

**FORMULARIO**  
**per applicazioni con i convertitori**

**comprende**  
**Esempi pratici**

**e**  
**Tavole di Conversione**

Copyright

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo, elettronico o meccanico compresa la fotocopiatura, la registrazione o qualsiasi altro sistema di memorizzazione delle informazioni senza preventiva autorizzazione scritta dell'editore.

1994 © Control Techniques Drives plc UK

Part number

Revisione No 1

Ottobre 1994

# Indice

<b>Indice</b>	2 e 3
<b>Unitá SI</b>	4 e 5
<b>Principi</b>	
Massa, peso e forza	7
Sollevamento	11
Attrito	11
Coppia	11
Coppia e Tensione	13
Momento di inerzia	14
Riduttori - velocitá, coppia e inerzia	16
Momento di inerzia riportato all'albero motore	18
Coppia accelerante	19
Coppia e potenza in funzione della velocitá (figura)	20
Coppia e potenza	21
Procedure di calcolo	22
<b>Esempi applicativi</b>	
1 Trasportatore	24
2 Trasportatore inclinato	33
3 Sollevatore	34
4 Carico con avanzamento a vite	41
5 Frenatura e resistori di frenatura	42
6 Armadi per drives	47
<b>Formule</b>	52
<b>Fattori di conversione</b>	62
<b>Glossario</b>	68

## Indice delle formule

### Electriche

Generali	52
Impedenza	52
Potenza	52
Rendimento	52
Fattore di potenza	53
Contenuto armonico della tensione (fattore di distorsione)	53
Contenuto armonico della corrente (fattore di distorsione)	53
Contenuto di tensione della frequenza fondamentale	53
Contenuto di corrente della frequenza fondamentale	53
Fattore di sfasamento	53
Contenuto ideale AC della tensione DC con angolo di ritardo nullo	54
Contenuto ideale AC della tensione DC con angolo di ritardo $\alpha$	54
Relazioni trifase	54
Connessione a stella	54
Connessione a triangolo	54
Potenza	54
Corrente Magnetizzante	54
<b>Meccanica</b>	
Movimento lineare	55
Distanza, velocità, accelerazione e tempo	55
Forza, lavoro, energia e potenza	55
Movimento rotatorio	56
Sfasamento, velocità accelerazione e tempo	56
Momento di inerzia	57
Forza, lavoro, energia e potenza	59
Rapporto di riduzione	61
Inerzia totale all'albero motore	61

## Indice delle Formule

Forza accelerante	55
Accelerazione lineare	55
Accelerazione rototativa	56
Contenuto - AC ideale	54
Contenuto - frequenza fondamentale	53
Contenuto - armoniche	53
Connessione a triangolo	54
Fattore di sfasamento	53
Sfasamento rotatorio	56
Distanza lineare	55
Rendimento	52
Fattore di sfasamento	53
Fattore di potenza	53
Contenuto di frequenza fondamentale di corrente	53
Contenuto di frequenza fondamentale di tensione	53
Riduttore	61
Contenuto armonico di tensione (fattore di distorsione)	53
Contenuto armonico di corrente (fattore di distorsione)	53
Contenuto ideale AC di tensione DC con un ritardo angolare $\alpha$	54
Contenuto ideale AC di tensione DC con ritardo angolare nullo	54
Tensione DC controllata idealmente	54
Impedenza	52
Energia cinetica	55,60
Distanza lineare, accelerazione, velocità e tempo	55
Forza lineare, lavoro, energia e potenza	55
Corrente magnetizzante	54
Momento di inerzia	57
Potenza	52,54
Fattore di potenza	53
Potenza, movimento lineare e rotatorio	60
Potenza per pilotaggio pompe	61
Sfasamento angolare, velocità, accelerazione e tempo	56
Forza angolare, lavoro, energia e potenza	59
Connessione a stella	54
Relazioni per sistemi trifase	54
Tempo di accelerazione	59
Coppia di accelerazione	59
Inerzia totale all'albero motore	61
Velocità lineare	55
Velocità angolare	56
Lavoro	56

## Grandezze elettriche

<i>Simbolo</i>	<i>Grandezza</i>	<i>Unitá</i>
<i>SI</i>		
C	Capacitá	F
f	Frequenza	Hz
g	Contenuto di frequenza fondamentale	
G	Conduttanza	S
I	Corrente	A
k	Fattore di distorsione	
L	Induttanza	H
n	Velocitá angolare	rad s <sup>-1</sup>
p	Numero di poli	
P	Potenza reale (attiva)	W
Q	Potenza reattiva	var
R	Resistenza	$\Omega$
S	Potenza totale (apparente)	VA
W	Energia	J,Ws
U	Differenza di potenziale	V
$X_C$	Reattanza capacitiva	$\Omega$
$X_L$	Reattanza induttiva	$\Omega$
Z	Impedenza	$\Omega$
$\alpha$	Angolo di ritardo	gradi
$\Delta$	Differenza tra due quantitá qualsiasi	
$\lambda$	Fattore di potenza	
$\cos \phi$	Fattore di sfasamento, angolo di fase tra tensione e corrente	
$\omega$	frequenza angolare	rad s <sup>-1</sup>

## Grandezze meccaniche

Simbolo	Grandezza	Unitá
<i>SI</i>		
a	Accelerazione (lineare)	ms <sup>-2</sup>
d	Diametro	m
F	Forza	N, kg ms <sup>-2</sup>
g	Accelerazione dovuta alla gravitá	ms <sup>-2</sup>
J	Momento di inerzia	kg m <sup>2</sup>
l	Lunghezza	m
m	Massa	kg
M	Coppia	Nm
n	Velocitá, angolare (w/2π)	riv s <sup>-1</sup>
p	Pressione	Nm <sup>-2</sup> , Pa
P	Potenza	W, Js <sup>-1</sup> , Nms <sup>-1</sup>
Q	Portata	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
r	Raggio	m
s	Spazio	m
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
v	Velocitá, lineare	ms <sup>-1</sup>
w	Forza	N
W	Energia (1/2 mv <sup>2</sup> o mgh)	kgm <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> , J, Ws, Nm
α	Accelerazione, angolare	rad s <sup>-2</sup>
Δ	Differenza tra due quantitá qualsiasi	
γ	Angolo (piano)	rad
η	Rendimento	
∞	Coefficiente d'attrito	
ρ	Densitá	kgm <sup>-3</sup>
ω	Velocitá angolare (2πn)	rads <sup>-1</sup>

Il Newton é l'unitá SI di forza.

Un Newton produce una accelerazione unitaria su di una massa unitaria

Un Newton metro = un watt al secondo = un Joule

L'accelerazione di gravitá terrestre é = 9.807 ms<sup>-2</sup>

## Introduzione

L'editore e coloro che hanno curato il contenuto di questo manuale sperano che i lettori trovino in esso una guida pratica ed utile che, grazie alle dimensioni tascabili, possa essere sempre a portata di mano.

Spesse volte ci si trova incerti di fronte ai concetti di peso, massa, forza, coppia e potenza.

La causa può essere identificata da una non sicura padronanza di concetti base. La prima parte di questo manuale è quindi dedicata alla introduzione a questi concetti ed alle possibili applicazioni degli stessi. Raccomandiamo di assimilare il più possibile questi concetti affinché la padronanza possa sostituirsi all'incertezza.

Il contenuto di questo manuale è stato verificato con attenzione per garantirne la correttezza, ma nessuna responsabilità può essere assunta circa i risultati derivanti dall'applicazione dei dati e delle formule. Se comunque alcuni dubbi persistessero, il lettore è invitato a mettersi in contatto con la più vicina sede Control Techniques.

## Simboli ed Unità

In questa pubblicazione, i simboli SI sono rappresentati in corsivo, es. *P* per potenza. Le Unità sono stampate in carattere normale, es: W per watts.

*m* (corsivo) è il simbolo SI per le *masse*, unità: kilogrammi  
m (normale) è l'unità SI (metro) di *lunghezza*

*J* (corsivo) è il simbolo SI per il *momento di inerzia*, unità kg m<sup>2</sup>  
J (normale) è l'unità SI (joule) di *energia*

Evidentemente possono essere commessi errori se la differenza non viene chiaramente identificata.

Nella sezione "Principi", le espressioni simboliche (corsivo) sono accompagnate dalla relativa unità SI (normale) sulla destra.

### Principi

#### Massa, Peso e Forza

Quando una quantità di sostanza, una massa, è tenuta sul palmo della mano, la sensazione che si prova è la forza esercitata dalla propria mano per contrastare la caduta della sostanza stessa. Nel linguaggio comune, questa forza è chiamata "il peso", senza alcun riferimento alla massa della sostanza.

La *Massa* esprime una proprietà inalterabile di una sostanza non correlata alla gravità. La massa di una sostanza è indipendente dalla gravità.

Il *peso* è la forza verticale esercitata da una massa soggetta ad una gravità e dipende sia dalla massa che dalla accelerazione. Il peso è una proprietà che varia al variare della gravità.

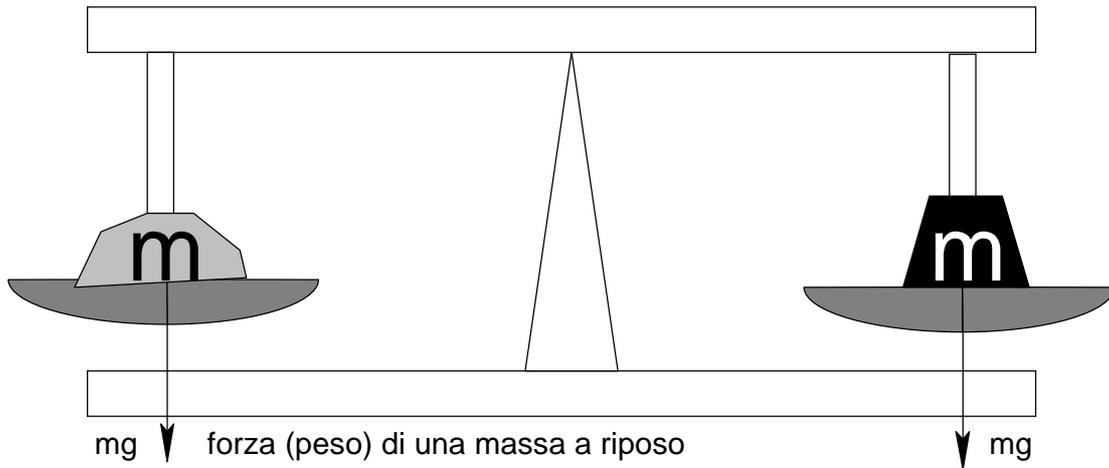
La presenza della massa può essere dimostrata con un semplice esperimento. Tenete sollevato con una mano un oggetto di una certa capienza ma leggero come per esempio un cestino per la carta straccia. Muovetelo lentamente ed orizzontalmente in modo che la gravità sia ininfluenza per il moto. Sempre muovendosi lentamente, colpite con l'oggetto l'altra mano che avrete dapprima appoggiato ad una superficie verticale e dura (es: il muro). Riempite ora l'oggetto usato in precedenza (il cestino) con l'oggetto più pesante che riuscite a trovare. Ripetete il movimento precedente (lentamente ed orizzontalmente) e la vostra mano che verrà colpita, avvertirà immediatamente la differenza confermando quindi che la massa è una quantità significativa.

