

Azionamenti Elettrici

Parte 4

**Esempi di Scelta e
dimensionamento
dell'Azionamento**

Prof. Alberto Tonielli

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-6443024

E-mail: atonielli@deis.unibo.it

Indice generale del corso

■ Parte 1

- Introduzione, richiami di Controlli Automatici ed Elettrotecnica
- Generazione elettromagnetica di coppia

■ Parte 2

- Tipologie dei motori elettrici e dei relativi azionamenti
 - Motori ed azionamenti C.C.
 - Motori ed azionamenti Brushless (sincroni a magneti permanenti)
 - Motori ed azionamenti Asincroni ad Induzione
 - Motori passo-passo e coppia

■ Parte 3

- Introduzione al controllo assi

■ Parte 4

- Scelta dell'azionamento
- Dimensionamento del motore e dell'amplificatore
- **Esempi di dimensionamento**

Esempi di dimensionamento

■ Esempio non numerico

- ➔ slitta con vite a ricircolazione

■ Esempi numerici

➔ Moto uniforme

- mulino per ceramica

➔ Moto ciclico periodico

- piattaforma per pressa

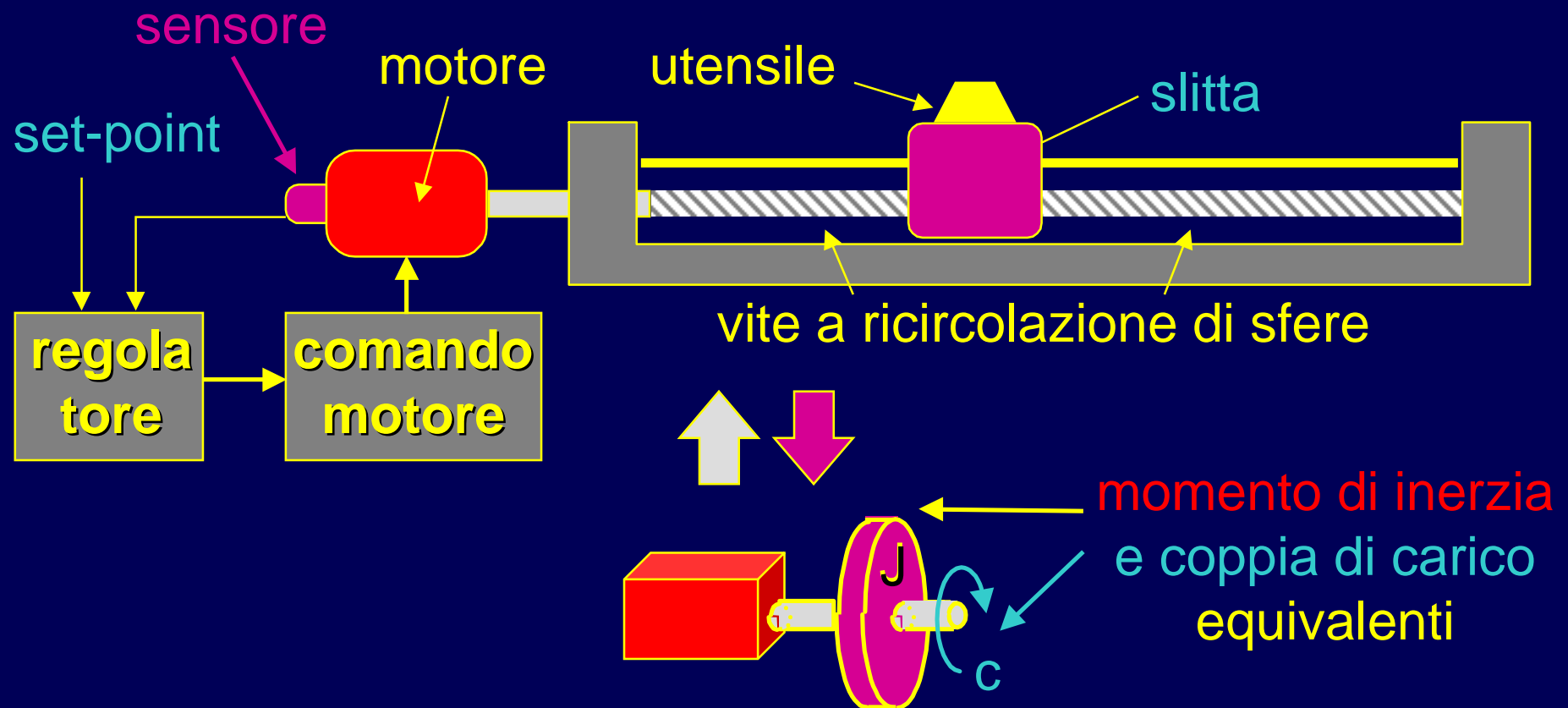
➔ Moto ciclico aperiodico

- pallettizzatore cartesiano

Dimensionamento dell'azionamento

La catena cinematica

Controllo di posizione di un utensile mosso da una slitta meccanica azionata da un motore elettrico



Dimensionamento dell'azionamento

Influenza del rapporto di accoppiamento

■ calcolo del momento di inerzia equivalente



$$e = \frac{1}{2} M v^2$$

$$e = \frac{1}{2} J_{eq} \omega^2$$

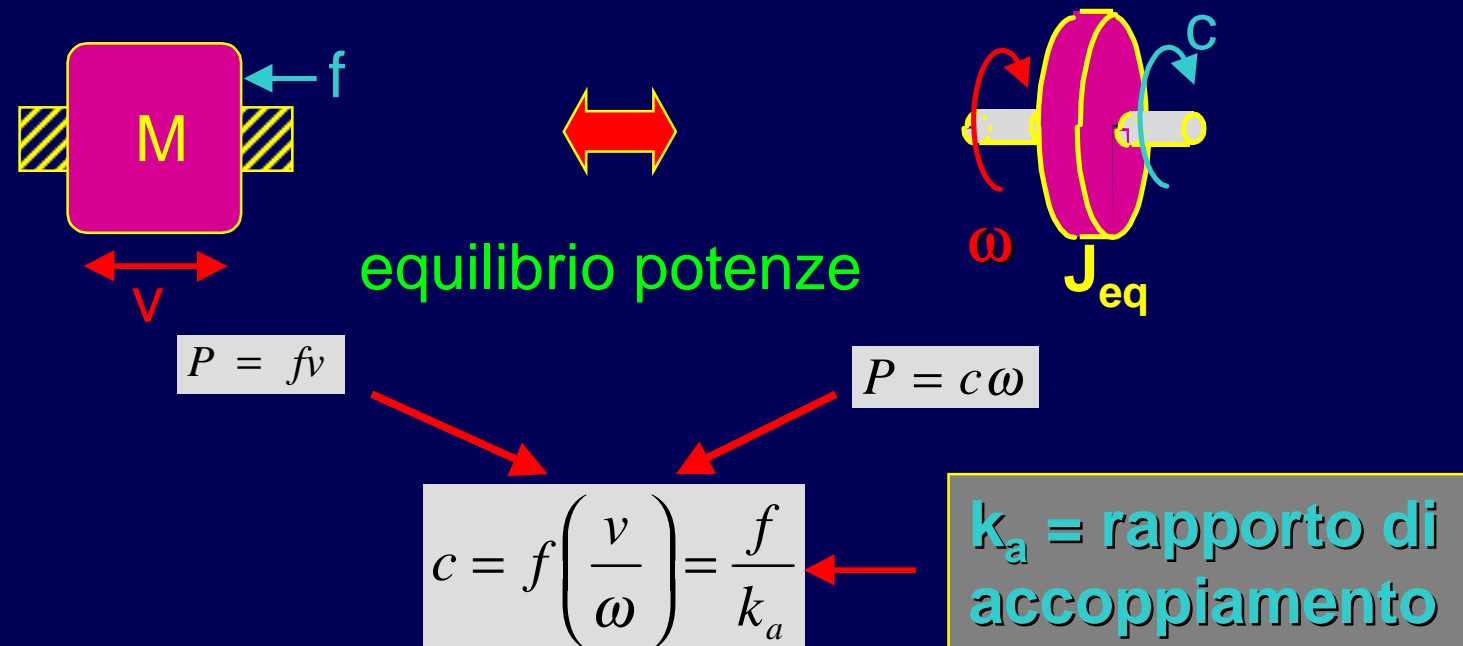
$$J_{eq} = M \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 = \frac{M}{k_a^2}$$

$k_a = (\omega/v)$ rapporto di accoppiamento

Dimensionamento dell'azionamento

Influenza del rapporto di accoppiamento

■ calcolo della coppia equivalente alla forza di carico



Gli stessi calcoli energetici si possono utilizzare nel caso di carico rotante (sostituendo ω_2 a v) o di interconnessione di un riduttore tra il motore e la vite

Dimensionamento dell'azionamento

Modello della parte meccanica

dinamica della velocità

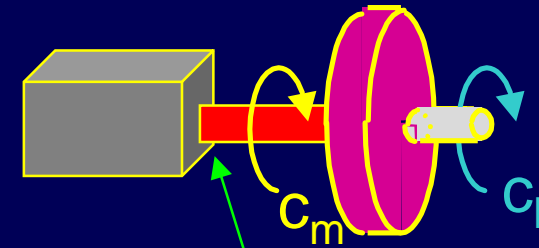
$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{F}{J_{eq}}\omega + \frac{c_m - c_l}{J_{eq}}$$

sviluppo del moto rotativo

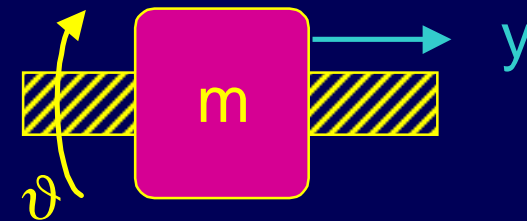
$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega$$

sviluppo del moto traslativo

$$y = \frac{\vartheta}{k_a}$$



F = attrito viscoso
equivalente



Dimensionamento dell'azionamento

Rapporto di accoppiamento ottimale

Il momento di inerzia equivalente, riportato all'albero motore, di tutte le masse traslanti o rotanti a velocità diverse a quella del motore deve essere simile (non minore) di quello del rotore

Regola empirica per la scelta del rapporto di riduzione

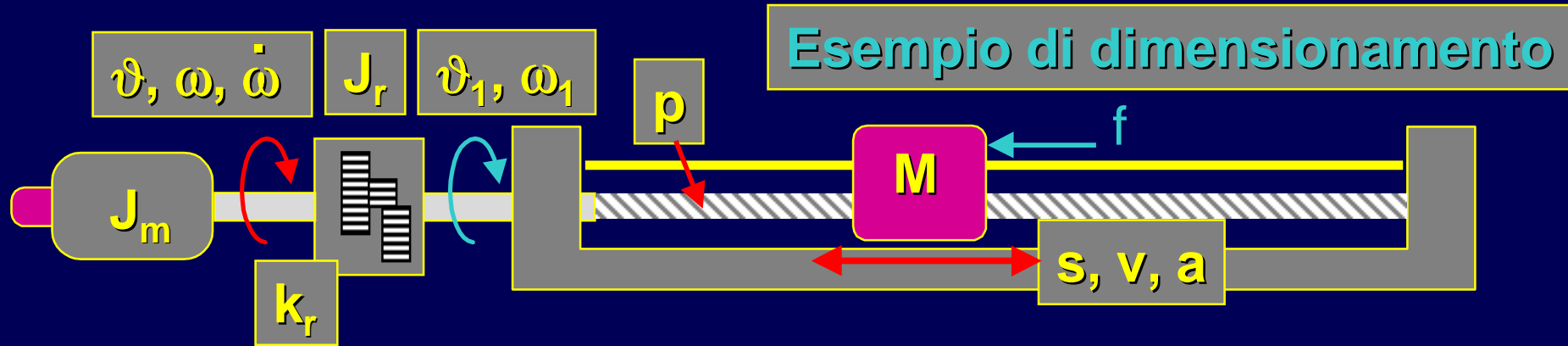
| Accelerazione | J_{eqc}/J_m |
|---------------------------------|---------------|
| spinta ($> 5 \text{ m/s}^2$) | 1:1 |
| media (3 m/s^2) | 4:1 |
| bassa ($< 0.5 \text{ m/s}^2$) | 10:1 |

$J_{eq} = M$ del carico riflessa al motore
 $J_m = J$ del rotore

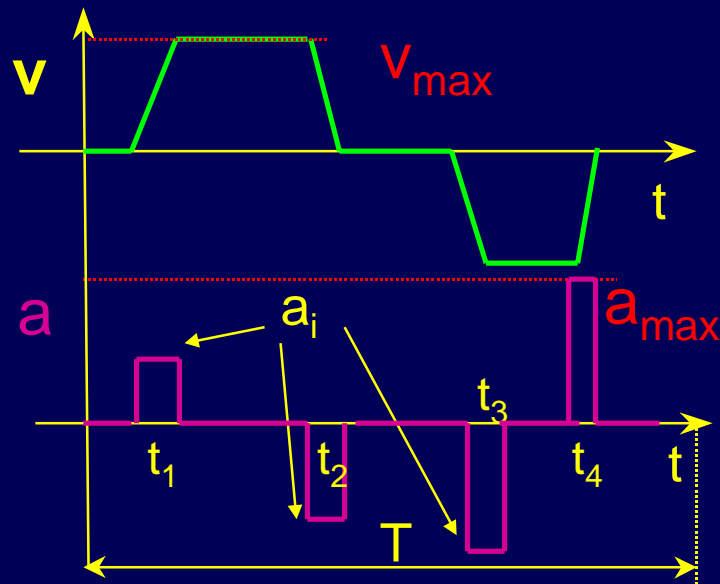
Situazione critica che richiede il miglior bilanciamento tra motore e carico

