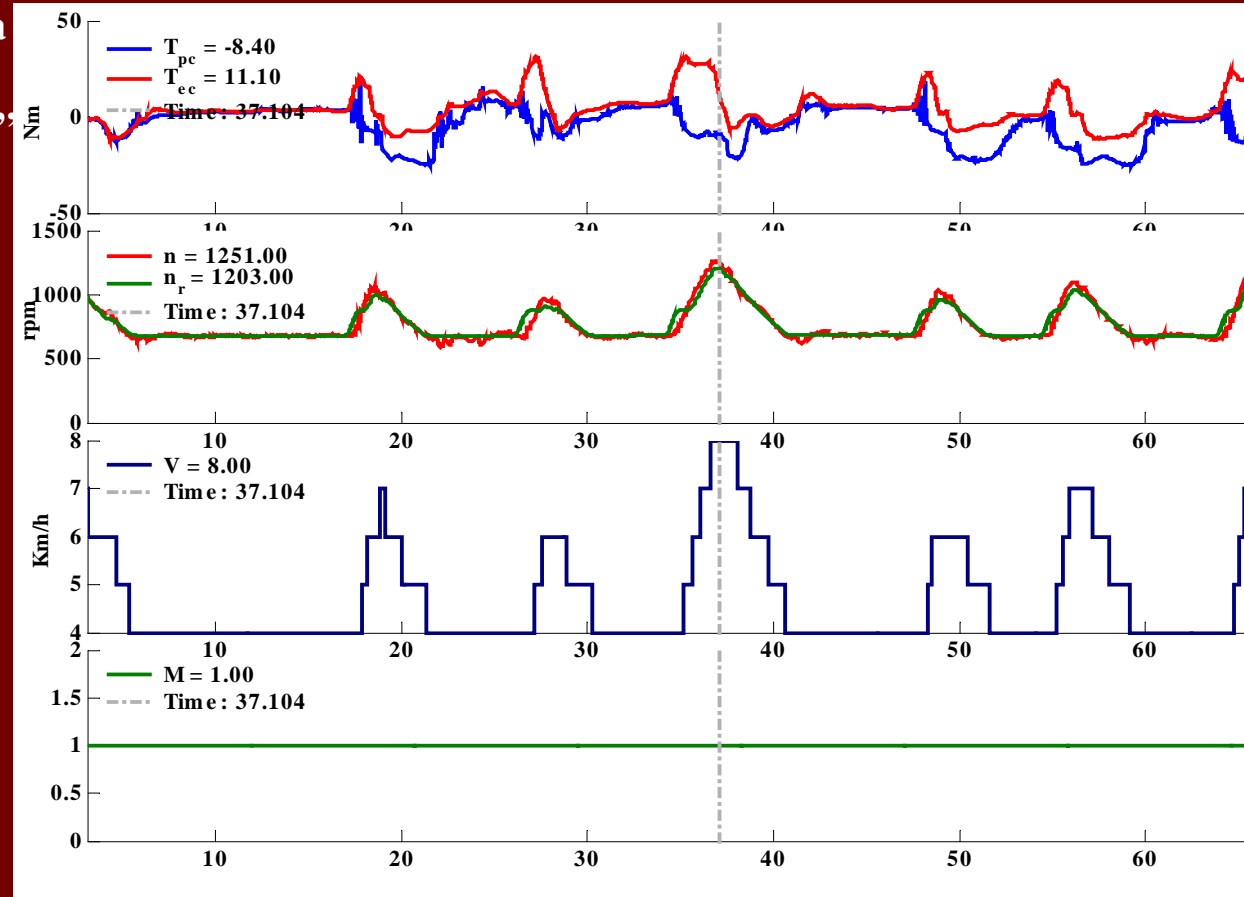
**Valor minimo giri=581 rpm**



# Risultati Sperimentali in trazione

## ■ Trascinato in prima marcia

- $T_{ec}$  Comando di coppia istantanea  
unità di misura Nm
- $T_{pc}$  Comando di “coppia predetta”  
unità di misura Nm
- $N_r$  Velocità rif. del motore  
unità di misura RPM
- $N$  Velocità misurata del motore  
unità di misura RPM
- $V$  Velocità del veicolo,  
unità di misura Km/h
- $M$  Marcia inserita, [0:5]



**Eccellente guidabilità**

# Conclusioni

- Considerazioni sui risultati
  - Alta reiezione ai disturbi di coppia
  - Undershoot limitati
  - Bassa fluttuazione giri
  - Alta efficienza (bassi consumi)
  - Ottima guidabilità
  - Basso costo computazionale (minore delle tecniche PID-LQ)
- Motivi
  - Architettura “Torque Based”
  - Struttura di controllo
  - Tecnica deadbeat  $l-\infty$
  - Implementazione software tramite celle del 2° ordine