Un utile esercizio potrebbe essere quello di determinare la forza richiesta per muovere orizzontalmente su di un cuscino d'aria (senza attrito) una massa e compararla con la forza necessaria per muovere la medesima massa su di una superficie ruvida (con attrito). L'intuito è sufficiente per suggerire che occorrerà meno forza per muovere la massa sul cuscino d'aria

## Principi

---

### 1 Massa e forza - effetto dell'attrazione gravitazionale



Quello che invece probabilmente non è così facilmente identificabile con l'intuito e' quella conosciuta come Legge del moto di Newton. (pag. 10) il cui enunciato dice che: "una massa non soggetta a forze (es: l'attrito e la resistenza dell'aria) persiste nello stato di quiete o si muove di moto rettilineo uniforme.

In altre parole una massa soggetta ad attrito tenderá a rallentare il suo moto fino a fermarsi.

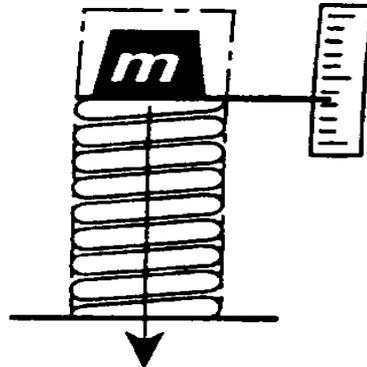
La ragione di questa differenza é che, su di un cuscino d'aria, la forza di accelerazione orizzontale é esclusivamente funzione della massa. Muovendosi su di un corpo a basso coefficiente di attrito, il suo peso non ha effetto.

Se invece facciamo strisciare la massa su di una superficie ruvida, si produce una forza di attrito che si oppone al moto. la forza necessaria per produrre una accelerazione orizzontale pari a quella ottenuta precedentemente sul cuscino d'aria, é funzione sia della massa che del peso.

Lo strumento piú efficace per la comparazione di masse é la bilancia a braccia uguali (fig. 1).

L'accelerazione di gravitá agisce su entrambi i piatti, ma il suo effetto si annulla a paritá di masse.

- 2 il peso é una forza, funzione della massa e della accelerazione di gravità



Misura di massa in kilogrammi, ma spesso identificata come peso

Peso reale =  $mg$  Newton (N)

Utilizzando una bilancia a molla, in effetti si misura il *peso* poiché la *massa* soggetta alla accelerazione di gravità causa la deformazione della molla Fig. 2, ma solitamente la scala é tarata per valori di *massa* in Kg.

La confusione tra massa e peso deriva dall' incorretto utilizzo delle due parole nella lingua parlata allorquando si utilizza la parola "peso" con significato di massa.

É perfettamente corretto dire che gli orologi a pendolo funzionano grazie all'azione del peso.

Un orologio richiede una certa forza per essere azionato e la forza puó essere fornita da una massa sospesa il cui peso aziona il meccanismo. É invece assolutamente errato dire che "il peso del rotore é di ..... kilogrammi". Il peso é una forza pari al prodotto di una massa (kg) per una accelerazione ( $m/s^2$ ). L'unitá di misura delle forze é il Newton (N).

Sfortunatamente anche su alcune letterature tecniche é possibile trovare la parola peso utilizzata impropriamente per massa.

Occorre quindi ricordare che se i dati vengono espressi in kg si sta parlando di *massa* e non di *peso*.

## Principi

---

Anche il calcolo del coefficiente di una molla dovrebbe essere calcolato in newton per unità di lunghezza di deformazione (N m) , ma è abbastanza comune in questo caso trovare l' unità 'kgf' ed è quindi di estrema importanza prestare attenzione.

Il termine 'kgf' (Kilogrammo- forza) è qualche volta usato per indicare una forza piuttosto che indicare una forza esclusivamente dovuta all'attrazione gravitazionale. Questo modo non univoco di determinare i valori deve essere evitato tenendo conto che l'unità kgf non è riconosciuto dal Sistema Internazionale (S. I.). Per esempio, se una molla ha un coefficiente di 10 kgf per centimetro, significa che si comprime di 0.01m se sollecitata con una *massa* di 10Kg nel campo gravitazionale terrestre.

Una massa a riposo o in movimento è sottoposta alle leggi di Newton sul moto, che definiscono anche il concetto di forza

1. Un corpo permane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme in presenza di un sistema di forze agente su di esso di risultante nulla
2. Il valore del cambiamento del momento prodotto dall'applicazione di una forza è proporzionale alla forza, e la variazione del momento avviene secondo la direzione di applicazione della forza.
3. Azione e reazione sono uguali ed opposte

Una forza  $F$  che agisce su una massa  $m$  produce una accelerazione  $a$ .

La seconda legge di Newton espressa utilizzando i *simboli* SI, diventa:

$$F = ma \quad \text{N}$$

dove  $m$  è misurata in kilogrammi  
e  $a$  è misurata in metri al secondo quadrato

### Sollevamento

Dovendo sollevare una massa, occorre far subire al corpo una accelerazione tale da portarlo da una velocità nulla (stato di quiete) alla velocità desiderata di sollevamento, tenendo conto della presenza inevitabile dell'effetto del campo gravitazionale. Per esempio per accelerare un corpo a riposo fino a portarlo ad una velocità  $v$  (calcolata in m/sec) in tempo  $t$  (calcolato in secondi) bisogna imporre una accelerazione media data da  $v/t$  (m/sec<sup>2</sup>) e quindi applicare una forza determinabile con la seguente formula

$$F = m \times v/t \quad \text{N}$$

Tenendo però conto anche della accelerazione di gravità che deve essere contrastata, poiché ha verso opposto, l'espressione per la forza totale richiesta è

$$\begin{aligned} F &= m v/t + mg & \text{N} \\ &= m (v/t + g) & \text{N} \end{aligned}$$

### Attriti

La forza orizzontale  $F_f$ , richiesta per vincere l'attrito, si ricava moltiplicando il coefficiente di attrito  $\mu$ , per il peso del corpo, ottenendo così il valore della forza resistente provocata dal movimento reciproco delle due superfici a contatto.

$$F_f = m g \mu \quad \text{N}$$

### Coppia

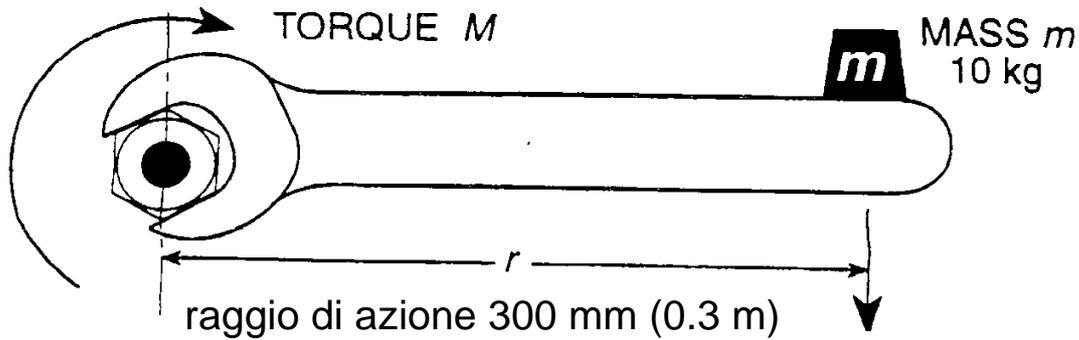
Si definisce *coppia* o *momento* una forza in grado di mettere in rotazione un corpo che agisce per mezzo di un braccio di leva o un raggio. Il simbolo nel S. I. è  $M$  e l'unità di misura è il Nm.

Facendo riferimento alla fig. 3, il valore della coppia o momento è dato dal prodotto tra una forza  $F$  ed il raggio  $r$  di una leva con cui si agisce, secondo l'espressione

$$M = F r \quad \text{Nm}$$

Un tipico esempio dove viene richiesto l'utilizzo di una coppia è dato dal funzionamento di un nastro trasportatore (fig. 4). Per calcolare il valore della coppia, si deve partire considerando la forza  $F$ , di sole componenti orizzontali, richiesta per accelerare la massa  $m$ .

### 3 Coppia applicata da una forza



$$\begin{aligned} \text{coppia } M &= 10 \times 9.81 \times 0.30 \\ &= 29.4 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Forza } F &= 10 \times 9.81 \\ &= 98.1 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Inoltre bisogna ricordarsi che se nel sistema considerato, non ci sono forze di attrito o altre forze resistenti al moto, una volta che la massa  $m$  è stata messa in movimento, non occorre applicare nessuna forza per mantenerla in movimento (vedi prima legge di Newton). Pertanto è necessaria soltanto una forza  $F$  per portare alla velocità  $v$  il corpo che era nello stato di quiete (dove  $v=0$ ). La formula da applicare è

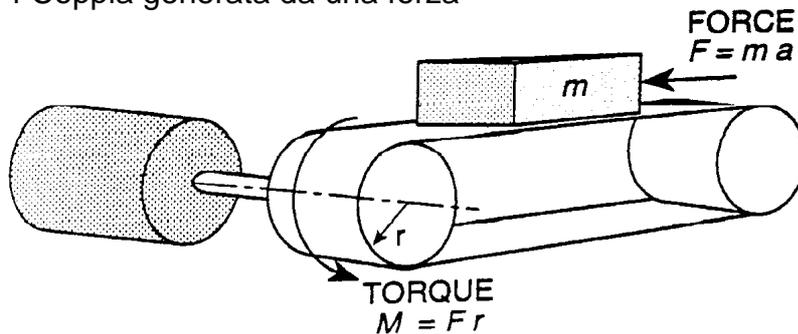
$$F = ma \quad \text{Nm}$$

e poiché la massa  $m$  è stabilita a priori, l'unica variabile da determinare è l'accelerazione  $a$ . In pratica però il valore di  $a$  viene stabilito tenendo conto dei limiti imposti dai valori di velocità  $v$  e tempo  $t$ . Una volta stabilito il valore di  $F$ , il valore della coppia richiesto dal sistema si calcola come riportato nelle figg. 3 e 4.