L'inerzia del rotore non è nota prima di averlo scelto

Dimensionamento dell'azionamento



Passo 1 - calcolo dei parametri meccanici



Si calcolano

$$k_i = \frac{a_i}{a_{max}}$$

$$\delta = \frac{\sum k_i^2 * t_i}{T}$$

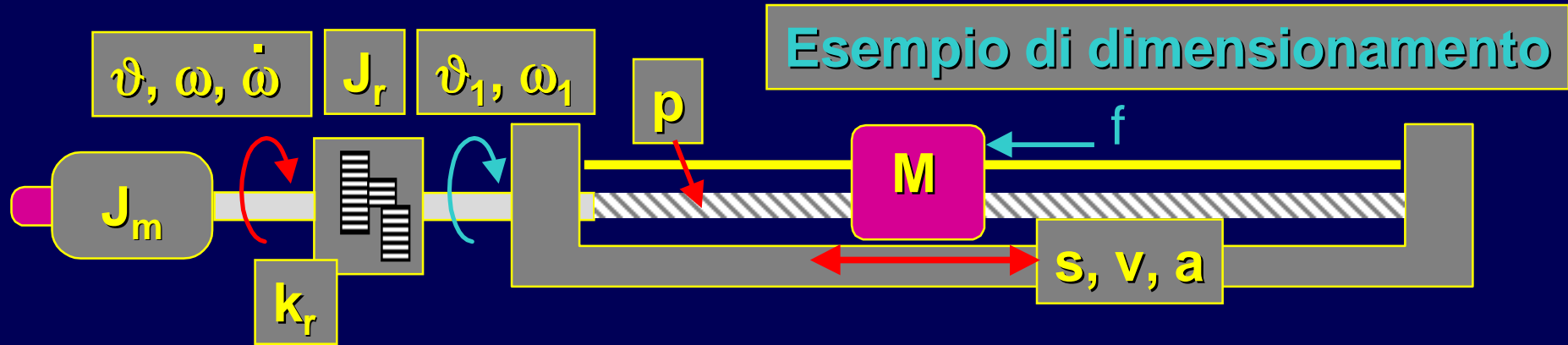
$$P_m^* > v_{max} \frac{(\sqrt{\delta} M a_{max} + f)}{\eta^*}$$



$$J_m^*$$

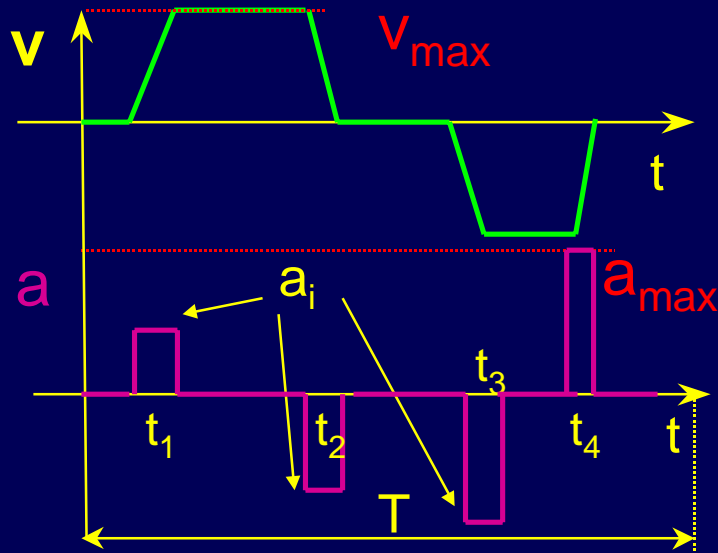
stima approssimativa di J_m

Dimensionamento dell'azionamento



Passo 1 - calcolo dei parametri meccanici

Si calcolano



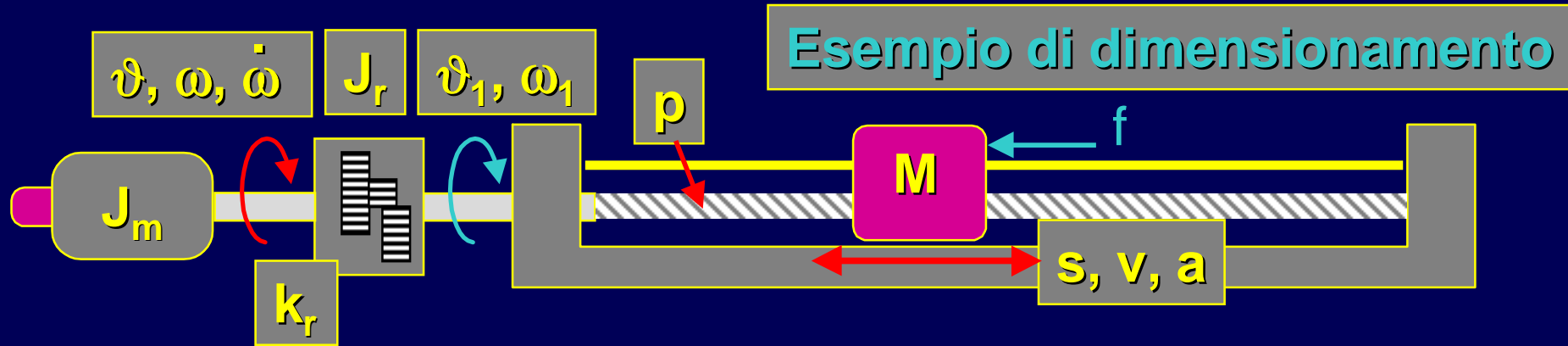
$$k_v = \frac{\omega_1}{v}$$

$$k_r = \frac{\omega}{\omega_1}$$

$$k_a = k_r k_v = \frac{\omega}{v} = \frac{\vartheta}{s}$$

Scegliere K_a in modo da ottenere ω_{max} compatibile con il tipo di motore prescelto

Dimensionamento dell'azionamento



Passo 2 - calcolo dei parametri all'albero motore

Si calcolano

$$\omega_{\max} = k_a v_{\max}$$

$$\dot{\omega}_{\max} = k_a a_{\max}$$

$$J_{eq} = \frac{M}{k_a^2}$$

$$J_{tot}^* = J_m^* + J_{eq}$$

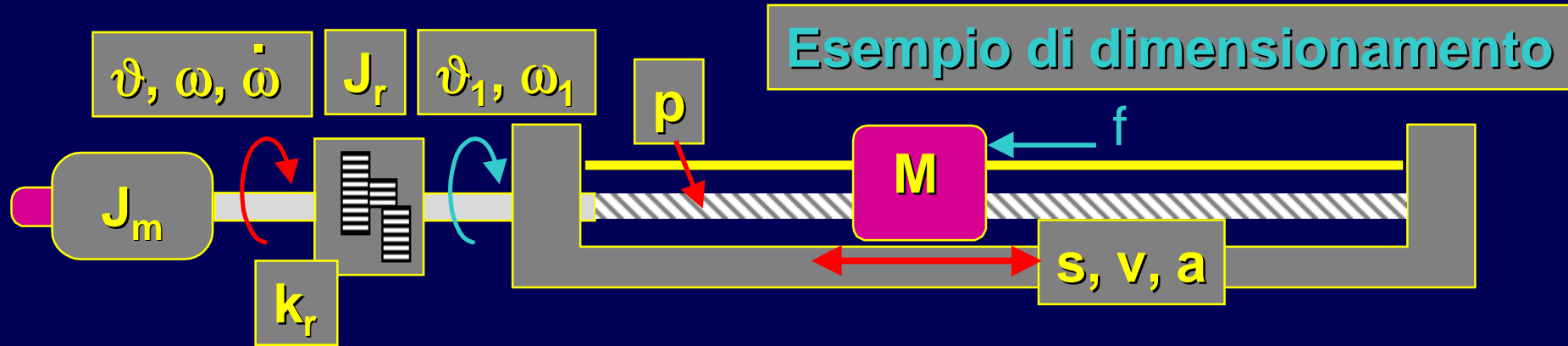


$$C_{rms}^* = \frac{\sqrt{\delta} (J_{tot}^* \dot{\omega}_{\max}) + \frac{f}{k_a}}{\eta}$$

$$C_{nom} > C_{rms}^*$$

valore di scelta per la coppia nominale del motore

Dimensionamento dell'azionamento



Passo 3 - verifica del dimensionamento del motore

Si calcolano

$$J_{tot} = J_m + J_{eq}$$

$$C_{max} = \frac{(J_{tot} \dot{\omega}_{max}) + \frac{f}{k_a}}{\eta}$$

$$C_{rms} = \sqrt{\delta} C_{max}$$

Se

$$\frac{C_{max}}{K_T K_H} < C_{max m}$$

$$\frac{C_{rms}}{K_T K_H} < C_{nom}$$

altrimenti



Motore o.k.



Ripetere passo 3
con motore più
grande

Dimensionamento dell'azionamento

Problemi termici al convertitore

Il convertitore fornisce extracorrente ($1.5 - 2 I_{nom}$) per un tempo limitato

■ due casi

- extracorrente per un tempo fisso
- extracorrente in funzione della potenza dissipata
 - tempo inversamente proporzionale al valore

■ il comportamento dinamico e la capacità di controllare le coppie di carico non sono costanti

- assi singoli
 - si può sfruttare l'extracorrente per ottimizzare i costi
- assi coordinati
 - per garantire il sincronismo occorre fare molta attenzione alla saturazione di corrente

Dimensionamento dell'azionamento

Problemi termici al convertitore

Dimensionamento del convertitore

$$i_{\max} = k_{\text{extra}} i_{n \text{ om}}$$

← dai data-sheet

Calcolo correnti al convertitore

Se $C_{\max} > k_{\text{extra}} C_{\text{rms}}$

$$i_{n \text{ om conv}} = \frac{C_{\max}}{k_c} \frac{1}{k_{\text{extra}}}$$

Se $C_{\max} < k_{\text{extra}} C_{\text{rms}}$

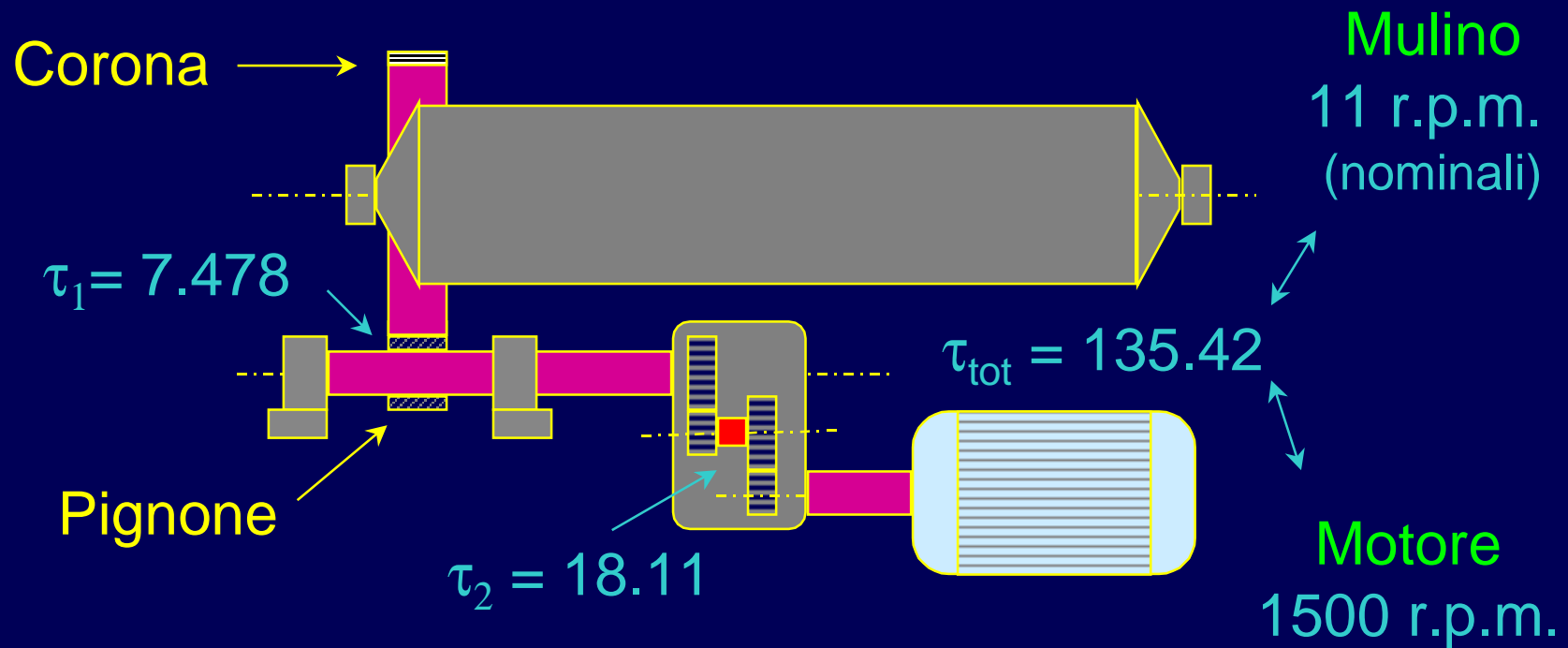
$$i_{n \text{ om conv}} = \frac{C_{\text{rms}}}{k_c}$$

↑ costante di coppia del motore ↑

Attenzione all'uso della extracorrente nei movimenti sincronizzati

Esempi di dimensionamento

Mulino per ceramica



Esempi di dimensionamento

Mulino per ceramica

■ Specifiche: $\tau = 135.42$

Sul Mulino

Al Motore

C_{res} allo spunto = 1.2 MNm

C_{res} allo spunto = 9000 Nm

C_{res} nominale = 0.88 MNm

$1/\tau$

C_{res} nominale = 6500 Nm

Mom. di inerzia = 1.7 MKg.m²

$1/\tau^2$

Mom. di inerzia = 96.16 Kg.m²

Potenza nominale = $C_{nom} * \omega_{nom} = 6500 * 157 = 1\text{MW}$

Transitorio di avviamento > 30 s



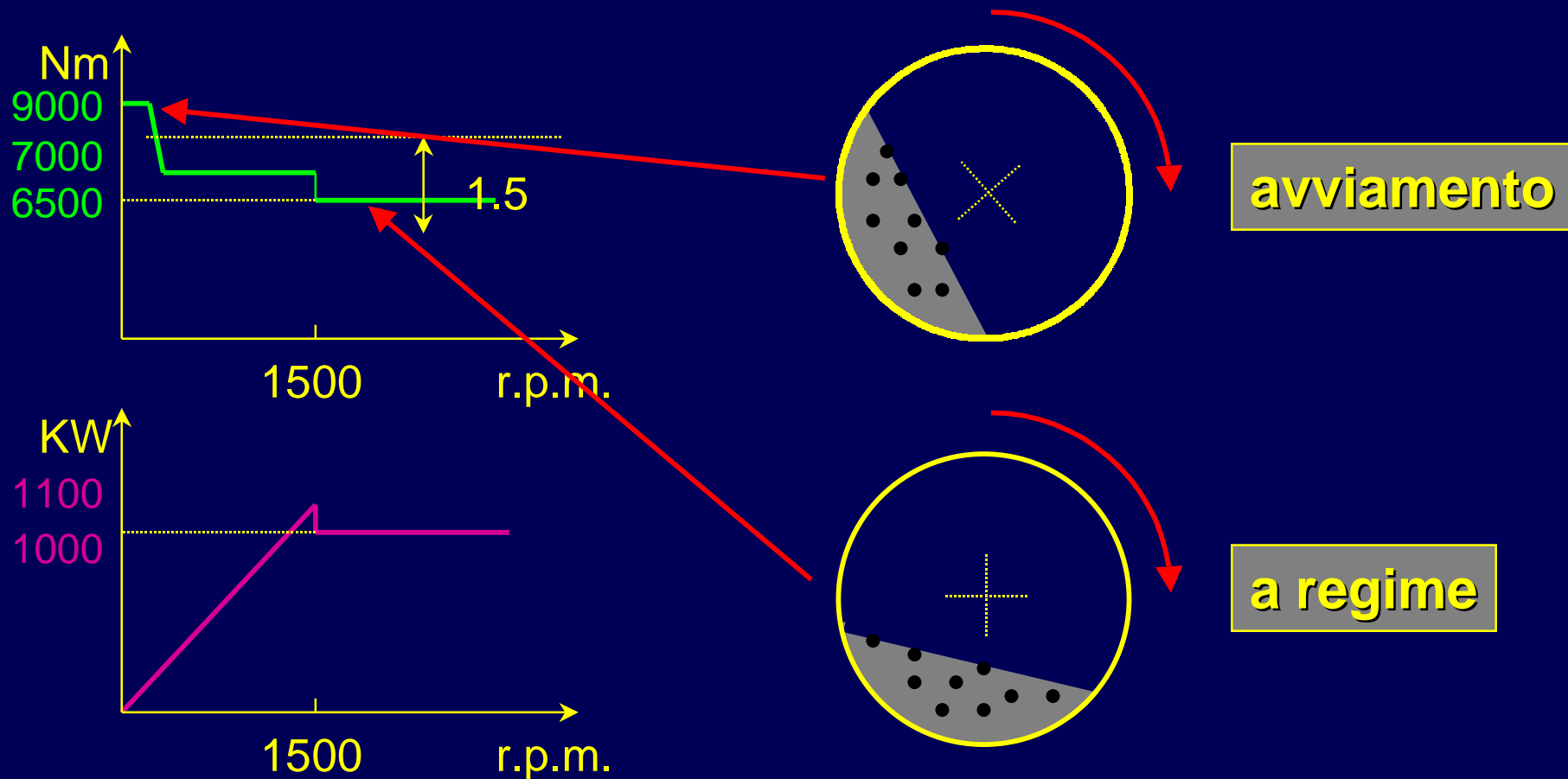
$\dot{\omega} < 5 \text{ rad/s}^2 \Rightarrow C_{acc} = J\dot{\omega} < 500\text{Nm}$