Facendo riferimento alla fig. 4, la coppia che il motore deve applicare alla puleggia motrice, trascurando gli attriti, è data dal prodotto del valore della forza acceleratrice per il raggio della puleggia e cioè:

$$\begin{aligned} M &= Fr \quad \text{Nm} \\ &= m a r \quad \text{Nm} \end{aligned}$$

4 Coppia generata da una forza

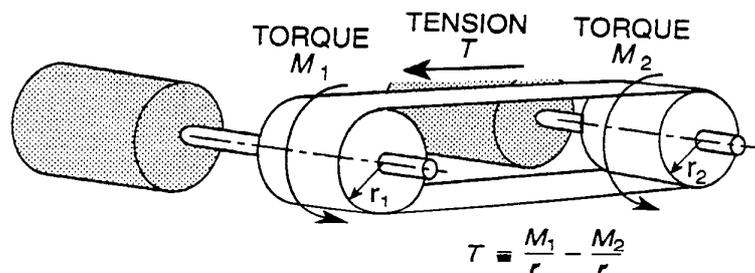


### Coppia e tensione

Il sistema disegnato in fig. 5 evidenzia come la tensione della cinghia sia legata alla coppia. La coppia di ogni puleggia è uguale al prodotto della forza applicata al suo bordo esterno per il suo raggio.

La forza al bordo è ovviamente uguale al valore della coppia esercitata diviso il valore del raggio. Si definisce tensione  $T$  la differenza tra i due valori di coppia,  $M_1$  e  $M_2$ , esercitate da ciascuna puleggia. Se il verso della coppia  $M_2$  è uguale a quello di  $M_1$ , allora  $T$  viene ridotto: Se invece i due momenti hanno verso opposto, per esempio se  $M_2$  è una coppia frenante e quindi negativa,  $T$  viene incrementato.

5 Tensione generata da una coppia



## Principi

---

Molte applicazioni industriali richiedono di poter avvolgere del materiale attorno ad un cilindro o ad una bobina, e in entrambi i casi é di primaria importanza tenere sotto controllo con molta precisione la tensione del materiale. Gli azionamenti a velocità variabile sono ideali per queste applicazioni perché sono in grado di fornire una differenza di coppia programmabile dall'utente, possono operare come master o slave, e possono essere personalizzati con del software dedicato per mantenere la tensione durante l'avvolgimento di una bobina mentre l'altra si svolge.

Nelle applicazioni in cui si richiede un'azione di avvolgimento é frequente trovarsi nelle condizioni in cui la tensione richiesta é piccola se messa a confronto con il momento di inerzia di una bobina completamente avvolta. La dimensione dei motori necessari viene principalmente determinata dal momento di inerzia della bobina calcolato a condizioni di massimo avvolgimento ( piú il momento di inerzia del motore e di qualsiasi altro componente del sistema che é coinvolto nella trasmissione ) sommato al carico, rappresentato dalla tensione del materiale che deve essere avvolto.

### Momento di inerzia

Un corpo costretto a ruotare attorno ad un suo asse é *indipendente dalla gravitá*, sempre che sia simmetrica rispetto all'asse di rotazione. L'accelerazione rotazionale di una massa simmetrica é esattamente analoga alla componente *orizzontale* dell'accelerazione lineare di un corpo, cioè é indipendente dal *peso*. La forza acceleratrice puó essere applicata tangenzialmente alla massa o puó essere impressa dalla rotazione di un asse come si verifica utilizzando gli azionamenti a velocità variabile.

Nel moto rettilineo, la *forza* che causa l'accelerazione é  $F=ma$ . Nel moto di rotazione, la *coppia* che crea l'accelerazione é

$$M=J\alpha$$

Nm

## Principi

dove  $J$  é il momento di inerzia e  $\alpha$  é l'accelerazione angolare espressa in radianti al secondo<sup>2</sup>. Il momento di inerzia  $J$  per un corpo cilindrico di massa  $m$  e raggio  $r$  é

$$J = 1/2 mr^2 \quad \text{Kgm}^2.$$

Quando si determina la massa  $m$  partendo dalle dimensioni e dalla densità del materiale di cui é composto, si ottiene per convenzione il valore della massa per unità di volume sebbene possa anche essere usato il termine "peso".

Il calcolo del momento di inerzia é possibile soltanto in presenza di forme geometriche molto semplici come un disco, un cilindro cavo ecc. Sulle macchine con alti regimi di rotazione, il momento di inerzia é misurato con opportuni test.

### Rapporti di riduzione - velocità, coppia e Inerzia

Il sistema di trasmissione del moto tra il motore ed il carico da movimentare, incorpora di frequente dei riduttori di vario tipo in grado di far ruotare l'asse terminale di rotazione, più lentamente rispetto all'albero motore.

Gli elementi sono mostrati in Fig. 6. Il riduttore è rappresentato simbolicamente e potrebbe essere qualsiasi apparato in grado di modificare il rapporto di velocità.

Il rapporto di riduzione di un qualsiasi riduttore è espresso come:

$$\frac{\text{numero di giri dell'albero in ingresso}}{\text{numero di giri dell'albero in uscita}}$$

Se esistono più riduttori nel sistema di trasmissione, il fattore di riduzione totale è:

$$\text{rapporto}_1 \times \text{rapporto}_2 \times \dots$$

Occorre porre molta attenzione che la sequenza ingresso uscita da considerare per il corretto calcolo, non venga accidentalmente modificata.

Le relazioni che descrivono l'effetto del riduttore sono le seguenti:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{con } \omega = \text{rad/s e } n = \text{rpm o rps}$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

Il rapporto delle coppie è l'inverso rispetto al

rapporto tra le velocità

$$\omega_1/\omega_2 = (M_2/M_1)^{1/2}$$

Il rapporto dei momenti di inerzia è

l'inverso del quadrato del  
rapporto di velocità

Si noti che l'espressione per il rapporto di coppia può essere scritto come:

$$M_1\omega_1 = M_2\omega_2$$

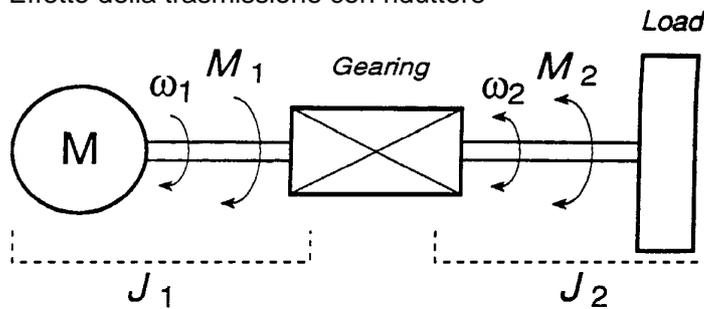
Il prodotto della coppia per la velocità rappresenta però la potenza. L'espressione riportata sopra, mostra che, (ignorando l'efficienza) la potenza è la medesima da entrambi i lati del riduttore. Per la coppia e la velocità invece non sussiste questa relazione di costanza di valori.

La velocità può essere espressa sia in rad/sec che in rpm o rps. È possibile ricavare un valore dall'altro tenendo presente che in 360° vi sono  $2\pi$  radianti.

(n in rps)  $\omega = 2\pi n$  rad/sec

(n in rpm)  $\omega = \omega = 2\pi \frac{n}{60} = \frac{\pi}{30} n$  rad/sec

6 Effetto della trasmissione con riduttore



$$\text{ratio} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{M_2}{M_1} = \left(\frac{J_2}{J_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

### Momento di inerzia riflesso all'albero

Utilizzando un riduttore tra il motore ed il carico, il momento di inerzia totale visto dal motore é:

- il momento totale di inerzia del motore e della trasmissione dal lato di pilotaggio ( $J_1$  in fig.6) piú
- il momento totale di inerzia lato carico, ( $J_2$  in fig 6) *riportato però all'albero*

*Il momento di inerzia ad un lato del riduttore , é proporzionale al quadrato del rapporto di velocità. Per un corretto calcolo occorre valutare anche il rendimento del riduttore.*

$$J_2 \text{ riflesso attraverso il riduttore} = \frac{J_2 \omega_2^2}{\omega_1^2} \times \frac{1}{\eta} \quad \text{kgm}^2$$

Inerzia totale  $J_T = J_1 + (J_2 \text{ riflesso})$

$$\text{Oppure } J_T = J_1 + (J_2 \omega_2^2 / \omega_1^2 \times 1 / \eta) \quad \text{kg m}^2$$

## Coppia Accelerante

La coppia accelerante é la differenza tra la coppia applicata all'albero in ingresso del meccanismo movimentato e la somma di tutte le coppie richieste dal carico, Fig 7.

La caratteristica della coppia richiesta di una particolare macchina é solitamente fornita dal costruttore della macchina stessa e comprende, la coppia richiesta, l'inerzia e le perdite.

Se cosí non fosse, durante la valutazione occorre considerare tutti questi elementi.

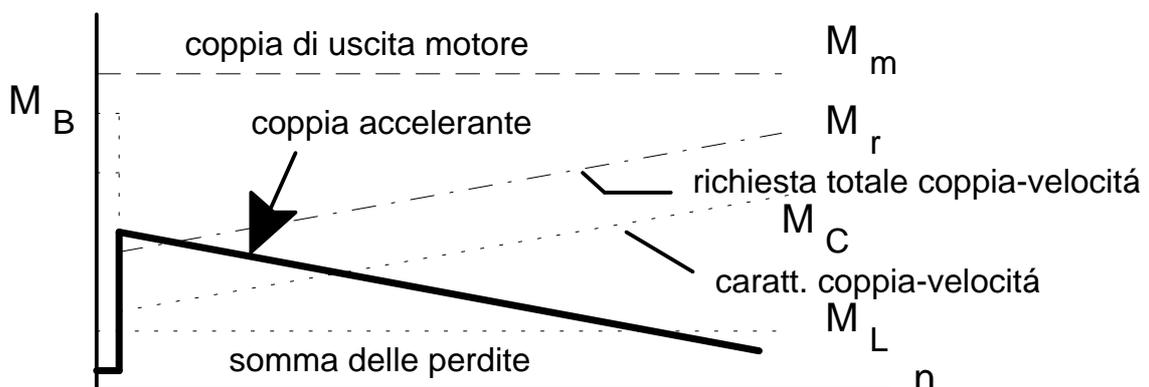
Una rappresentazione teorica di una applicazione in cui il carico richiede un alto valore di coppia per iniziare il movimento (attrito di primo distacco) dopo il quale la caratteristica coppia-velocitá divente una linea retta é mostrata in fig 7.

Tipiche caratteristiche coppia-velocitá (escludendo le perdite) sono illustrate in fig 8. A ciascuna di queste caratteristiche potrebbe essere sommata una richiesta aggiuntiva di coppia per vincere l'attrito di primo distacco.

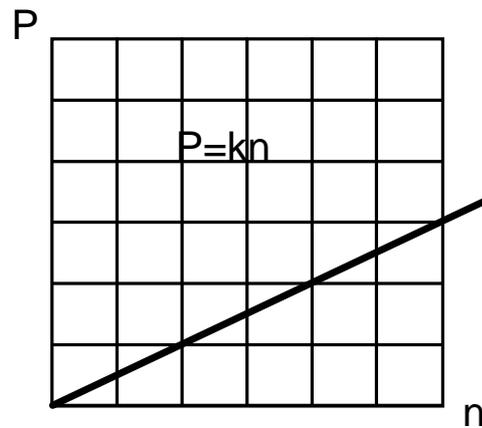
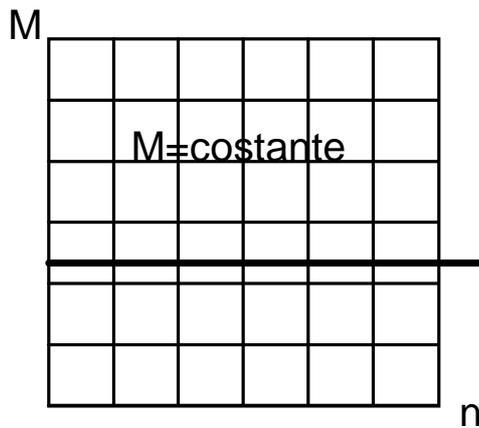
7 L'accelerazione di un carico é funzione della differenza tra la coppia accelerante fornita dal motore e la somma delle coppie del carico. In ogni istante la coppia accelerante é

$$M_m = M_r \text{ con } M_r = M_c + M_L$$

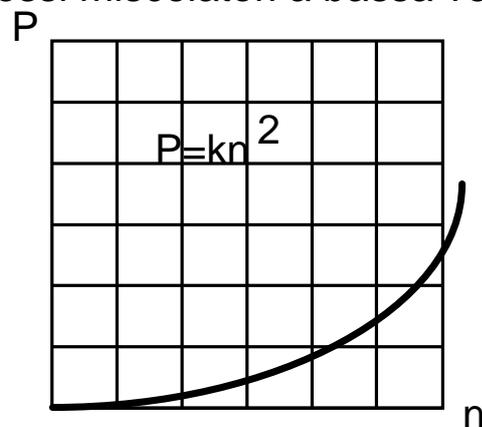
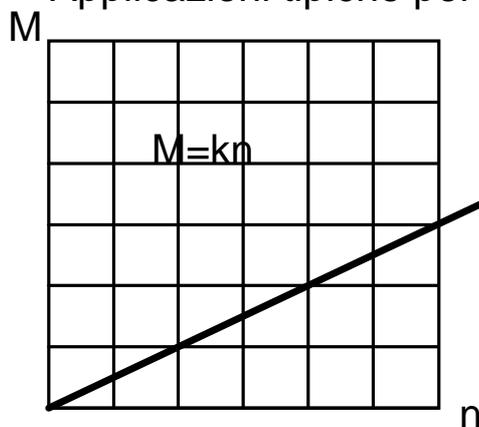
M



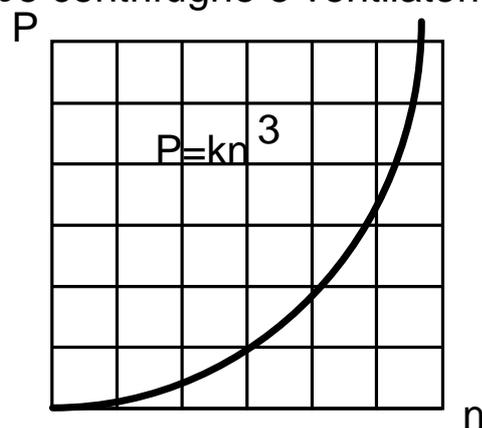
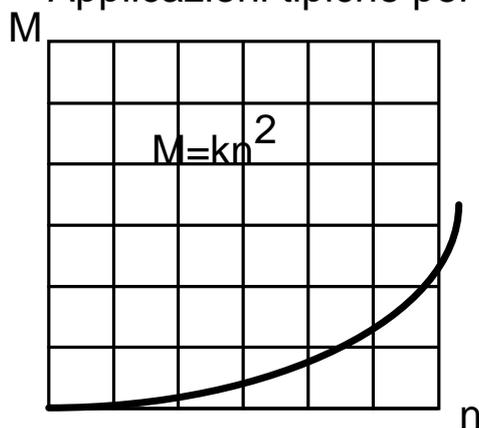
8a Appl. tipiche per sollevatori, trasportatori e pompe a pistone



8b Applicazioni tipiche per processi miscelatori a bassa velocità



8c Applicazioni tipiche per pompe centrifughe e ventilatori



La coppia accelerante al motore é:

$$M = J_T \alpha_1 \quad \text{Nm}$$

dove  $\alpha_1$  é l'accelerazione angolare dell'albero motore.

É ricavata come:

$$\alpha_1 = \frac{\omega_1 \alpha_2}{\omega_2}$$

dove  $\alpha_2$  é l'accelerazione angolare desiderata per l'albero in ingresso al carico da movimentare.

### Coppia e Potenza

$$\text{Potenza } P = \text{Coppia} \times \text{Velocit } = M\omega \quad \text{W}$$

**Se la coppia é costante, il consumo di energia (la potenza) aumenta all'aumentare della velocit . Se la potenza é costante, la richiesta di coppia diminuisce all'aumentare della velocit .**

Queste relazioni sono illustrate in fig. 8 nella quale sono riportati alcuni esempi teorici delle caratteristiche di carico che pi  facilmente si incontrano nelle applicazioni industriali.

### Procedure per il corretto dimensionamento

Lo scopo dei calcoli di dimensionamento é quello di determinare la corretta potenza dell'azionamento (motore e relativa elettronica di controllo) per una specifica applicazione.

Si consiglia di concentrarsi dapprima sul calcolo della massima forza (o coppia) richiesta da una massa (o da un momento di inerzia), aggiungere tutte le forze che agiscono su questo, le forze dovute all'accelerazione della massa, le forze d'attrito, le perdite subite durante il ciclo di lavoro ed infine il carico.

A seconda della tipologia dell'applicazione, il valore critico della massima forza puó essere il valore richiesto per:

- avviare il carico da una condizione di quiete vincendo l'attrito statico
- accelerare il carico alla velocità operativa tenendo presente eventuali leggi di variazione particolari
- pilotare il carico a velocità costante
- decelerare il carico fino all'arresto
- accelerare il carico da una velocità ad un'altra
- decelerare il carico da una velocità ad un'altra
- mantenere il carico stazionario

Avendo determinato le forze coinvolte, procedere a calcolare le coppie richieste per eventi significativi in modo da poter riprodurre dei grafici del tipo di quelli proposti in fig. 7.

In seguito, ma solo dopo aver determinato i corretti valori di coppia e di velocità, calcolare la potenza di uscita richiesta al motore nella fase piú critica, usando l'equazione:

$$P(\text{watt})=M(\text{newton metri}) \times \omega (\text{radianti al secondo})$$

Quando é richiesta una accelerazione molto rapida ed il carico é sufficientemente rigido, é possibile trarre vantaggio dal fatto che i motori permettono di essere sovraccaricati per un breve periodo di tempo. In questo caso occorre valutare quanto sia il sovraccarico permesso, per quanto tempo e quale sia il minimo intervallo tra due successive richieste di sovraccarico.

Normalmente il valore di sovraccarico é compreso tra il 150% ed il 200%, ma si consiglia di consultare il costruttore per evitare di danneggiare il motore.

Nelle prossime pagine é possibile trovare alcuni esempi di dimensionamento.

Le considerazioni fatte per l'accelerazione, ovviamente valgono anche per la decelerazione, ma soltanto nel caso sia prevista nell'elettronica una funzione di frenatura dinamica.

La richiesta di corrente (coppia) dall'azionamento (elettronica e motore) durante la fase di frenatura, sono in genere inferiori di quelle calcolate per la fase di accelerazione in quanto, le perdite nel motore e l'azione dell'attrito si oppongono al moto e quindi favoriscono la decelerazione. Anche su questo particolare funzionamento é sviluppato un esempio applicativo.

## Esempi Applicativi

*I dati sono tipici, non necessariamente espressi in unità SI. I calcoli eseguiti su tre significativi esempi*

### 1 TRASPORTATORE

Un trasportatore orizzontale trasporta del materiale fuso (non sensibile agli shock). Si richiede che il trasportatore si avvii quando completamente carico.

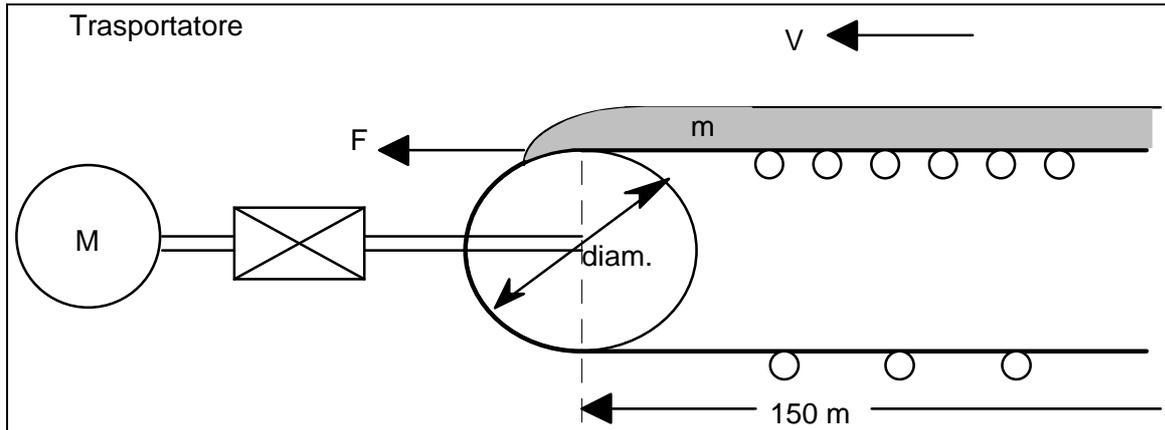
Occorre determinare la potenza di un motore asincrono standard trifase 400 V AC in grado di movimentare il trasportatore assumendo per il motore un 4 poli, 50 Hz, 1475 rpm a pieno carico. Con i medesimi dati si calcoli la potenza del motore nel caso il trasportatore debba elevare il carico di 20 metri.