Trascurabile

Esempi di dimensionamento

Mulino per ceramica

■ Diagrammi di coppia e potenza al motore



Mulino per ceramica

■ Scelta del tipo di azionamento

→ velocità costante

- la velocità variabile serve solo per avviare il mulino

→ grossa extracoppia all'avviamento

- assestamento del materiale

→ durata del transitorio non critica

■ soluzioni possibili

→ motore a collettore ad eccitazione separata

- tradizionale

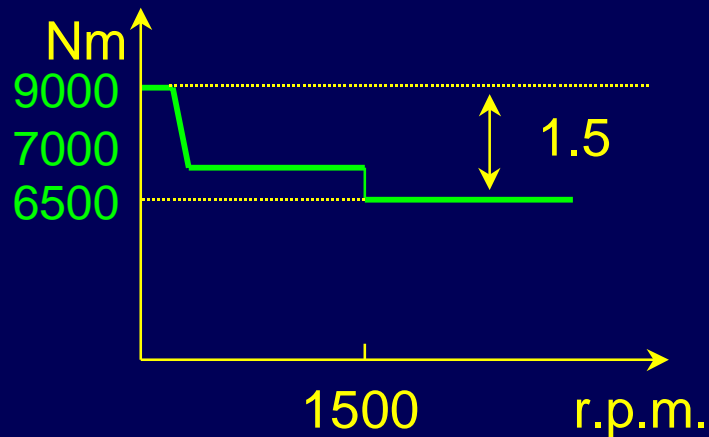
→ motore ad induzione con controllo V/f costante

- più attuale

Esempi di dimensionamento

Mulino per ceramica

■ Diagrammi di coppia e potenza semplificati

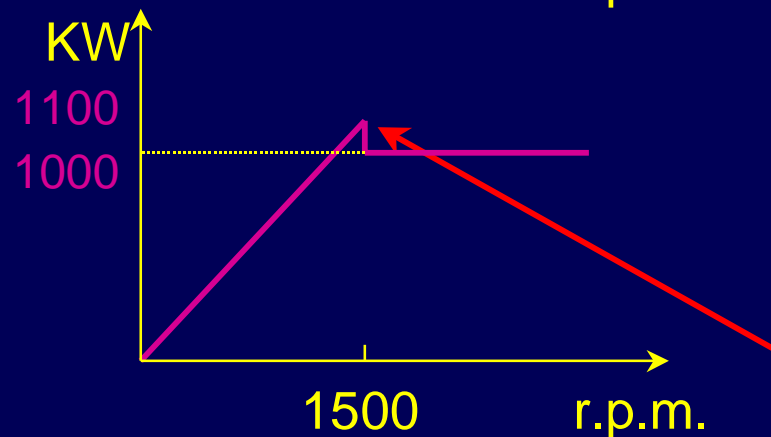


$$\frac{C_{\max}}{C_{nom}} = 1.5$$

2 strade

Motore 1 MW
1500 r.p.m.
Azionamento con
 $I_{\max} = 1.5 I_{nom}$

Motore 1 MW
1000 r.p.m.
Deflussaggio
Azionamento con
 $I_{\max} = I_{nom}$



La potenza massima corrisponde sostanzialmente a quella nominale

Esempi di dimensionamento

Mulino per ceramica

■ Motore 1MW 1500 r.p.m. (380V/4 poli/50Hz)

- $C_{nom} = 6500 \text{ Nm}$
- $I_{nom} = 1800 \text{ A}$ ($\eta \cdot \cos\phi > .85$)
- $I_{max} = 1.5 \cdot I_{nom} = 2700 \text{ A}$
- $C_{0 \text{ r.p.m.}} = 9500 \text{ Nm}$

■ Motore 1MW 1000 r.p.m. (380V/6poli/50Hz)

- $C_{nom} = 9500 \text{ Nm}$
- $I_{nom} = 1800 \text{ A}$ ($\eta \cos\phi > .85$)
- $I_{max} = I_{nom} = 1800 \text{ A}$
- $C_{1500 \text{ r.p.m.}} = 6500 \text{ Nm}$ con deflussaggio oltre i 50 Hz

Inverter difficilmente realizzabili con attuali tecnologie a semiconduttori

Esempi di dimensionamento

Mulino per ceramica

■ Motore speciale 1500 r.p.m. (660V/4 poli/50Hz)

- $C_{nom} = 6500 \text{ Nm}$
- $I_{nom} = 1000 \text{ A}$ ($\eta \cos \varphi > .85$)
- $I_{max} = 1.5 I_{nom} = 1500 \text{ A}$
- $C_{0 \text{ r.p.m.}} = 9500 \text{ Nm}$

■ Motore speciale 1000 r.p.m. (660V/6poli/50Hz)

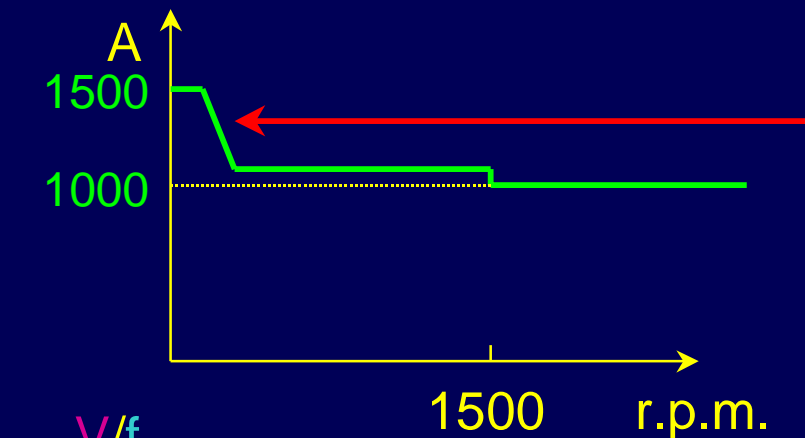
- $C_{nom} = 9500 \text{ Nm}$
- $I_{nom} = 1000 \text{ A}$ ($\eta \cos \varphi > .85$)
- $I_{max} = I_{nom} = 1000 \text{ A}$
- $C_{1500 \text{ r.p.m.}} = 6500 \text{ Nm}$ con deflussaggio oltre i 50 Hz

Inverter realizzabili con tecnologie a tyristori (GTO)

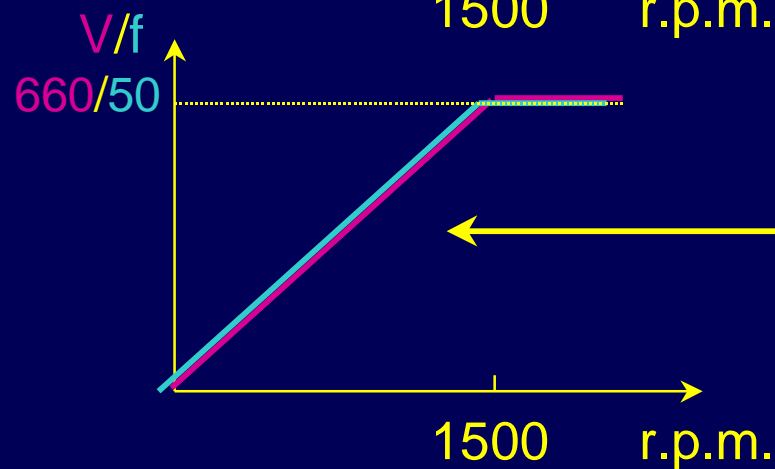
Esempi di dimensionamento

Mulino per ceramica

- Motore speciale 1500 r.p.m. (660V/4poli/50Hz)



Sovradimensionata per pochi istanti poche volte all'anno

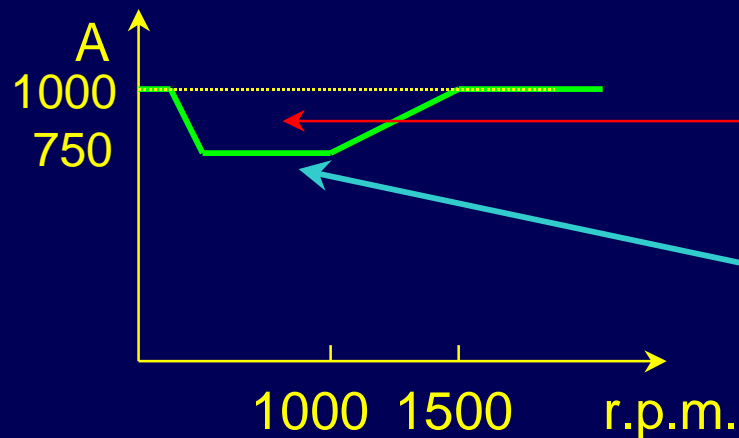


$V/f = \text{costante}$

Esempi di dimensionamento

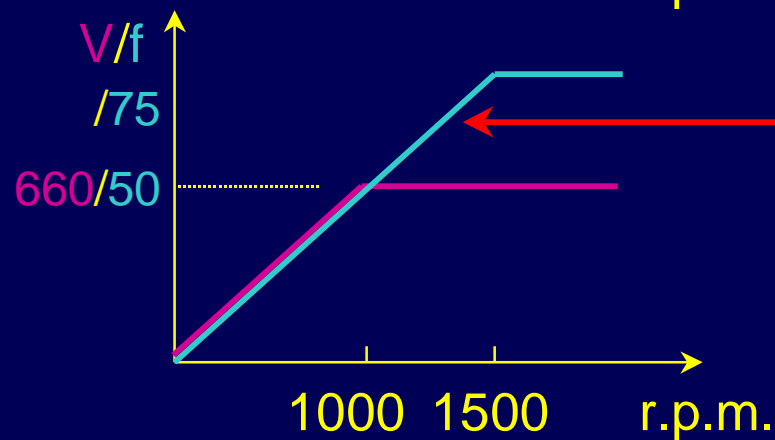
Mulino per ceramica

■ Motore speciale 1000 r.p.m. (660V/6poli/50Hz)



dimensionamento più bilanciato

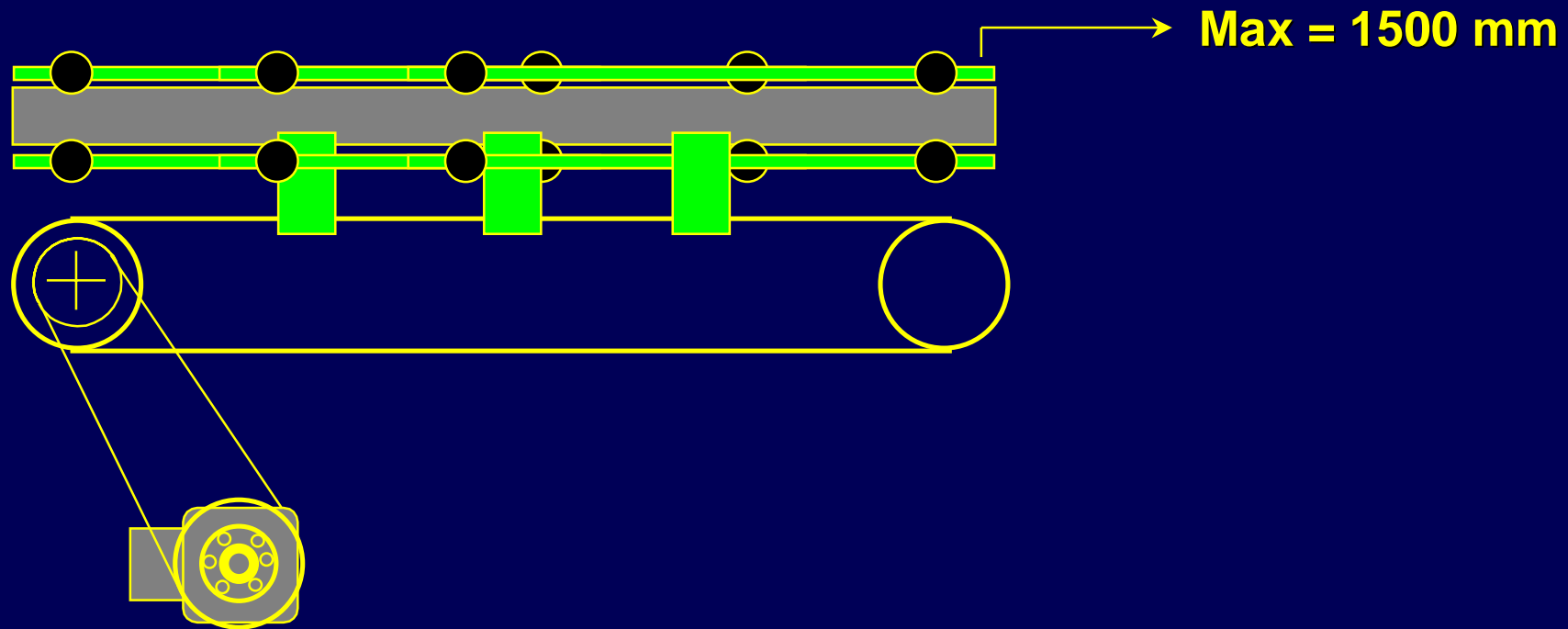
costante di coppia x 1.5 (6 poli)
fino a 1000 r.p.m.



deflussaggio

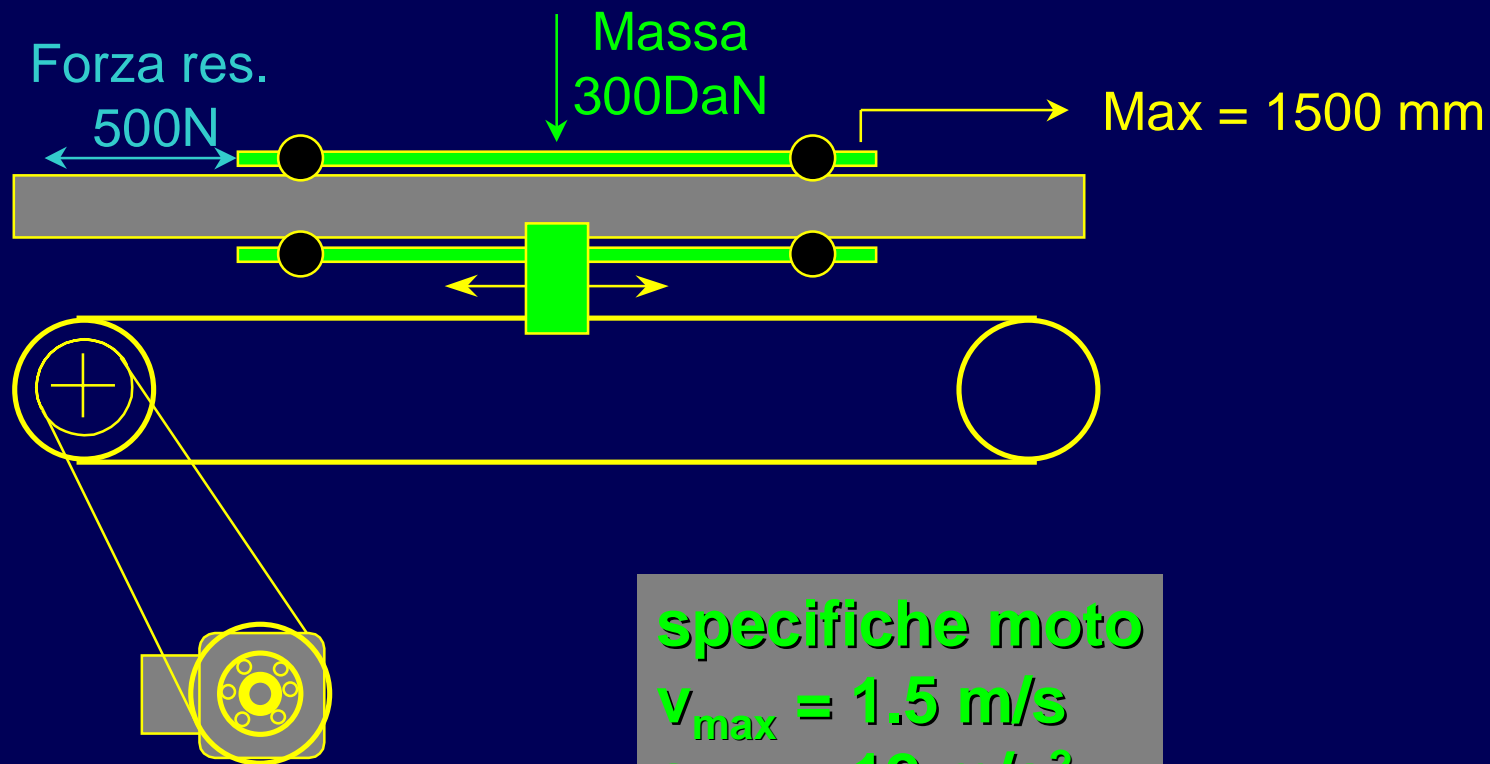
Esempi di dimensionamento

Piattaforma per pressa



Esempi di dimensionamento

Piattaforma per pressa



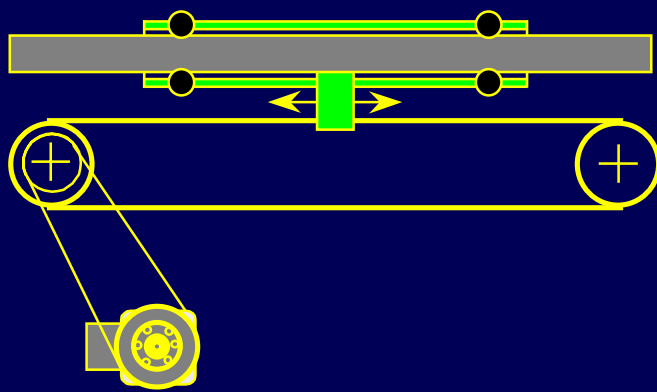
Esempi di dimensionamento

Piattaforma per pressa

■ cicli fissi su diversi formati

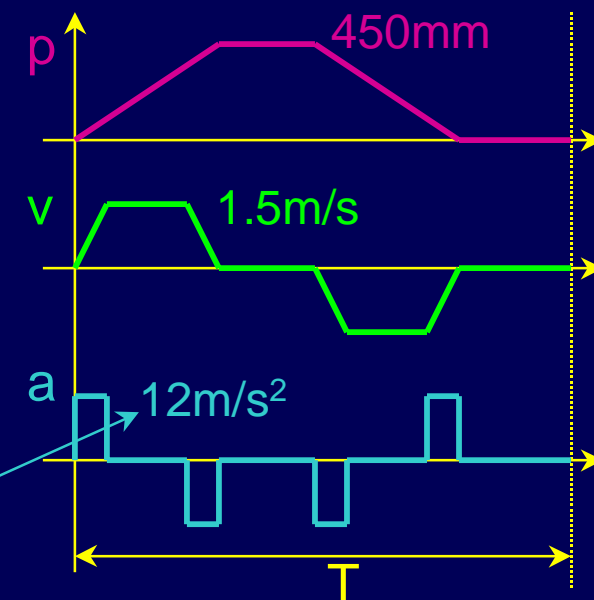
➤ il tempo di mantenimento del formato è più lungo delle costanti di tempo termiche del sistema

- dimensionamento sul ciclo peggiore dal punto di vista termico



molto spinta

Ciclo di servizio peggiore



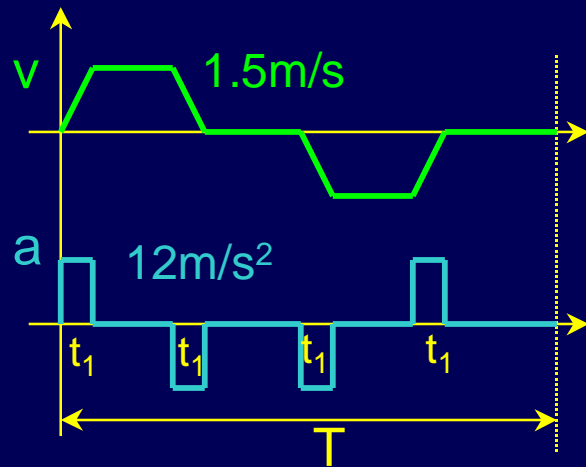
Esempi di dimensionamento

Piattaforma per pressa

■ Dimensionamento del motore

- l'accelerazione è molto spinta
- stima della potenza

Passo 1 - calcolo dei parametri meccanici



$$t_1 = 0.125s \quad T = 3.5s$$

Si calcolano

$$\delta = \frac{\sum k_i^2 * t_i}{T} = 0.143$$

$$P_m^* > v_{\max} \frac{(\sqrt{\delta} M a_{\max} + f)}{\eta^*} = 3630 W$$

$$P_m^* = 4kW$$

$$\begin{aligned} f_r &= 500 N \\ M &= 300 Kg \\ a_{\max} &= 12 m/s^2 \\ v_{\max} &= 1.5 m/s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta^* &= 0.77 \\ K_T &= K_H = 1 \end{aligned}$$

Piattaforma per Pressa

■ Scelta del tipo di azionamento

→ movimento ciclico

- ciclo di servizio non eccessivamente stressato ($\delta = 0.16$)
- è richiesta buona precisione di posizionamento

■ soluzioni possibili

→ azionamento con motore sincrono sinusoidale

- soluzione standard

→ azionamento con motore ad induzione con controllo vettoriale

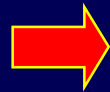
- leggera preferenza per la taglia di potenza
- in prospettiva dovrebbe essere più economico

Esempi di dimensionamento

Piattaforma per pressa

■ Scelta preliminare del rapporto di riduzione

$$P_m^* = 3630W$$



$$P_m^* = 4KW$$

$$J_m^* = 0.0043 \quad 2 \text{ poli}$$

$$J_m^* = 0.0085 \quad 4 \text{ poli}$$



da catalogo

2 poli

$$\omega_m = 300 \text{ rad/s}$$

$$k_a = 200$$

4 poli

$$\omega_m = 150 \text{ rad/s}$$

$$k_a = 100$$

Piattaforma per pressa

Passo 2 - calcolo dei parametri all'albero motore

2 poli

Si calcolano

$$\omega_{\max} = k_a v_{\max} = 300 \text{ rad} / \text{s}$$

$$\dot{\omega}_{\max} = k_a a_{\max} = 2400 \text{ rad} / \text{s}^2$$

$$J_{eq} = \frac{M}{k_a^2} = 0.0075 \text{ Kgm}^2$$

$$J_{tot}^* = J_m^* + J_{eq} = 0.012 \text{ Kgm}^2$$

$$C_{rms}^* = \frac{\sqrt{\delta} (J_{tot}^* \dot{\omega}_{\max}) + \frac{f}{k_a}}{\eta} = 17.5 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} f_r &= 500 \text{ N} \\ M &= 300 \text{ Kg} \\ a_{\max} &= 12 \text{ m/s}^2 \\ v_{\max} &= 1.5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_m^* &= 0.0043 \\ K_a &= 200 \end{aligned}$$

Molto simili

$$\begin{aligned} \eta^* &= 0.77 \\ K_T &= K_H = 1 \end{aligned}$$

5.5 kW

Piattaforma per pressa

Passo 2 - calcolo dei parametri all'albero motore

4 poli

Si calcolano

$$\omega_{\max} = k_a v_{\max} = 150 \text{ rad} / \text{s}$$

$$\dot{\omega}_{\max} = k_a a_{\max} = 1200 \text{ rad} / \text{s}^2$$

$$J_{eq} = \frac{M}{k_a^2} = 0.03 \text{ Kgm}^2$$

$$J_{tot}^* = J_m^* + J_{eq} = 0.0385 \text{ Kgm}^2$$

$$C_{rms}^* = \frac{\sqrt{\delta} (J_{tot}^* \dot{\omega}_{\max}) + \frac{f}{k_a}}{\eta} = 25 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} f_r &= 500 \text{ N} \\ M &= 300 \text{ Kg} \\ a_{\max} &= 12 \text{ m/s}^2 \\ v_{\max} &= 1.5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_m^* &= 0.0085 \\ K_a &= 100 \end{aligned}$$

Molto diversi

$$\begin{aligned} \eta^* &= 0.77 \\ K_T = K_H &= 1 \end{aligned}$$

4 kW

Piattaforma per pressa

Passo 3 - verifica del dimensionamento del motore

4 poli

Si calcolano

$$J_{tot} = J_m + J_{eq} = 0.0385 \text{ kgm}^2$$

$$C_{max} = \frac{(J_{tot} \dot{\omega}_{max}) + \frac{f}{k_a}}{\eta} = 67 \text{ Nm}$$

$$C_{rms} = \sqrt{\delta} C_{max} = 25 \text{ Nm}$$

$$C_{max m} = 80 \text{ Nm} > 67 \text{ Nm}$$

$$C_{nom} = 27.5 \text{ Nm} > 25 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} f_r &= 500 \text{ N} \\ M &= 300 \text{ Kg} \\ a_{max} &= 12 \text{ m/s}^2 \\ v_{max} &= 1.5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_m^* &= 0.0085 \\ K_a &= 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta^* &= 0.77 \\ K_T = K_H &= 1 \end{aligned}$$

Verifica

Scelta confermata

Scelta del convertitore

Calcolo correnti al motore 4 poli 27 Nm

$$I_{nom} = 9.4 A$$

$$K_c = \frac{C_{nom}}{I_{nom}} = 2.9 Nm / A$$

$$C_{nom} = 27.5 Nm$$

$$C_{rms} = 25 Nm$$

$$C_{max} = 67 Nm$$

$$\frac{C_{max}}{C_{rms}} = 2.7$$

Si cerca azionamento con fattore di extracorrente maggiore, oppure si dimensiona su C_{max}