DATI:

Quantità di materiale da trasportare	900 tonnellate per ora (250 kg/s)
Densità del materiale caricato	2 kg/dm <sup>3</sup> (2000 kg/m <sup>3</sup> )
Larghezza del nastro trasportatore	800 mm (0.8 m)
Lunghezza del trasportatore	150 m
Massimo spessore del materiale trasportabile senza perdite	100 mm (0.1 m)
Peso del nastro trasportatore	15 kg per metro lineare
Diametro della puleggia di trascinamento della cinghia	400 mm (0.4 m)
Coefficiente di frizione statico del trasportatore	0.09
Coefficiente di attrito dinamico del trasportatore	0.07

Ulteriori informazioni dal costruttore:

Coppia di rottura a pieno carico	6850 Nm
Richieste dinamiche:	Tempo di accelerazione desiderato 4 secondi



Metodo

- 1 portare in unità SI i dati espressi in altro modo
- 2 determinare le velocità lineari e circolari ed i rapporti di trasmissione
- 3 determinare il carico e l'accelerazione e, da queste, le forze e le coppie necessarie per accelerare e per movimentare
- 4 calcolare le caratteristiche del motore

1 I dati non SI sono stati convertiti e listati vicino alle definizioni

2 velocità e rapporti di trasmissione

2.1 Volume della fornitura richiesta

Quantità richiesta per ora = volume x densità

Dai dati:

Volume fornito = massa fornita / densità m<sup>3</sup>h/r

volume per secondo = 250 / 2000 = 0.125 m<sup>3</sup>/s

2.2 Velocità lineare del nastro trasportatore

$$v = \text{volume per secondo} / \text{area della sezione} = \\ = 0.125 \times 1 / (0.8 \times 0.1) = 1.56 \quad \text{m/s}$$

2.3 Velocità angolare  $\omega$  della puleggia di trascinamento nastro

$$\omega = \text{velocità lineare} / \text{raggio} = 1.56 / 0.2 = 7.8 \quad \text{rad/s}$$

2.3.1  $\text{RPM} = \omega \times 30/\pi = 74.5$

Il rapporto di trasmissione dovrà essere  $1475 / 74.5 = 20$  a 1  
circa

*Note*

- Questo rapporto è appropriato per un motore standard a 4 poli come specificato a pag. 24
- Le velocità in uscita sono determinate dall'applicazione, ma le velocità in ingresso possono essere variate. Per esempio, se i rapporti di riduzione calcolati per una particolare applicazione richiedono di lavorare a velocità inaccettabilmente alte, l'adozione di un motore a 6 o 8 poli potrebbe essere una soluzione ottimale.
- La velocità di rotazione  $n$  di un motore è espressa con:

$$n = \frac{f \times 60}{p}$$

dove  $p$  è il numero di poli e  $f$  è la frequenza nominale

### 3 Carico, forza e coppia

#### Note

- I dati parlano di peso del nastro trasportatore, ma ne danno il valore in kg/m che corrisponde ad una massa per unità di lunghezza quando portata nel sistema di unità SI.
- Un fattore di 2 é applicato per tener conto della corsa di ritorno del nastro

3.1 Carico = massa del carico + massa del nastro  
 = (volume del carico x densità) piú  
 2 (lunghezza nastro x massa del nastro per metro)  
 = [(150 x 0.8 x 0.1) (2000)] + 2 (150 x 15) =  
 =  $28.5 \times 10^3$  kg

3.2 La coppia di primo distacco per avviare il nastro é fornita dai dati e pari a  
 6850 Nm

3.3 La forza orizzontale richiesta per accelerare il nastro caricato che scorre su rulli (attrito volvente) superato l'attrito di primo distacco é:

$$\begin{aligned} F_a &= (\text{massa del carico} \times \text{accelerazione}) + \\ &+ (\text{massa del carico} \times g \times \text{coeff. di attrito volvente}) = \\ &= ma + mg\mu \quad \text{N} \\ &\text{oppure } m(a+g\mu) \quad \text{N} \end{aligned}$$

e la coppia necessaria per accelerare il trasportatore per vincere l'attrito volvente equivale all forza x raggio della puleggia,

$$\begin{aligned} M_a &= F_a r \quad \text{Nm} \\ &= [m(a+g\mu)]r \quad \text{Nm} \end{aligned}$$

3.3.1 Determina l'accelerazione lineare, essendo tutti gli altri fattori noti.

Velocità lineare = 1.56 (da 2.2) m/s  
 Tempo di accelerazione richiesto (dai Dati) = 4 s  
 Accelerazione lineare = 1.56/4 = 0.39 m/s<sup>2</sup>

3.3.2 Da 3.3

$$M_a = 28.5 \times 10^3 [0.39 + (9.81 \times 0.07)] 0.2 = 6140 \quad \text{Nm}$$

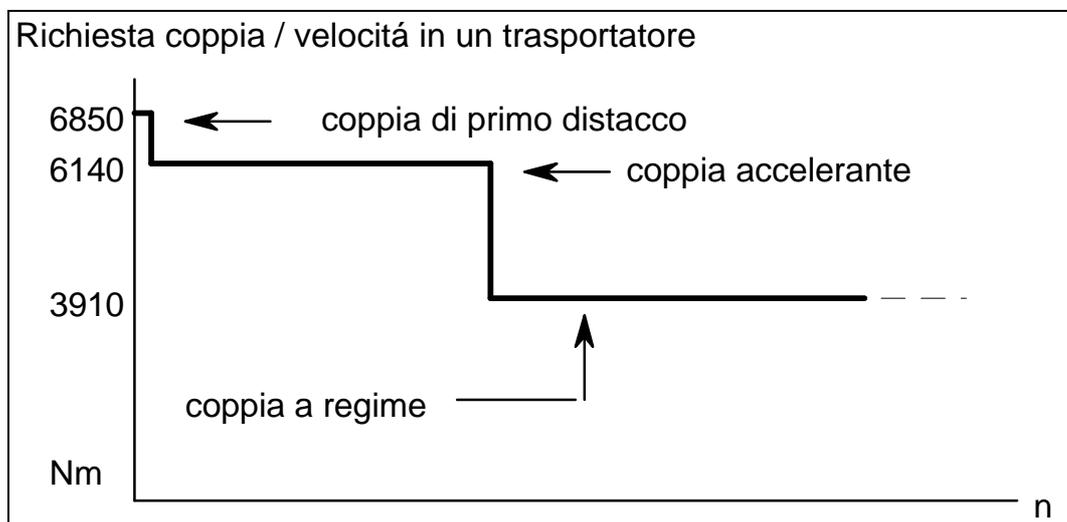
3.4 La forza orizzontale richiesta per movimentare il trasportatore a pieno carico ed alla massima velocità (considerando trascurabile l'effetto dell'attrito volvente) é

$$F_s = (\text{massa del carico} \times g \times \text{coeff. di attrito volvente}) \\ = mg\mu \quad \text{N}$$

e la coppia necessaria per accelerare il trasportatore per vincere l'attrito volvente equivale alla forza x raggio della puleggia,

$$M_s = F_s r = mg\mu r \quad \text{Nm} \\ = 29.1 \times 10^3 \times 9.81 \times 0.07 \times 0.2 = 3910 \quad \text{Nm}$$

A questo punto può essere utile disegnare la curva coppia / velocità



#### 4 Dimensionamento in potenza del motore e del drive.

##### 4.1 Sommando i vari termini delle richieste di coppia

Primo distacco (dato)	Accelerante	In movimento	
6850	Ma	Ms	
	6140	3910	Nm

Poiché la potenza é uguale su entrambi i lati del riduttore, non é necessario riferirsi alla coppia ed all'accelerazione del motore. La richiesta di potenza alla puleggia della cinghia corrisponde alla potenza richiesta al motore.

$$P = M\omega \quad W$$

Poiché la potenza é proporzionale alla velocità, questo sembra presentare un problema poiché al momento dell'avvio, la velocità é nulla e di conseguenza la potenza é anche nulla.

Inoltre, durante l'accelerazione, la velocità si incrementa da zero alla velocità normale di funzionamento e quindi la potenza non sembra avere un peso determinante. In effetti la coppia accelerante é presente finché il motore non raggiunge la massima velocità. Il valore di potenza accelerante può quindi essere calcolato sulla base della coppia accelerante alla massima velocità.

In accordo con i dati forniti il periodo di avviamento e di accelerazione é di 4 s. Se é stato selezionato un motore con una capacità di sovraccarico del 150% per 30 secondi, avendo noi necessità di soli 4 secondi siamo ampiamente all'interno del campo operativo del motore.

##### 4.2 La potenza del motore richiesta per accelerare il trasportatore, corrisponde alla coppia accelerante agente sulla puleggia moltiplicata per la velocità angolare della puleggia alla massima velocità tenendo in considerazione il rendimento ( $\eta$ ) del riduttore.

Per questo esempio  $\eta$  é impostato = 98%, ma, in pratica, deve essere verificato sul riduttore installato

$$\begin{aligned} P_a &= M_a \omega \eta && \text{W} \\ &= 6140 \text{ (da 3.3.2)} \times 7.8 \text{ (da 2.3)} \times 1 / 0.98 && \text{W} \\ &= 48869 / 10^3 \\ &= 48.9 && \text{kW} \end{aligned}$$

4.3 Questo dovrebbe essere il valore di potenza per un motore a cui si richiede di generare continuamente la coppia accelerante. Se il funzionamento avviene invece sfruttando la capacità di sovraccarico del 150%, la potenza a pieno carico del motore sarà:

$$48.9 \times 100 / 150 = 32.6.$$

**Un motore standard marchiato 37 kW sarà sicuramente soddisfacente.**

4.4 Una volta determinato questo valore di potenza, occorre verificare la possibilità del drive a pilotare questo motore. Affinché ciò sia possibile, il drive deve essere in grado di fornire la corrente necessaria per vincere l'attrito di primo distacco.