Calcolo correnti al convertitore

$$I_{nom\ mot} = \frac{C_{max}}{2 * k_c} = 11.5 A$$

Fattore di extra corrente = 2

sovradimensionato perché non si è tenuto conto della I_{magn}

Scelta del convertitore

Calcolo correnti al motore 4 poli 27 Nm

$$I_{nom} = \sqrt{I_{mag}^2 + I_{cnom}^2} = 9.4 A$$

$$I_{mag} = 4.5 A \Rightarrow I_{cnom} = 8.2 A$$

$$K_c = \frac{C_{nom}}{I_{cnom}} = 3.33 Nm / A$$

Più corretta

Da catalogo

$$C_{nom} = 27.5 Nm$$
$$C_{rms} = 25 Nm$$

$$C_{max} = 67 Nm$$

Dimensionamento corretto

$$I_{rms} = \sqrt{\left(\frac{C_{rms}}{k_c}\right)^2 + I_{mag}^2} = 8.75 A$$

$$I_{max} = \sqrt{\left(\frac{C_{max}}{k_c}\right)^2 + I_{mag}^2} = 20.6 A$$

$I_{max} > 2I_{rms}$
Si dimensiona su I_{max}

Fattore di extra corrente

$$I_{nom\ inv} = \frac{I_{max}}{2} = 10.3 A$$

Calcolo correnti al convertitore

Scelta del convertitore

Calcolo correnti al motore 4 poli 27 Nm

$$I_{nom} = \sqrt{I_{mag}^2 + I_{cnom}^2} = 9.4 A$$

$$I_{mag} = 4.5 A \Rightarrow I_{cnom} = 8.2 A$$

$$K_c = \frac{C_{nom}}{I_{cnom}} = 3.33 Nm / A$$

Più corretta

Da catalogo

$$C_{nom} = 27.5 Nm$$
$$C_{rms} = 25 Nm$$

$$C_{max} = 67 Nm$$

Dimensionamento corretto

$$I_{rms} = \sqrt{\left(\frac{C_{rms}}{k_c}\right)^2 + I_{mag}^2} = 8.75 A$$

$$I_{max} = \sqrt{\left(\frac{C_{max}}{k_c}\right)^2 + I_{mag}^2} = 20.6 A$$

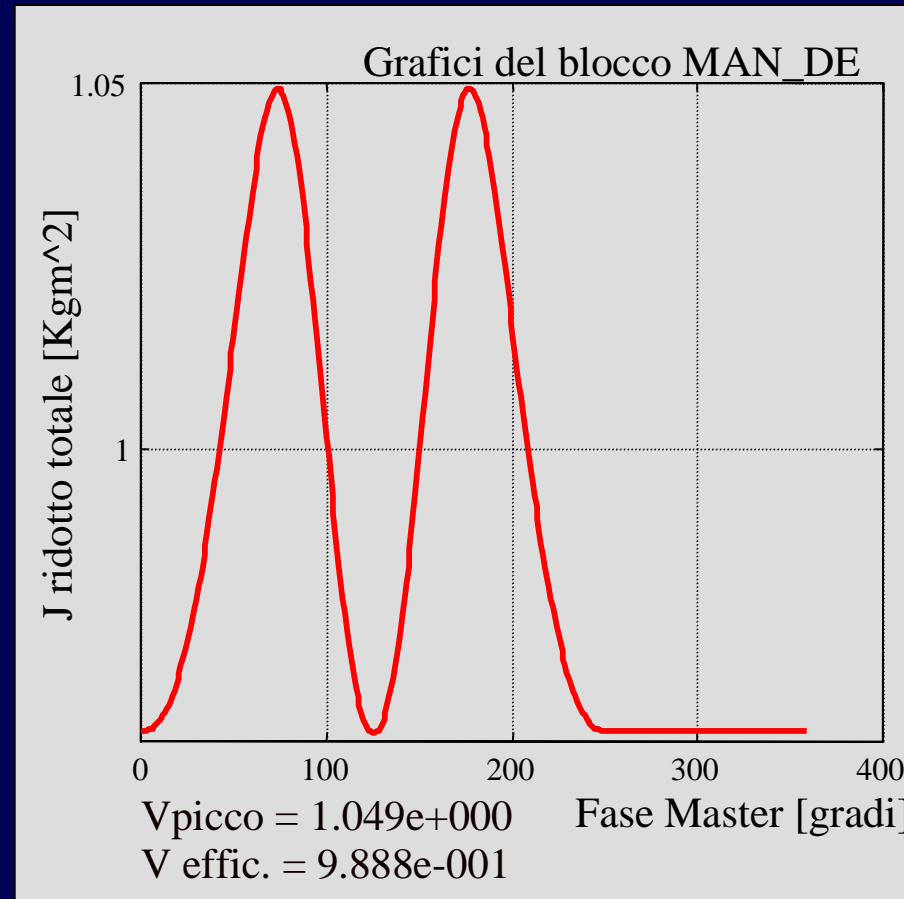
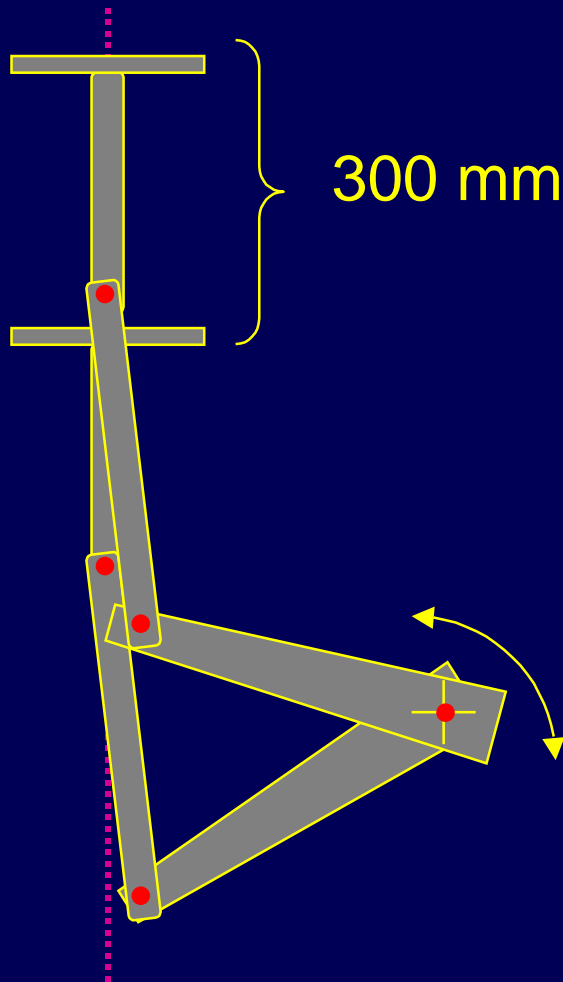
$I_{max} > 2I_{rms}$
Si dimensiona su I_{max}

Fattore di extra corrente

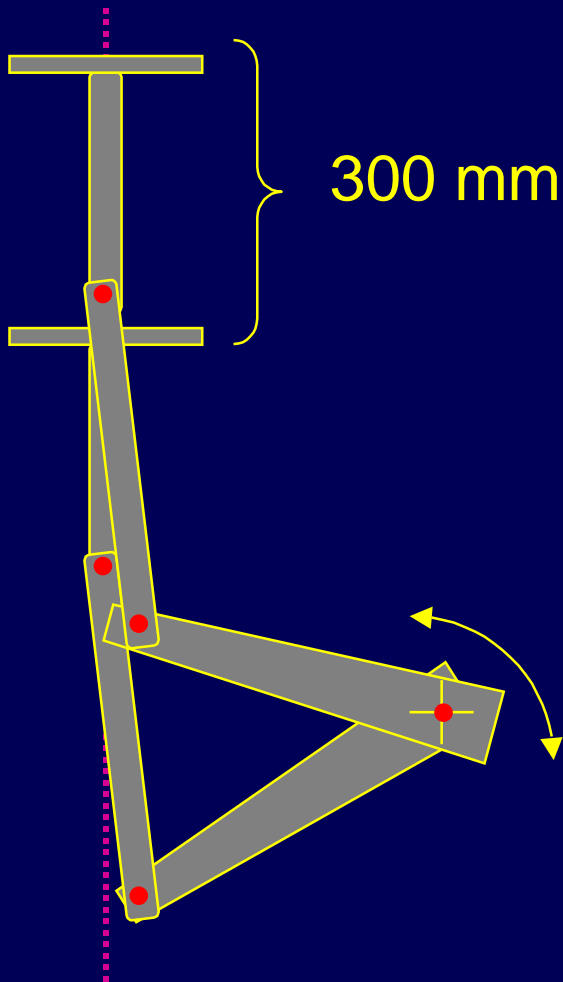
$$I_{nom\ inv} = \frac{I_{max}}{2} = 10.3 A$$

Calcolo correnti al convertitore

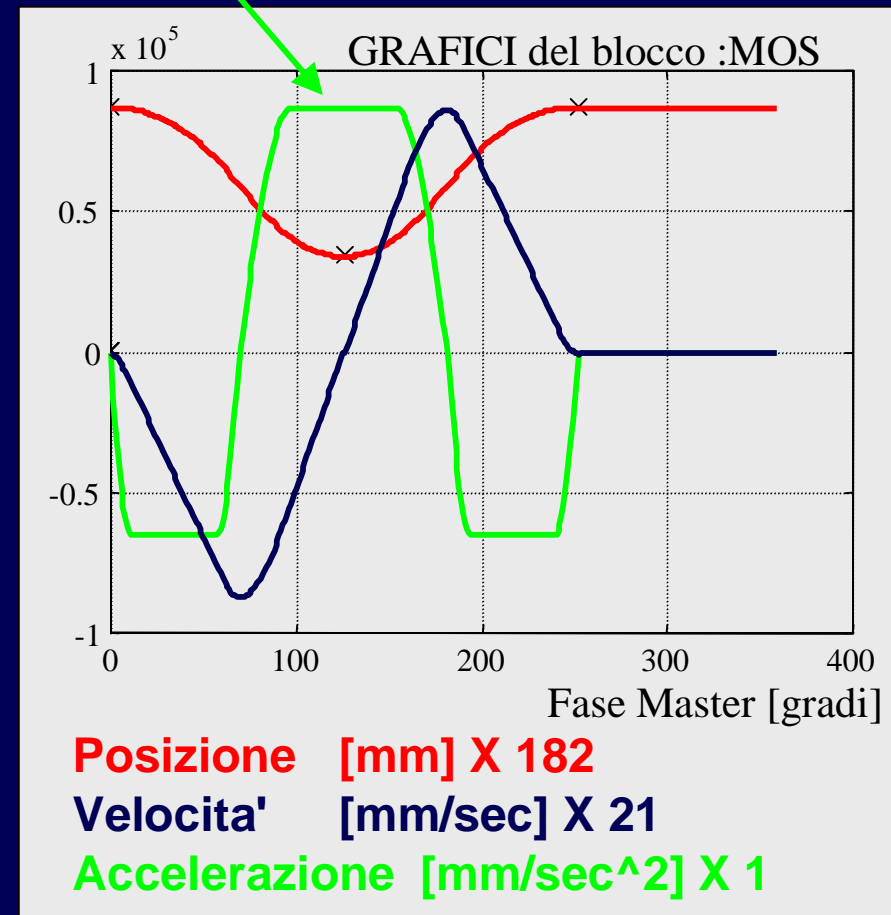
Analisi con CAD specifico



Ciclo completo

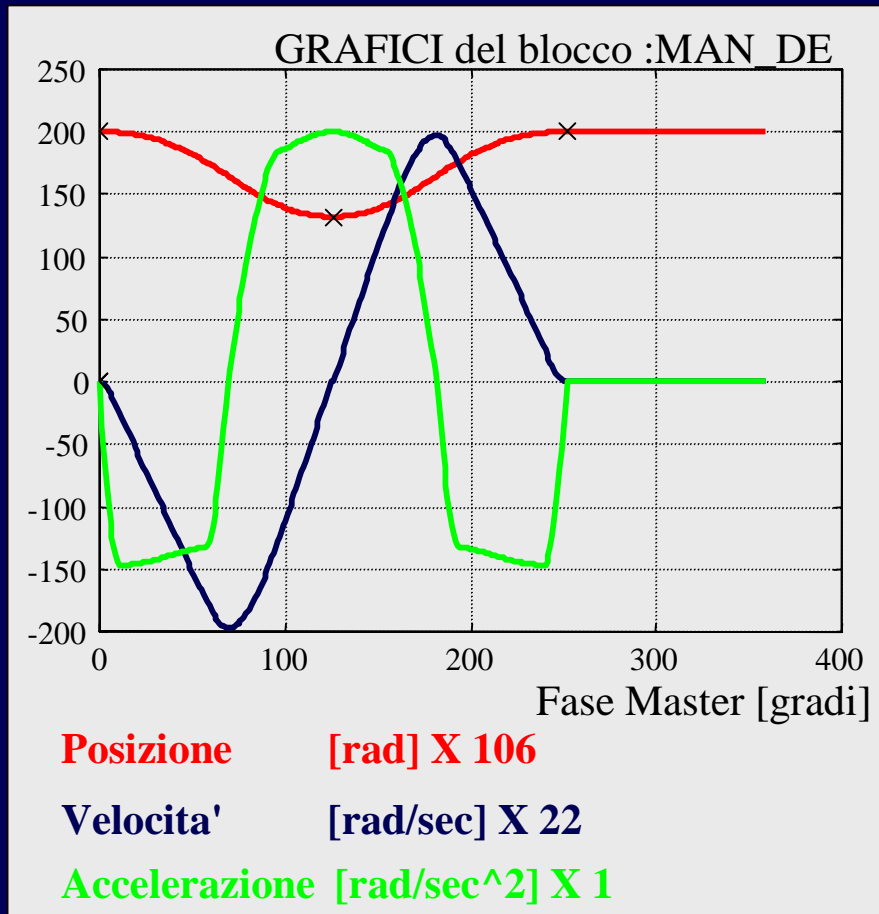


$\approx 9 \text{ g} \Rightarrow$ problema difficile

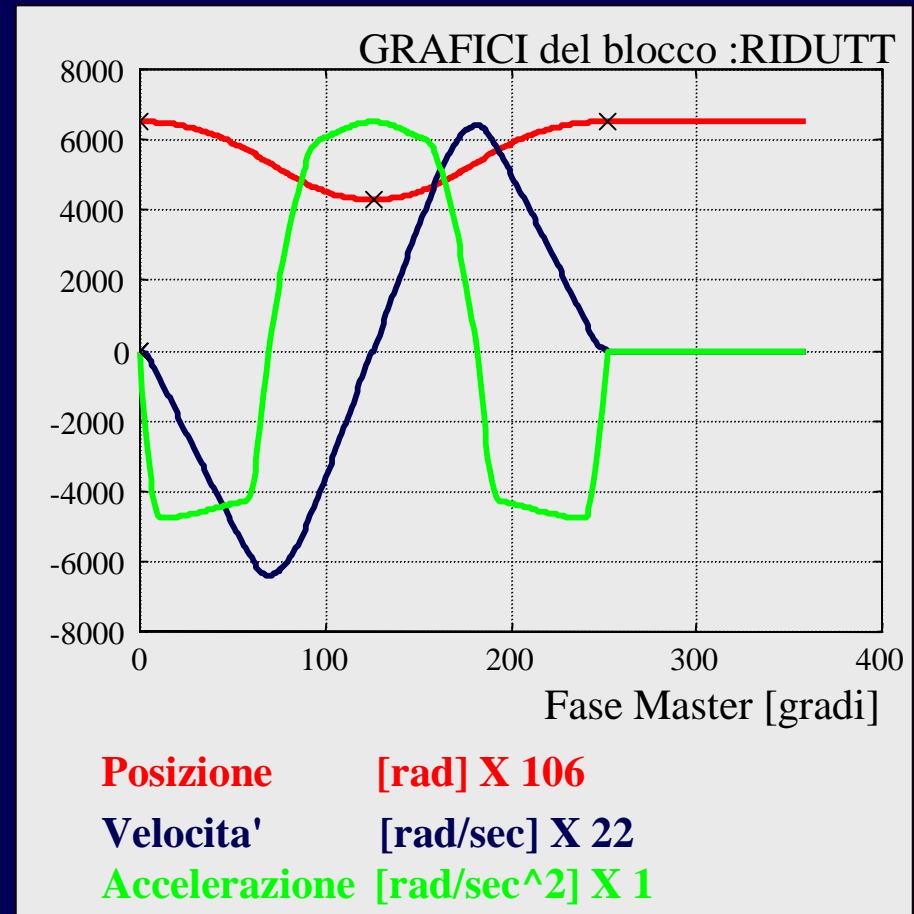


Profilo cicloidale di moto

grandezze cinematiche

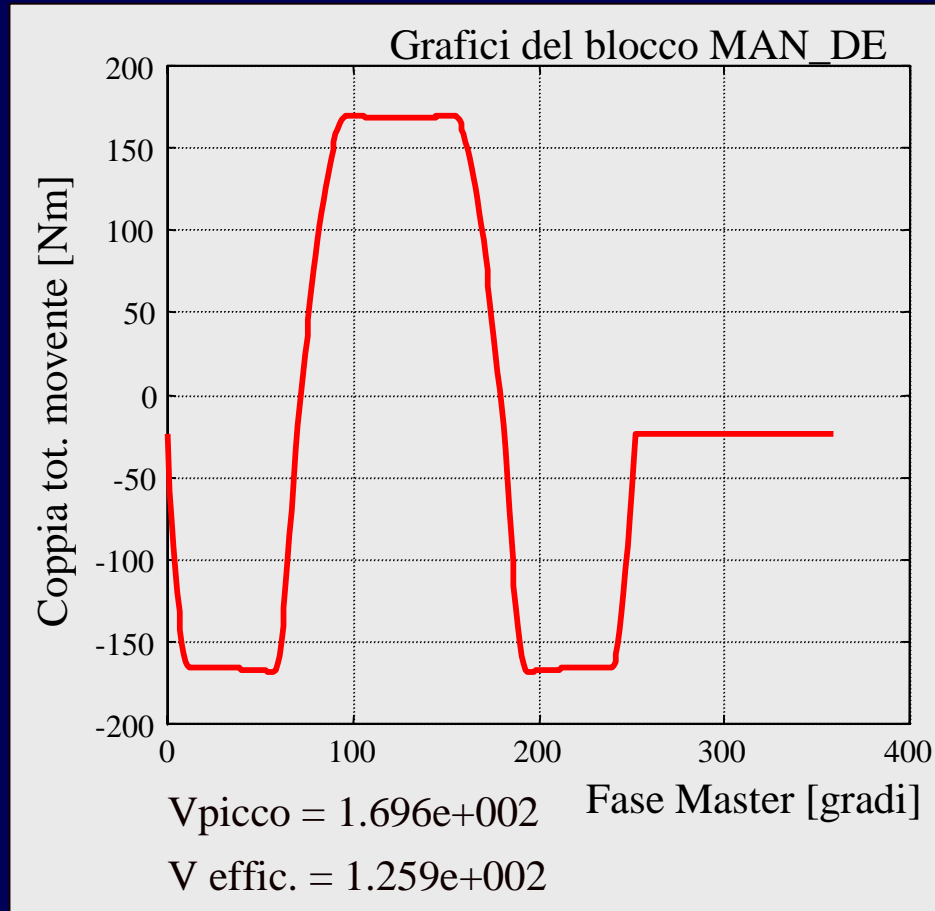


al manovellismo di spinta

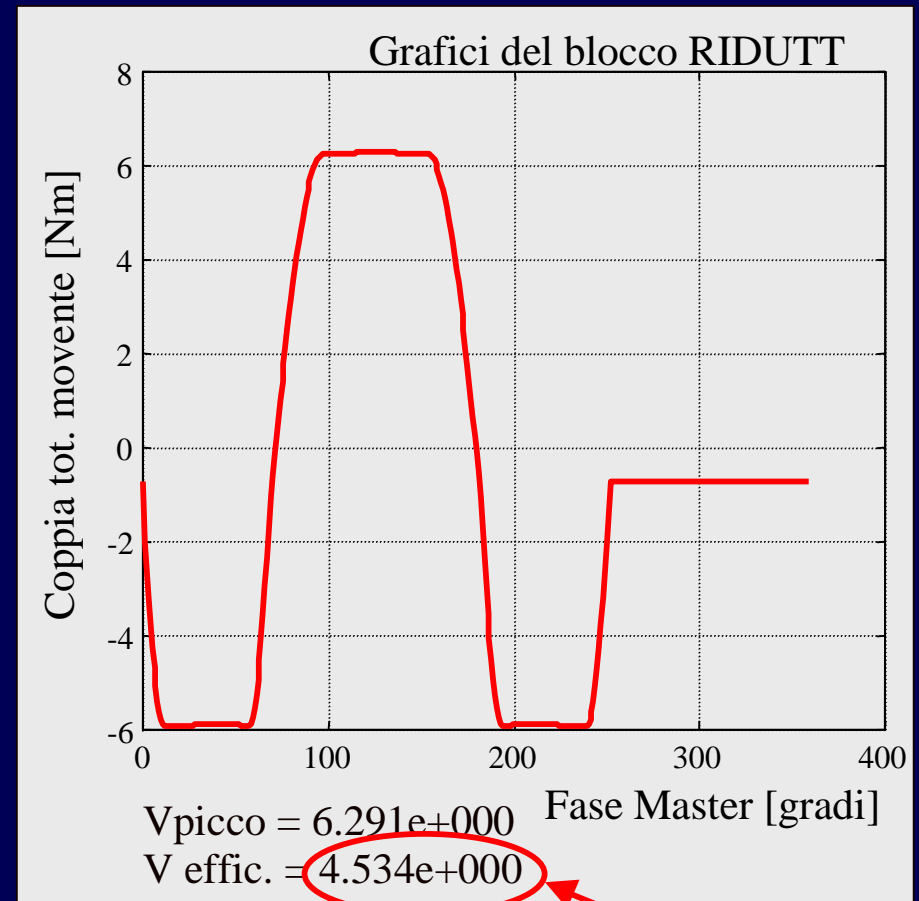


al motore (300 rad/s)

grandezze dinamiche

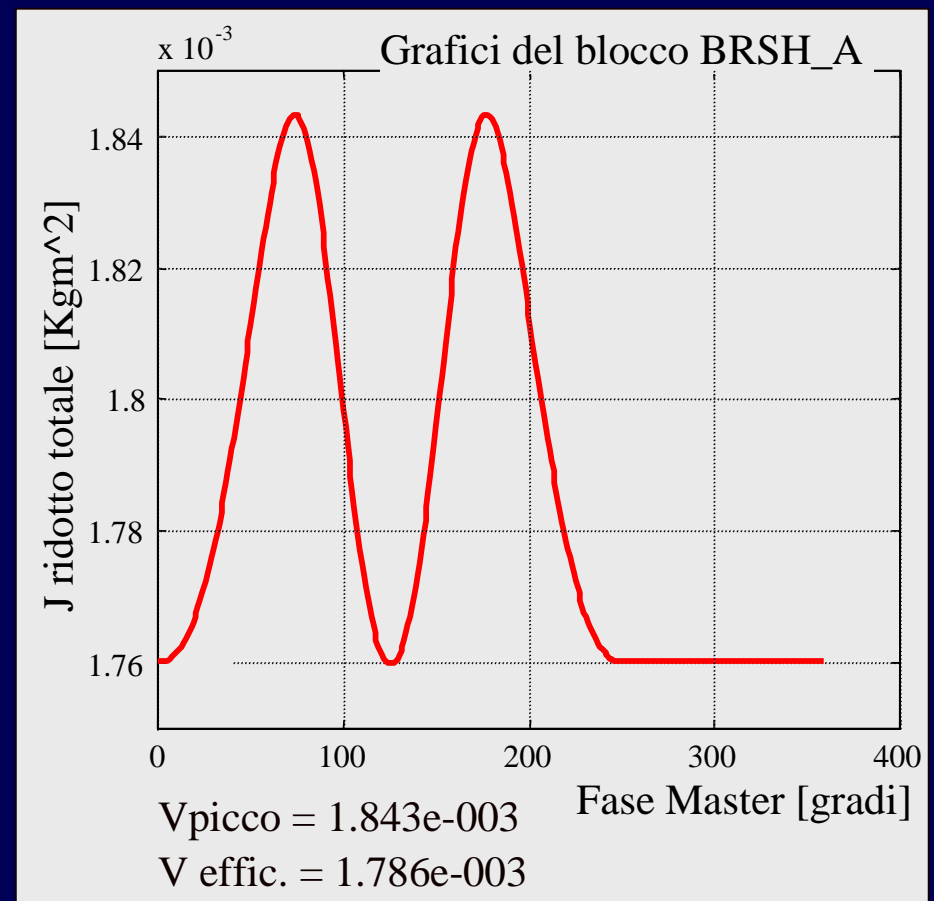
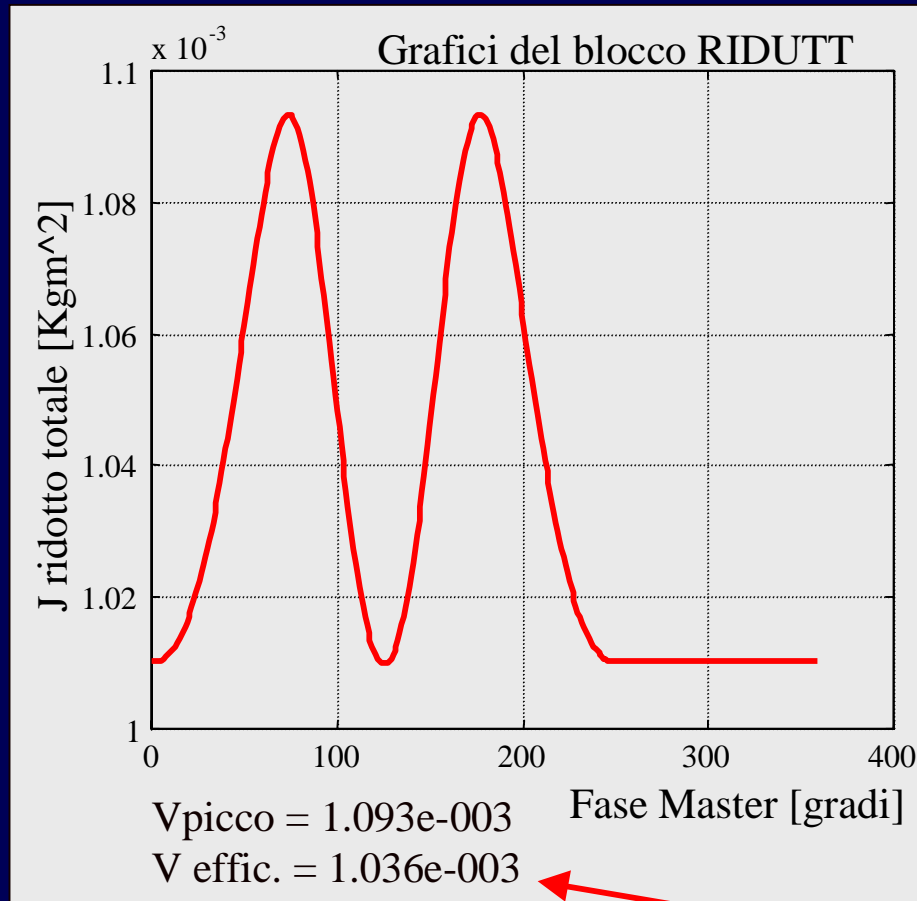