Poiché la corrente é direttamente proporzionale alla coppia, la richiesta di corrente per superare la prima fase del movimento é nel rapporto:

$$\text{(da 3.2 e 3.3.2)} \quad 6850 / 6140$$

della coppia richiesta per l'accelerazione.

Si noti tuttavia che la corrente richiesta durante l'accelerazione é fornita ragionando sulla base di una potenza erogabile in sovraccarico di 48.9 kW e non sulla potenza nominale del motore di 37 kW.

- 4.5 Calcolare le correnti in gioco e, avendo trovato la richiesta di corrente all'avvio, trovare i valori nominali dell'inverter. La corrente di avvio, considerando l'azionamento (convertitore + motore) in grado di fornire 48.9 kW é calcolata da:

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times p.f. \quad \text{kW}$$

dove il fattore di potenza (working power factor p.f.) si assume essere a pieno carico, piena velocità e piena tensione in corrispondenza del valore nominale del fattore di potenza del motore 0.85 (dai dati).

Totale

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_L \times I_L \times p.f.} = \frac{48.9 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} \times \frac{1}{0.85} = 83 \quad \text{A}$$

$$\text{Corrente necessaria all'avvio} = 83 \times \frac{6850}{6140} = 92.6 = 92.6 \quad \text{A}$$

- 4.6 Il convertitore stesso può sopportare un sovraccarico di corrente per un tempo limitato esattamente come per il motore. Per questo esempio si assume la possibilità di sopportare un sovraccarico del 150% per 60 secondi. Il rendimento viene assunto essere del 98%.

La corrente nominale a pieno carico dell'inverter é :

$$92.6 \times \frac{100}{150} \times \frac{1}{0.98} = 63 \quad \text{A}$$

- 4.7 In pratica, la corrente a pieno carico, il rendimento e la capacità di sovraccarico del drive, devono essere verificate usando le formule utilizzate per il dimensionamento del motore. Occorre comunque che l'utilizzatore consulti i dati forniti insieme all'apparato dal costruttore o dal distributore.

4.8 Prendendo per un esempio pratico l'elenco degli inverter Control Techniques serie CDE, si nota come la corrente in gioco rientri nelle possibilità dell'inverter CDE3700 (37 kW) essendo questo in grado di fornire 76 Ampere continuativi.

#### NOTE

- 1 Quando per il particolare tipo di carico é importante il corretto dosaggio della potenza, é essenziale utilizzare un inverter o generalmente un convertitore a velocità variabile (VSD) in modo da poter controllare adeguatamente la velocità magari con l'ausilio di sensori.
- 2 Se invece la necessità di un continuo dosaggio della potenza non é così stringente, l'utilizzo di un "Soft Starter" può risultare soddisfacente. I calcoli per il dimensionamento sono i medesimi visti sopra.
- 3 Quando il trasportatore sta funzionando a pieno carico ed alla velocità nominale, la richiesta di potenza dipende dalla coppia richiesta a pieno carico.

$$\begin{aligned} P_a &= M_a \omega & \text{W} \\ &= 3910 \text{ (da 3.4) } \times 7.8 \text{ (da 2.3)} & \text{W} \\ &= 30500 / 10^3 = 30.5 & \text{kW} \end{aligned}$$

che corrisponde all'82% del valore a pieno carico. Un motore che fosse connesso direttamente alla rete lavorerebbe con un basso fattore di potenza sprecando energia.

Gli inverter in genere permettono di economizzare il consumo di energia a qualsiasi velocità ed in qualsiasi condizione di carico.

Anche i Soft Starter possono contribuire ad economizzare energia con carichi parziali ma soltanto alla massima velocità.

## 2 SOLLEVATORI SU PIANO INCLINATO

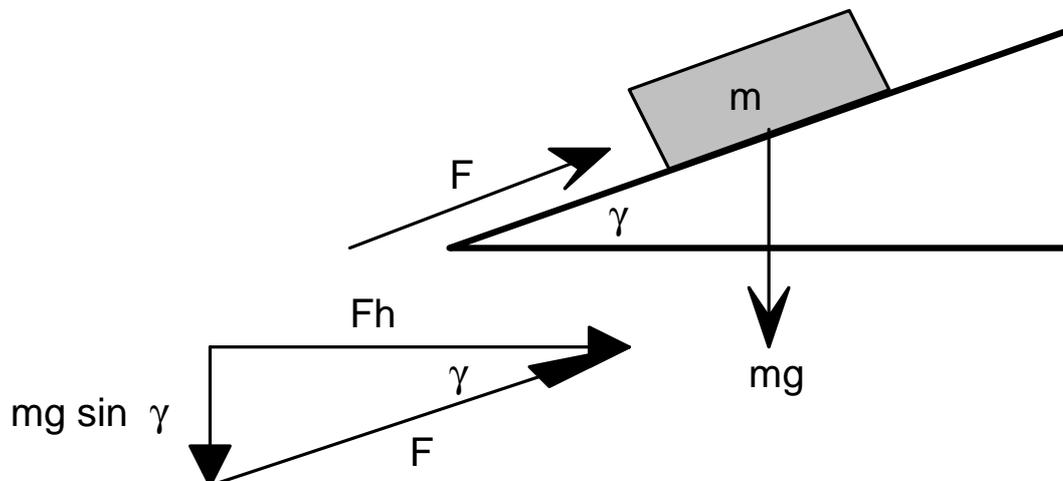
Per movimenti su un piano inclinato é necessario introdurre una componente di forza, in aggiunta alla forza richiesta per avviare il moto, per accelerare e per mantenere in moto il trasportatore. Questa componente é la forza necessaria per sollevare il carico.

La forza risultante corrisponde all'ipotenusa del diagramma vettoriale riportato la cui componente orizzontale é la somma delle forze necessarie all'avvio del moto, all'accelerazione ed al mantenimento della velocità costante così come già calcolato. La componente verticale é  $mg$  moltiplicata per il seno dell'angolo  $\gamma$  che il piano forma con l'orizzonte.

La forza totale,  $F$  é calcolata da:

$$F=[F_h^2 + (mg \sin \gamma)^2]^{1/2}$$

Forze su un piano inclinato



### 3 SOLLEVATORI

Un sollevatore deve sollevare un carico massimo di 2 tonnellate. Il sistema di carrucole prevede 2 coppie di carrucole di cui le due carrucole superiori sono fisse al supporto e le restanti due sono fissate al gancio.

L'elevatore é movimentato da un motore asincrono trifase 4 poli 400V 50 Hz con velocità massima 1475 rpm controllato da un inverter.

#### DATI

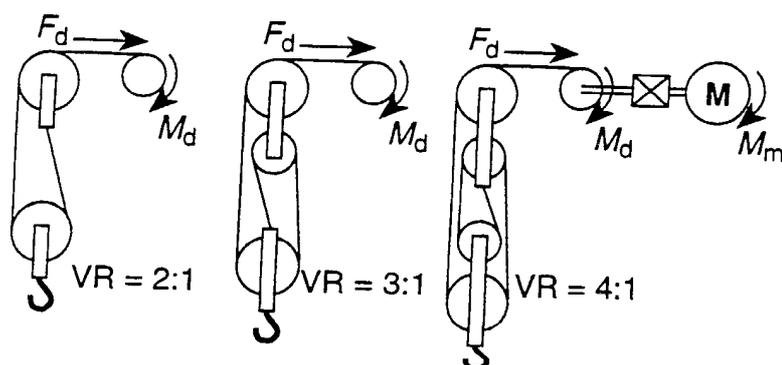
Diametro del cilindro avvolgitore	200 mm
Rapporto di riduzione tra motore e cilindro	11:1
Coefficiente di attrito di sollevamento	0.095

#### 1 Rapporto di velocità (VR)

É un semplice rapporto determinato dal numero totale di passaggi attraverso le pulegge o valutabile in alternativa contando il numero totale di pulegge.

Questo esempio con 4 passaggi ha rapporto 4:1

Rapporti con pulegge



## 2 Velocità di accelerazione del gancio

2.1 La velocità del gancio di sollevamento è funzione della velocità del motore, del rapporto di riduzione, del diametro del cilindro avvolgitore e del rapporto di velocità (VR).

$$\text{Vel. del cilindro in riv/s} = \frac{\text{velocità motore}}{\text{rapporto di riduzione}} \times \frac{1}{60}$$

velocità del gancio =  $\frac{\text{velocità del cilindro} \times \text{circonferenza cilindro}}{\text{rapporto di sollevamento}}$

$$\text{velocità del gancio} = \frac{1475}{11} \times \frac{1}{60} \times \frac{0.2\pi}{4} = 0.351 \quad \text{m/s}$$

2.2 Poiché il carico da sollevare è particolarmente delicato, l'accelerazione deve essere lenta. Un tempo di accelerazione di 8 secondi potrebbe essere adeguato. L'accelerazione lineare del carico è valutabile da:

$$\begin{aligned} v &= u + at & \text{se } u=0, a=v/t & \quad \text{m/s}^2 \\ &= 0.351/8 = 4.39/10^2 & & \quad \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

3 Forza di sollevamento e coppia necessaria per accelerare da velocità zero alla velocità massima.

3.1 La forza lineare Fa da applicare al gancio affinché si riesca a sollevare il carico da zero alla massima velocità di sollevamento, è la somma algebrica delle forze richieste per:

mantenere fermo il carico sospeso (mg)

accelerare il carico da velocità zero alla velocità di sollevamento (ma)

vincere l'attrito delle carrucole (mgμ)

$$F_a = mg + ma + mg\mu \quad \text{N}$$

$$= m[a + g(1+\mu)] \quad \text{N}$$

- 3.2 La forza tangenziale equivalente  $F_{da}$  sul cilindro avvolgitore é  $F_a$  moltiplicato per l'inverso del rapporto di sollevamento. (L'inverso dipende dal fatto che il calcolo é effettuato procedendo dall'uscita verso l'ingresso).