al manovellismo di spinta



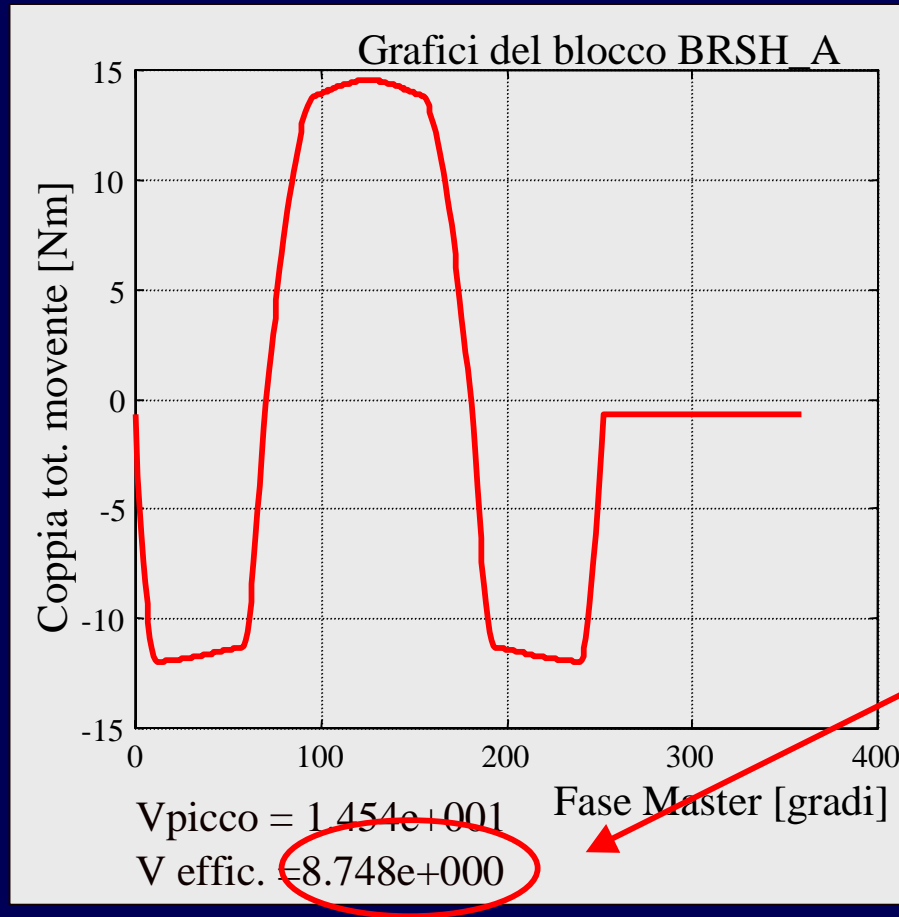
al riduttore $\times 2$

inerzia



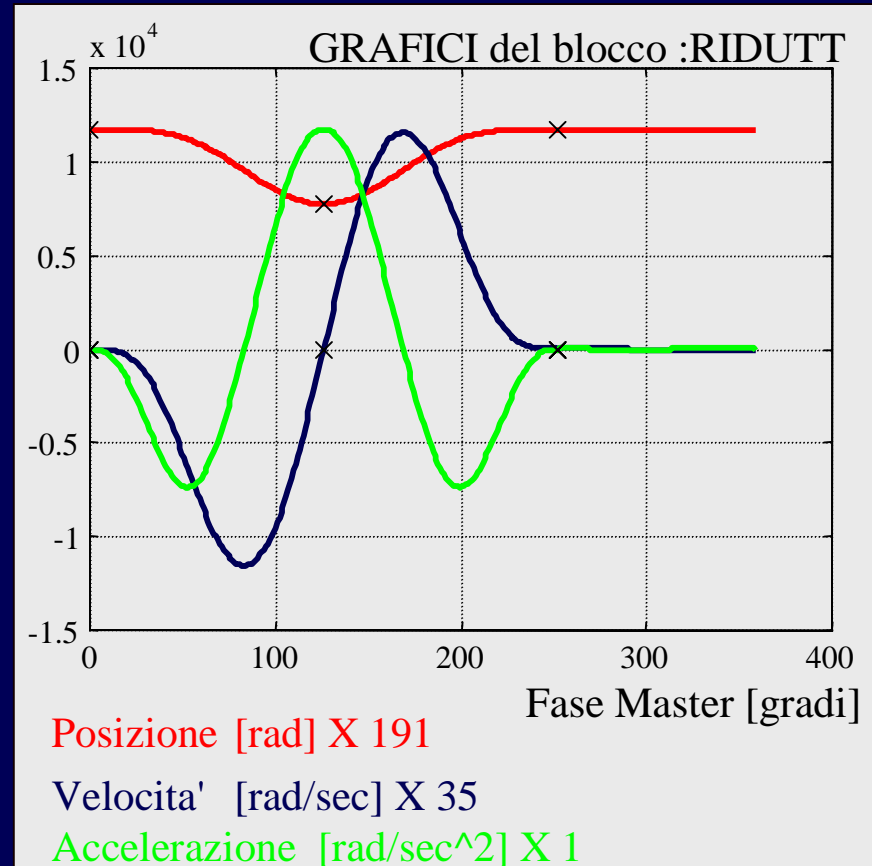
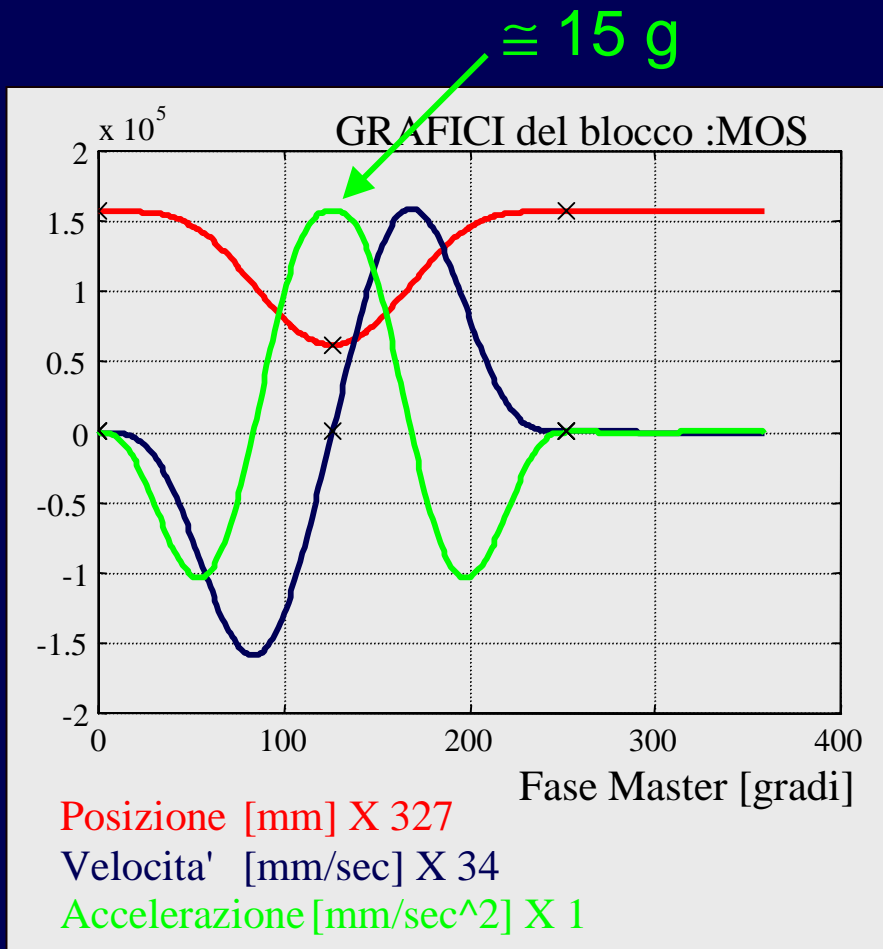
totale al riduttore

Brushless a bassa inerzia
 $9 \text{ Nm} - J_m = 0.00075 \text{ Kgm}^2$



Dimensionamento O.K.

Coppia al motore



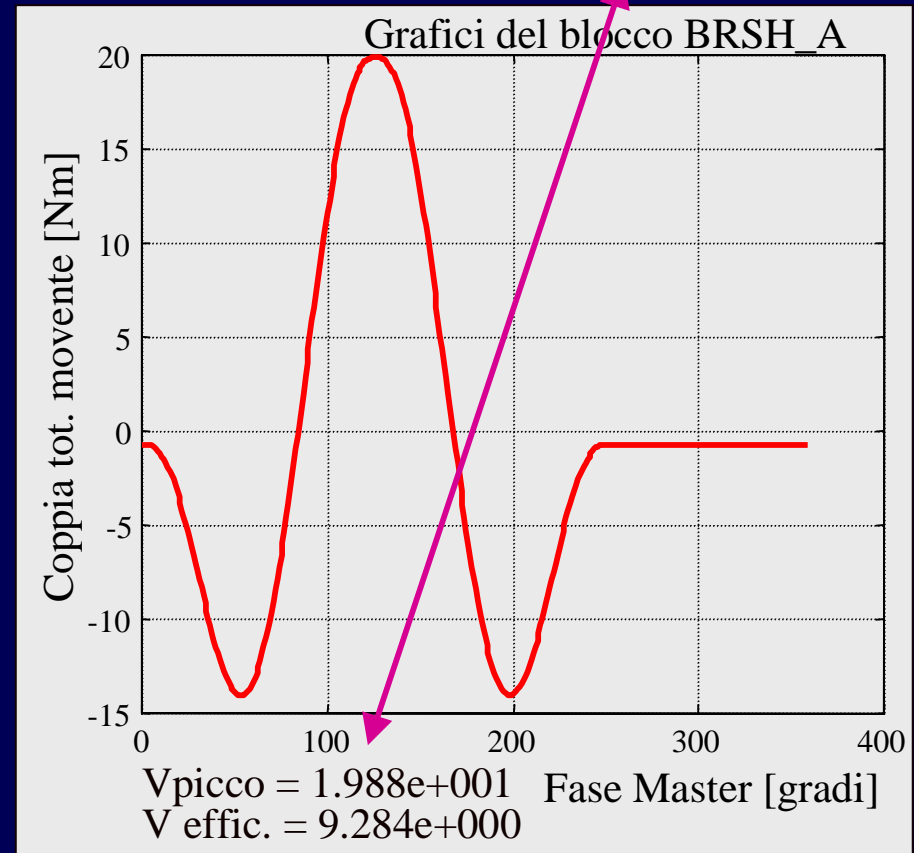
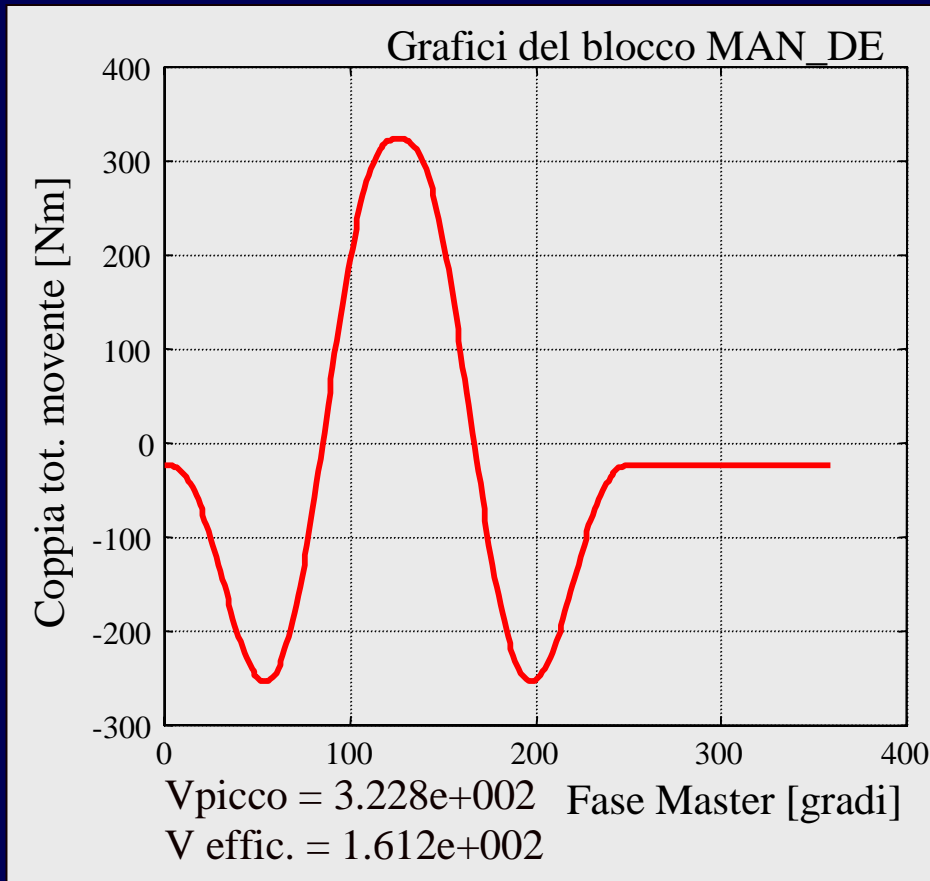
profili con splines

più dolci

> accelerazione e velocità massime

coppie

C_{eff} simile
maggiore rapporto $C_{\text{max}}/C_{\text{eff}}$

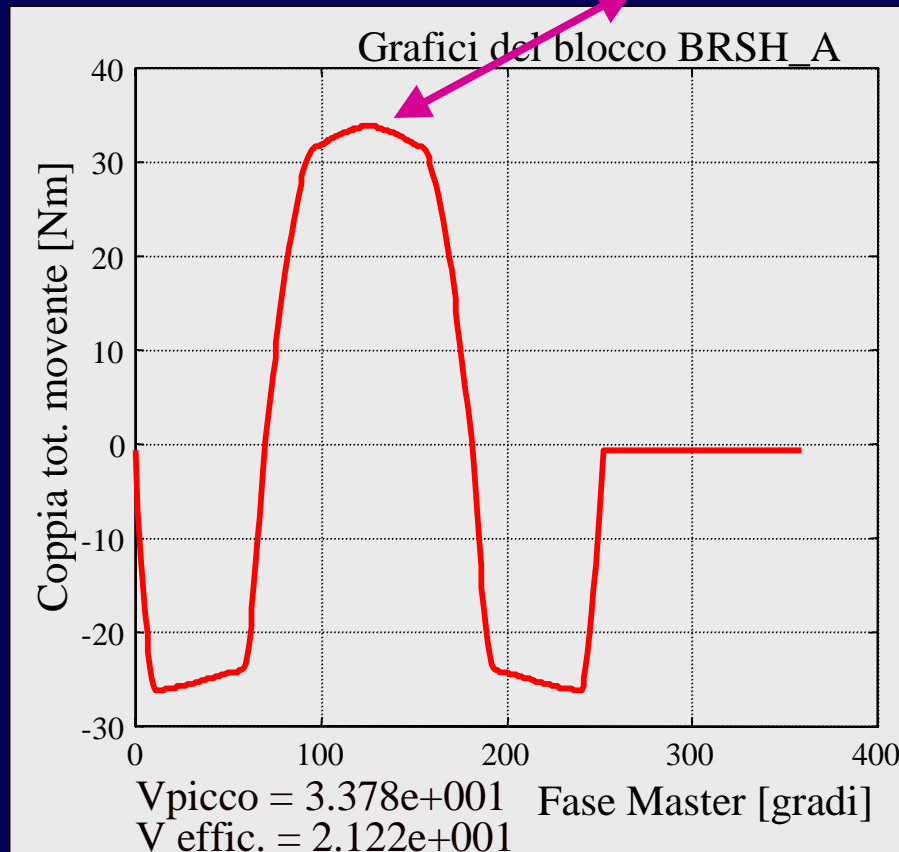


al manovellismo di spinta

al motore

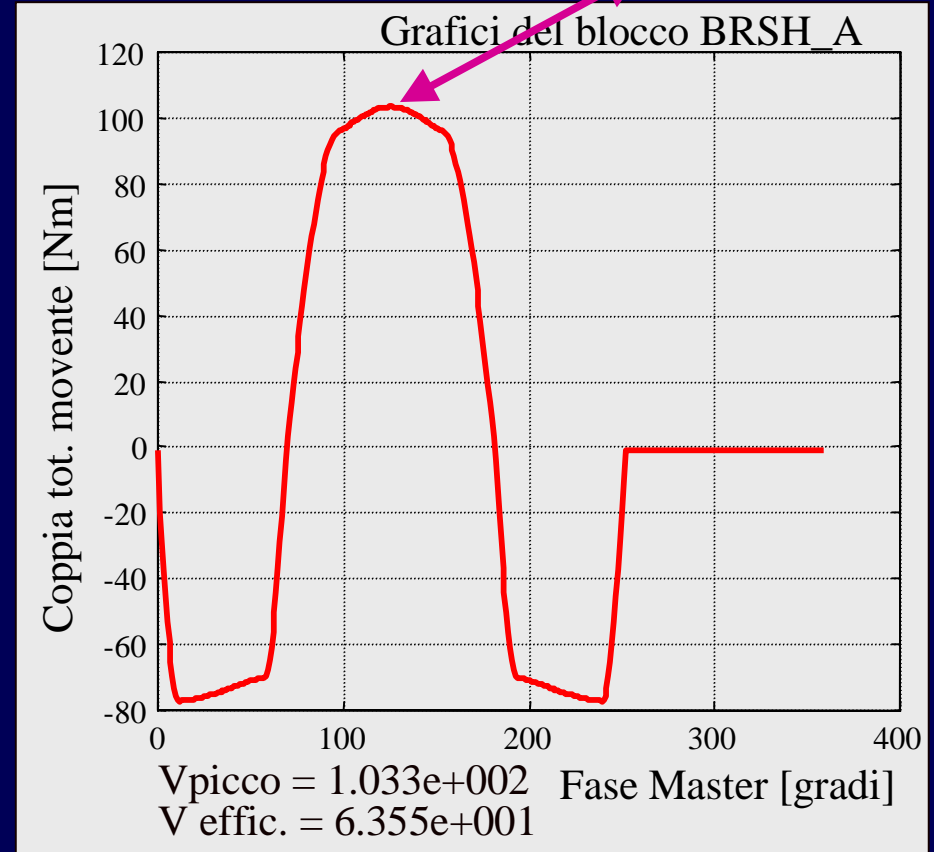
con motore Brushless standard

$$J_m = 0.0043 - C_m = 10.4 \text{ Nm}$$



inadeguato

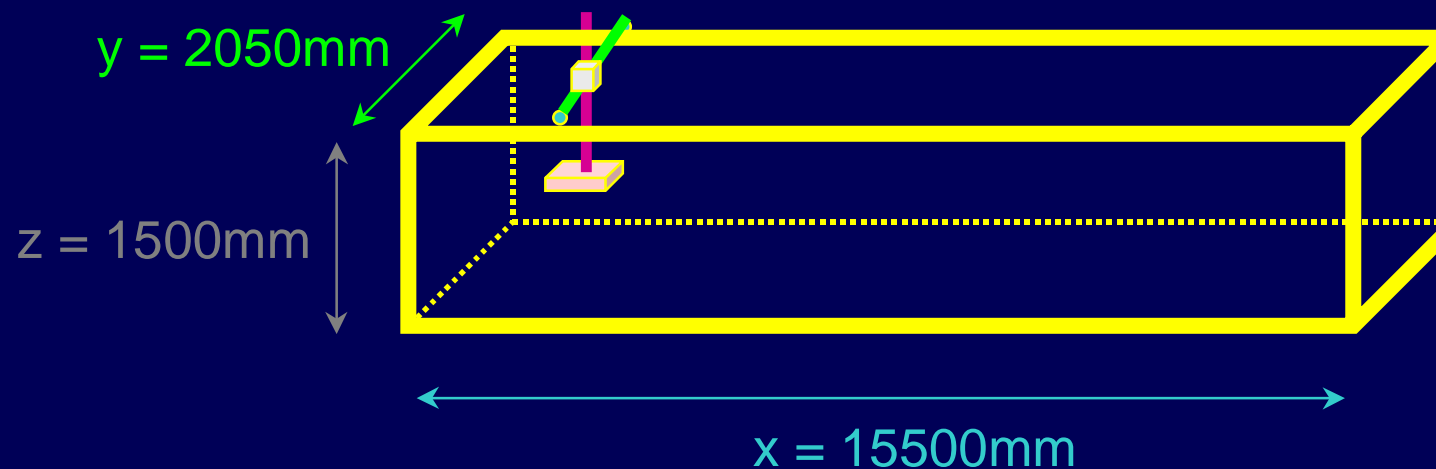
$$J_m = 0.015 C_m = 30 \text{ Nm}$$



problema senza soluzione

Esempi di dimensionamento

Pallettizzatore cartesiano a tre gradi di libertà

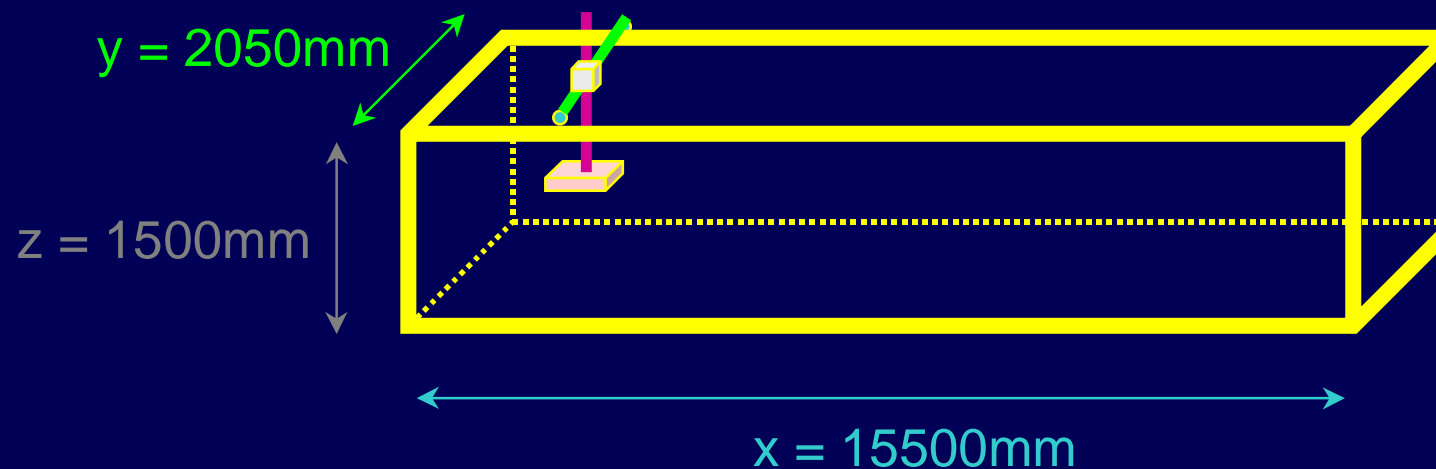


Cicli variabili continuamente

- dimensionamento sul ciclo medio
- non completamente accurato

Esempi di dimensionamento

Pallettizzatore cartesiano a tre gradi di libertà

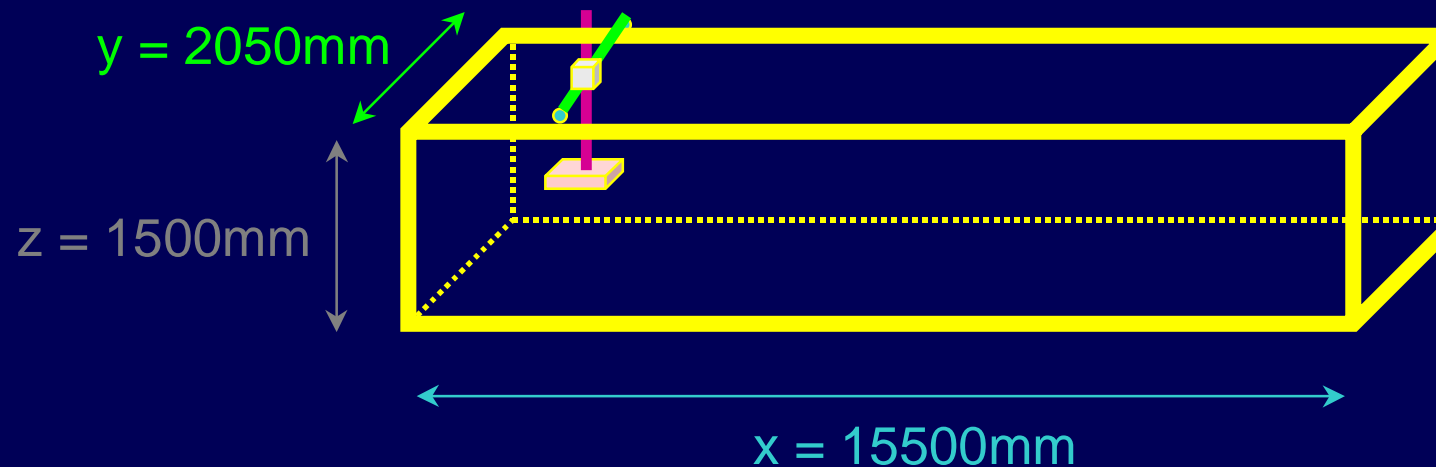


Caratteristiche generali

| | Asse x |
|---------------|----------------------|
| Velocità max | 2 m/s |
| Corsa media | 1000mm |
| Accelerazione | 1.66m/s ² |
| Massa totale | 900Kg |

Esempi di dimensionamento

Pallettizzatore cartesiano a tre gradi di libertà

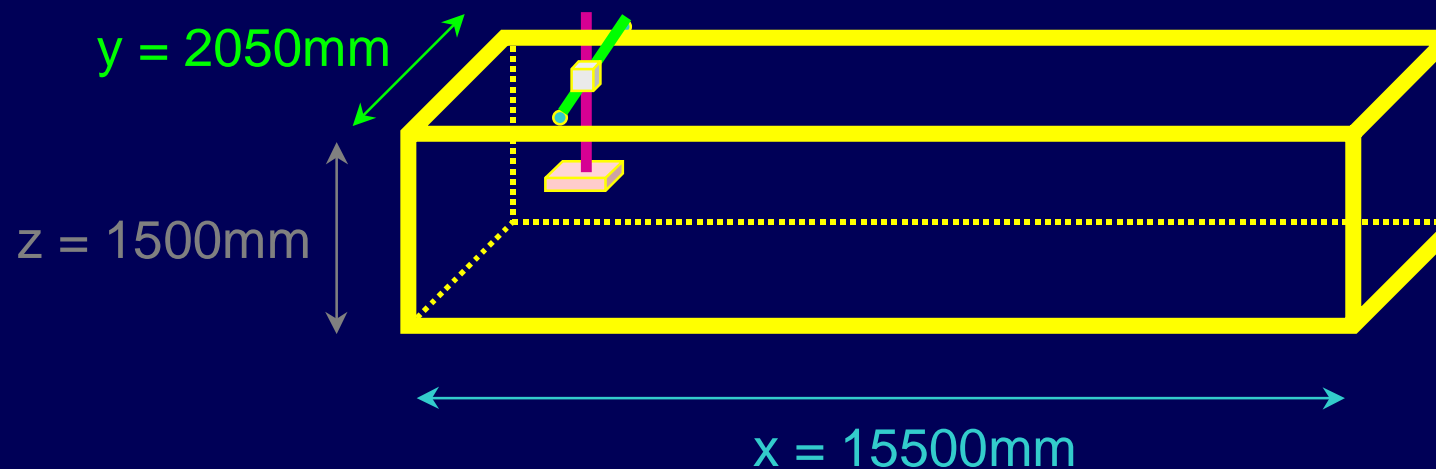


Caratteristiche generali

| | Asse x | Asse y |
|---------------|----------------------|-------------------|
| Velocità max | 2 m/s | 1.66m/s |
| Corsa media | 1000mm | 1450mm |
| Accelerazione | 1.66m/s ² | 2m/s ² |
| Massa totale | 900Kg | 500Kg |

Esempi di dimensionamento

Pallettizzatore cartesiano a tre gradi di libertà

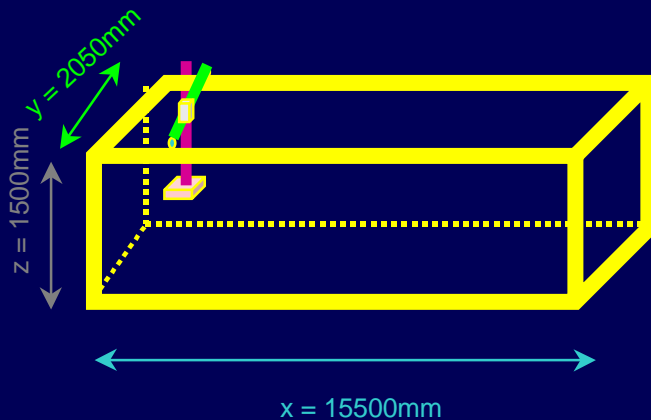


Caratteristiche generali

| | Asse x | Asse y | Asse z |
|---------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| Velocità max | 2 m/s | 1.66m/s | 1.33m/s |
| Corsa media | 1000mm | 1450mm | 450mm |
| Accelerazione | 1.66m/s ² | 2m/s ² | 2.2m/s ² |
| Massa totale | 900Kg | 500Kg | 350Kg |

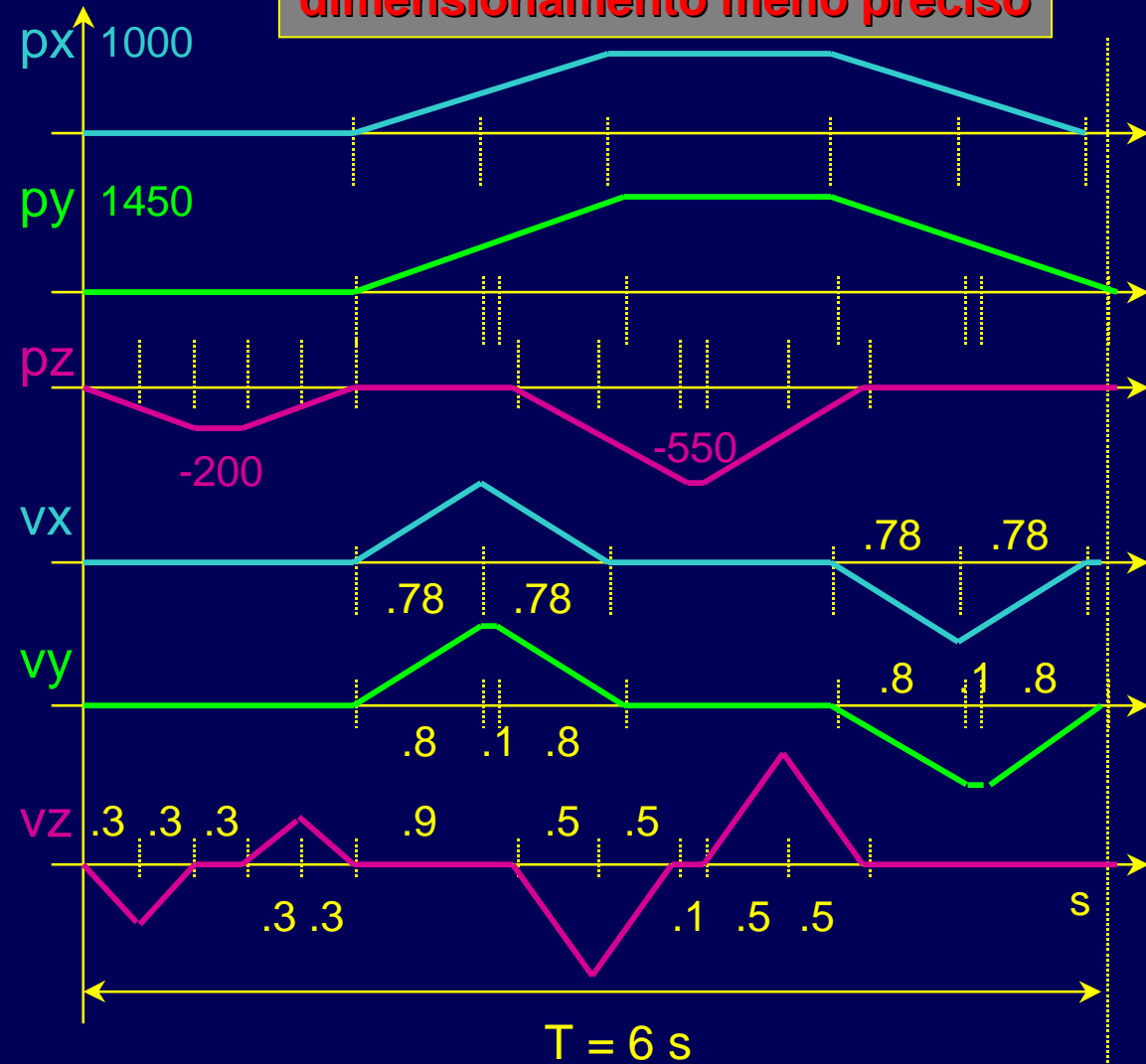
Esempi di dimensionamento

Pallettizzatore cartesiano



| | |
|-------------------|--------------------------|
| $\delta_x = 0.52$ | $\sqrt{\delta_x} = 0.72$ |
| $\delta_y = 0.53$ | $\sqrt{\delta_y} = 0.73$ |
| $\delta_z = 0.53$ | $\sqrt{\delta_z} = 0.73$ |

Ciclo di servizio medio
dimensionamento meno preciso



Pallettizzatore

■ Scelta del tipo di azionamento

→ movimenti ciclici

- cicli di servizio abbastanza stressato ($\delta = 0.5$) e variabile
- è richiesta discreta precisione di posizionamento

■ Soluzioni possibili

→ azionamenti con motore sincrono sinusoidale

- soluzione standard

→ azionamenti con motore ad induzione

- con controllo ad Inverter

+ poco adatto al posizionamento

- con controllo vettoriale

+ leggera preferenza per la taglia di potenza rispetto al sincrono

+ in prospettiva dovrebbe essere più economico

■ Dimensionamento

→ come per il caso precedente

Azionamenti Elettrici

Parte 4

Esempi di Scelta e
dimensionamento
dell'Azionamento

FINE

Prof. Alberto Tonielli

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-6443024

E-mail: atonielli@deis.unibo.it