$$F_{da} = F_a \times 1/4 = \frac{m[a + g(1+\mu)]}{4} \quad \text{N}$$

- 3.3 La coppia accelerante del cilindro é:

$$M_{da} = F_{da} \times \text{raggio cilindro}$$

$$= m[a+g(1+\mu)] \times d/2 \quad \text{Nm}$$

Sostituendo i valori noti per m, g, a e  $\mu$

$$M_{da} = 2 \times 10^3 [(4.39 / 10^2) + 9.81(1+0.095)] \times 0.2 / 2$$

$$= 2160 \quad \text{Nm}$$

- 4 Forza di sollevamento e coppia necessaria per mantenere la massima velocità

- 4.1 La forza lineare  $F_s$  richiesta al gancio per poter mantenere il carico alla massima velocità di salita é la somma algebrica delle forze richieste per mantenere:

fermo il carico ( $mg$ ) e

per vincere l'attrito delle carrucole ( $mg\mu$ ).

$$F_s = mg + mg\mu \quad \text{N}$$

$$= mg(1 + \mu) \quad \text{N}$$

- 4.2 La forza tangenziale equivalente  $F_{ds}$  al rullo avvolgitore é  $F_s$  moltiplicata per l'inverso del rapporto di sollevamento.

$$F_{ds} = F_s \times \frac{1}{4} = \frac{mg(1+\mu)}{4} \quad \text{N}$$

- 4.3 La coppia alla massima velocità applicata al rullo avvolgitore é:

$$\begin{aligned} M_{ds} &= F_{ds} \times \text{raggio del rullo} \\ &= mg(1 + \mu) \times d/2 \quad \text{Nm} \end{aligned}$$

Sostituendo con i valori noti di m, g, d e  $\mu$ ,

$$M_{ds} = 2 \times 10^3 \times 9.81 (1 + 0.095) \times 0.2/2 = 2150 \quad \text{Nm}$$

## 5 Determinazione della potenza del motore

La potenza é un multiplo della coppia e della velocità (si veda pag. 21). Per il calcolo della potenza richiesta al motore, é assolutamente ininfluente che questa venga calcolata sul motore o sul rullo avvolgitore sempre che venga tenuto conto del rendimento  $\eta$  del riduttore.

In questo esempio, h si assume essere pari al 98% ma, in pratica, deve essere di volta in volta verificato dipendente dall'effettivo riduttore utilizzato.

Durante la fase di accelerazione, la velocità cresce da zero alla normale velocità di funzionamento e perciò sembra che la potenza richiesta non assuma valori di particolare rilevanza. In effetti così non é, dato che la coppia accelerante continua ad elevare il punto in cui il motore raggiunge la massima velocità. La coppia accelerante alla massima velocità può quindi essere utilizzata per calcolare la richiesta di potenza.

$$P = M\omega\eta \quad \text{W}$$

5.1 Potenza del motore relativa alla coppia accelerante

$$P_a = M_{da} \times \omega_d \times 1/\eta \quad \text{W}$$

dove  $M_{da}$  é la coppia accelerante sul rullo (2160 Nm da 3.3),  $\omega_d$  é la velocità di rotazione del tamburo in radianti al secondo e  $\eta$  é il rendimento del riduttore.

Si noti che si é utilizzato l'inverso del rendimento. Ne segue che al motore sará richiesta una coppia ed una potenza maggiore di quella calcolata al tamburo avvolgitore.

Da 2.1

$$\begin{aligned} \text{Velocitá tamburo} &= \frac{\text{velocitá motore}}{\text{rapporto riduzione}} \times \frac{1}{60} \times \pi \quad \text{rad/sec} \\ &= (1475/11) \times \pi \times 1/60 = 7.02 \quad \text{rad/sec} \end{aligned}$$

La potenza accelerante é:

$$\begin{aligned} P_a &= 2160 \times 7.02 \times 1/0.98 \quad \text{W} \\ &= 2160 \times 7.02 \times (1/10^3) \times 1/0.98 = 15.5 \quad \text{kW} \end{aligned}$$

5.2 Questa dovrebbe essere la potenza di un motore in grado di fornire continuamente la coppia accelerante di sollevamento. I motori standard sono normalmente progettati per sopportare un sovraccarico del 150% a pieno carico per 30 secondi.

I dati ci danno 8 secondi come tempo richiesto di accelerazione, tempo sicuramente compreso nel tempo massimo di sovraccarico ammesso. Se l'accelerazione é quindi effettuata sfruttando la zona di sovraccarico del motore (nota 1, pag. 40), la potenza richiesta al motore in questo caso é:

$$15.5 \times 100 / 150 = 10.33 \quad \text{kW}$$

### 5.3 Potenza del motore in relazione alla coppia richiesta alla massima velocità.

Essendo la potenza direttamente proporzionale alla coppia, la richiesta di coppia alla massima velocità di sollevamento corrisponde al rapporto tra la coppia alla massima velocità e la coppia accelerante:

$$10.3 \times 2150 / 2160 = 10.29 \quad \text{kW}$$

Dal raffronto tra le formule nelle sezioni 3.3 e 4.3 risulta evidente anche senza ricorrere ai calcoli che il motore dimensionato sull'accelerazione risulta di conseguenza adeguato anche per il sollevamento alla massima velocità.

**In questo caso risulta soddisfacente la scelta di un motore da 11 kW.**

## 6 Dimensionamento del drive

Nelle applicazioni di sollevamento, la capacità del drive corrisponde a quella del motore mentre solitamente il sovraccarico é di circa il 150% per 60 secondi. In questo esempio si utilizzerá **un drive da 11kW**.

Applicazioni particolari possono richiedere un drive con una caratteristica di potenza superiore a quella del motore anche se queste evenienze sono molto rare.

## NOTE

- 1 In questo esempio, dove il tempo di accelerazione é relativamente lungo, il motore é stato dimensionato avvantaggiandosi del limitato tempo di sovraccarico richiesto. Se il ciclo di lavoro richiede frequenti accelerazioni e decelerazioni, il fattore di sovraccarico diventa importante sia per il motore che per il drive in conseguenza all'integrazione di  $I^2t$ .
- 2 Un inverter per motori asincroni AC dovrebbe prevedere un anello di controllo di coppia e la possibilitá di rampe di accelerazione programmabile. Se l'anello di controllo della coppia é usato per controllare le rampe, questo permette di porre in rotazione il motore a velocitá molto bassa non appena si manifesti una richiesta di coppia e di prendere il carico lentamente prima di accelerare sotto il controllo delle rampe.

**Le applicazioni che implicano la creazione di pressione** sono molto simili. La principale differenza consiste nell'essere progettate per raggiungere una pressione definita.

La pressione nel sistema SI é espressa in Pascal (Pa) ed é in relazione alla forza come riportato nella seguente formula:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$$

Il Pascal é una quantitá relativamente piccola. Nei sistemi si parla normalmente di kPa.

Quando la pressione é misurata in bar, é possibile passare in unitá SI con la seguente:

$$1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

## 4 CARICHI CON MOVIMENTAZIONE A VITE

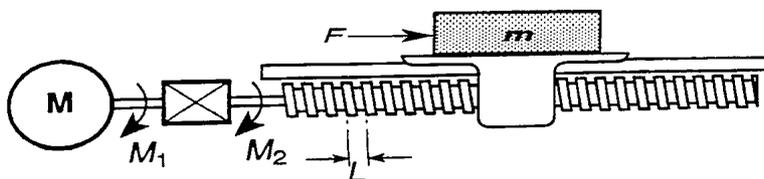
I principi da considerare in questo tipo di movimentazione sono i medesimi incontrati nell'esempio del trasportatore. Una massa é movimentata orizzontalmente. La forza  $F$  deriva dall'accelerazione e dalla massa come in un trasportatore. In molte applicazioni la massa é abbastanza ridotta e la forza necessaria per vincere gli attriti una piccola percentuale della forza totale richiesta ma, soprattutto in applicazioni su piccole macchine utensili, i tempi di accelerazione possono essere eccezionalmente corti con cicli di lavorazione rapidi e ripetitivi.

Normalmente in questo tipo di applicazioni si utilizzano piú convenientemente dei servoazionamenti per il cui dimensionamento rimandiamo al relativo formulario tascabile.

Grosse macchine utensili possono invece richiedere un inverter per il pilotaggio ed il controllo di motori standard AC a gabbia di scoiattolo. I calcoli sono i medesimi effettuati per il trasportatore...

- 1 Portare tutti i dati in unitá SI
- 2 Determinare le velocitá angolari e lineari in funzione della massima velocitá di rotazione del motore e del rapporto di riduzione e considerando che l'avanzamento del carico corrisponde al passo della filettatura per rivoluzione della vite.
- 3 Determinare il carico e l'accelerazione e, da questi, le forze e le coppie necessarie per accelerare la massa e per mantenerla in moto.

Movimentazione su vite



## 5 FRENATURA

Quando un motore ad induzione é trascinato dal suo carico, funziona da generatore in grado di fornire tensione ai suoi morsetti. Gli inverter piú avanzati sono in grado di controllare questa capacità di rigenerazione fino alla potenza nominale del motore. Molte applicazioni industriali traggono infatti vantaggio da questa capacità.

La potenza rigenerata può essere inviata alla rete di alimentazione (se l'inverter prevede questa funzione) o, piú comunemente, può essere dissipata su di un resistore.

Il valore e la potenza del resistore sono calcolati in funzione della potenza da dissipare, la velocità con cui é fornita la potenza, e l'intervallo di tempo tra successive decelerazioni.

L'energia cinetica del motore e del carico =  $0.5 J \omega^2$ , dove

J = inerzia totale ( $\text{kg m}^2$ ) del motore, della trasmissione e della meccanica trascinata

Se viene utilizzato un riduttore tra motore e meccanica, J corrisponde al valore dell'inerzia riflessa sull'albero motore (pag. 19)

$\omega$  = velocità angolare (rad/sec), o in alternativa,  
=  $2 \pi n / 60$  rad/sec con n espresso in rpm

Poiché l'energia rigenerata é proporzionale al quadrato della velocità angolare, la maggior quantità di energia del sistema é concentrata alle velocità operative piú elevate ed é fornita al resistore nella fase iniziale della decelerazione.

Se il motore sta funzionando a velocità superiori alla frequenza base, l'energia fornita al resistore è costante finché la velocità non scende al di sotto della frequenza base.

La potenza di un resistore corrisponde alla potenza che il componente è in grado di assorbire continuamente. Il valore di un resistore è la sua resistenza in ohm. Si ricordi che un resistore di basso valore conduce alta corrente.

Un sistema con inerzia pari a  $10 \text{ kg m}^2$  deve essere decelerato dalla massima velocità a velocità zero. Calcolare il valore in ohm e la potenza in Watt del resistore di frenatura in modo da avere disponibile la massima coppia di frenatura.

#### DATI

Potenza drive	30 kW
Potenza motore	30 kW
Velocità $n$ a pieno carico del motore	1475 rpm
Coppia nominale del motore	191 Nm
Tempo di decelerazione	da calcolare
Tempo di ripetizione ciclo	30 secondi
Inerzia del sistema $J$	$10 \text{ kgm}^2$
Valore del resistore $R$	da calcolare (ohm)
Potenza del resistore $P_r$	da calcolare (kW)
Tensione operativa del resistore $V$	660 V

Il primo passo consiste nel determinare il tempo minimo di decelerazione  $t_b$ .

La coppia massima di frenatura  $M_b$  è identica alla massima coppia accelerante

$$M_b = J \alpha = J \frac{\omega}{t_b} = \frac{\pi}{30} J \frac{n}{t_b} \quad \text{Nm}$$

$$t_b = \frac{\pi J n}{30 M_b}$$

La massima decelerazione si ottiene però al 150% della coppia nominale del motore.

Il valore da assegnare a  $M_b$  è quindi

$$1.5 \times 191 = 286.5 \quad \text{Nm}$$

da cui si ricava il minimo tempo di decelerazione  $t_b$

$$t_b = (10\pi \times 1475) / (30 \times 286.5) = 5.39 \quad \text{s}$$

Impostando un tempo di decelerazione più appropriato al sistema in esame, ad esempio:

$t_d=7$  s è possibile ricalcolare la coppia di frenatura  $M_b$  richiesta per decelerare il carico in 7s.

$$M_b = \frac{\pi J n}{30 t_d} \quad \text{Nm}$$

$$= (10\pi \times 1475) / (30 \times 7) = 220.64 \quad \text{Nm}$$

La potenza di frenatura è

$$P_b = \frac{\pi M_b n}{30 \times 10^3} \quad \text{kW}$$

$$= (\pi \times 224.38 \times 1475) / (30 \times 10^3) = 34.65 \quad \text{kW}$$

## Valore del resistore R

Il motore é in grado di fornire fino al 150% della sua potenza nominale per un massimo di 60 secondi e quindi  $1.5 \times 30 = 45$  kW. Inoltre é in grado di rigenerare la stessa potenza nello stesso tempo. (É essenziale verificare che anche il drive abbia questa capacità). Poiché 45 kW é in eccesso rispetto ai 35 kW richiesti da questa applicazione, il valore del resistore é:

$$R = \frac{V^2}{P_b} = \frac{660^2}{35 \times 10^3} = 12.45 \quad \text{ohm}$$

Potenza del resistore  $P_r$ 

Poiché l'azione frenante é intermittente, il resistore puó essere selezionato tra quelli che offrono una capacità di assorbimento di potenza intermittente piuttosto che continuativa.

Il vantaggio di questa scelta consiste nello sfruttare le capacità di sovraccarico dei resistori solitamente specificate in grafici da parte del costruttore del resistore.

In questo esempio, il tempo di decelerazione é assunto essere di 7 s ed il tempo di ripetizione del ciclo di 30 s. Un tipico valore di sovraccarico é pari a 2.

Da cui

$$P_r = P_b / \text{fattore di sovraccarico} = 35/2 = 17.5 \quad \text{kW}$$

Per scopi pratici si assume che dal 15% al 20% dell'energia dissipata durante la fase di rigenerazione sia causata da perdite elettriche nel motore e nel drive, da perdite meccaniche nel motore e nel carico. Tutte queste perdite favoriscono però la frenatura.

In pratica usando il valore di resistore raccomandato si ottiene una maggiore coppia frenante. L'energia fornita dall'inerzia del carico é anche funzione della rapiditá della decelerazione.

#### NOTE

- 1 Un resistore deve essere installato in accordo con le istruzioni fornite dal costruttore o dal distributore. Al resistore di frenatura dovrebbe essere affiancato un sistema di protezione termica in grado di interrompere l'alimentazione al drive in caso di raggiungimento da parte del resistore di temperature pericolose.
- 2 I resistori impiegati con funzioni di recupero energia durante le frenature, devono essere capaci di ben tollerare alte sollecitazioni termiche.

## 6 RAFFREDDAMENTO E VENTILAZIONE DI UN QUADRO

### Dimensioni dell'armadio

L'armadio in cui vengono installati i convertitori, deve essere opportunamente dimensionato per permettere una adeguata dissipazione del calore generato.

Occorre prevedere 100 mm di spazio libero intorno ad ogni convertitore come descritto in Fig. 11 e la temperatura interna dell'armadio non deve mai eccedere la massima temperatura ammissibile per il corretto funzionamento dei convertitori.

Per il calcolo è necessario considerare tutte le apparecchiature generanti calore montate nello stesso armadio.

### Calore effettivo area conduttrice

La superficie effettiva  $A_e$  di un armadio contenente apparecchiature che generano calore è calcolata utilizzando la seguente formula:

$$A_e = \frac{P_L}{k (T_i - T_{amb})}$$

dove:  $A_e$  = Area effettivamente conducente calore in  $m^2$  uguale alla somma delle aree delle superfici non in contatto con altre superfici.

$P_L$  = perdita di potenza di tutte le apparecchiature generanti calore in Watt.

$T_i$  = Massima temperatura di funzionamento in  $^{\circ}C$

$T_{amb}$  = Massima temperatura ambiente in  $^{\circ}C$

$k$  = Coefficiente di trasmissione del calore del materiale con cui è costruito l'armadio.

Calcolare le dimensioni di un armadio IP54 (NEMA12) per un convertitore da 11 kW.

Il caso peggiore si ha assumendo le seguenti condizioni:

- 1 Il convertitore lavora alla piú elevata frequenza di switching del PWM.
- 2 L'installazione é conforme al grado di protezione IP54 (NEMA12) che implica il montaggio del convertitore a retroquadro con il dissipatore completamente interno al quadro stesso. Non é prevista alcuna ventilazione dell'armadio e quindi il calore é dissipato esclusivamente dalle pareti.
- 3 L'armadio é appoggiato al pavimento ed accostato ad una parete come mostrato in Fig. 12 per cui la base e la parete di fondo non possono essere considerate come superfici dissipanti il calore. La superficie  $A_e$  che effettivamente conduce il calore é quindi costituita dal frontale, dal sopra e dalle fiancate dell'armadio.
- 4 L'armadio é realizzato con lamiera di acciaio verniciato di 2 mm di spessore.
- 5 La massima temperatura ambiente é 25 °C.

*Calcolo dell'area effettivamente conducente calore.*

I valori delle variabili risultano:

Pl ricavare i valori dalla tavola delle perdite fornita dal costruttore dell'inverter e sommare le perdite di tutti i corpi generanti calore per ottenere il valore totale di PL.

per questo esempio si assume  $PL = 440W$  .

$T_i = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  (tipico per i convertitori di questa taglia)

$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  (tipico per applicazioni in Europa)

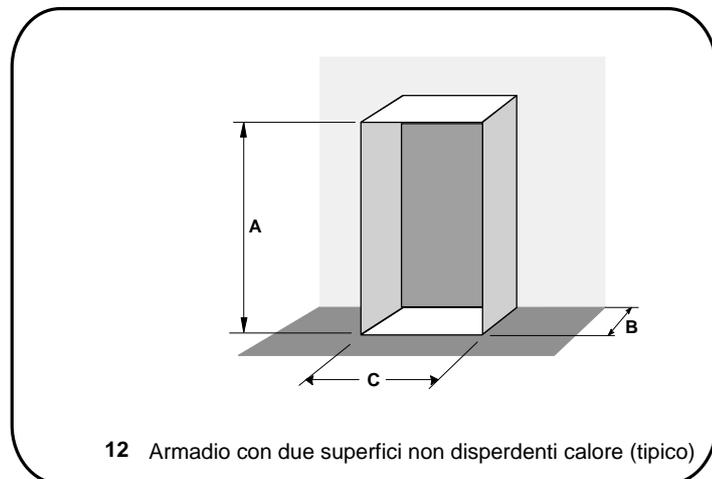
$k = 5.5$  (tipico valore per lamiera di acciaio da 2mm verniciato)

$$A_e = \frac{440}{5.5 (50 - 25)} = 3.2 \text{ m}^2$$

### *Determinare le dimensioni dell'armadio*

Se l'armadio deve essere fabbricato appositamente per seguire l'applicazione, ovviamente si ha un ampio grado di libertà nel determinare le dimensioni.

Se si decide invece di utilizzare un armadio standard fornibile dal mercato, occorre prima di tutto che siano rispettate le norme di installazione. In questo caso l'armadio deve essere in grado di contenere tutte le apparecchiature con i relativi spazi d'aria tra una apparecchiatura e l'altra.



La procedura consiste nel calcolare due delle tre dimensioni - esempio altezza e profondità, quindi calcolare la terza ed infine verificare che lo spazio interno soddisfi le specifiche.

L'area di conduzione effettiva per un armadio appoggiato al pavimento e accostato ad una parete é:

$$A_e = 2AB + AC + BC$$

dove A é l'altezza, B la profonditá e C la larghezza.

Si supponga che l'altezza sia 1.8m e la profonditá 0.5m.

La scelta di queste due grandezze é in genere forzata dall'esigenza di adottare un armadio disponibile sul mercato.

Da queste due grandezze é possibile calcolare  $A_e$  e di conseguenza C.

$$A_e - 2AB = C(A+B)$$

oppure

$$C = \frac{A_e - 2AB}{A + B}$$

sostituendo

$$C = \frac{3.2 - (2 \times 1.8 \times 0.5)}{1.8 + 0.5}$$
$$C = \frac{3.2 - 1.8}{2.3}$$

$$C = 0.61 \text{ m circa.}$$

Occorre ora verificare lo spazio interno. La larghezza del modulo é 330 mm. Essendo richiesti 100 mm di aria libera da ogni lato, la minima larghezza interna dell'armadio deve essere 530 mm o 0.53m. Questo valore é inferiore a quanto calcolato e quindi accettabile. Lo spazio disponibile potrebbe essere utilizzato per inserire nell'armadio altre apparecchiature. Ogni apparecchiatura addizionale deve essere considerata come un fattore nel calcolo delle perdite di potenza PL e richiede il ricalcolo con la procedura sopra descritta.

Se l'armadio deve essere scelto da catalogo, l'area superficiale non deve essere inferiore ad  $A_e$ .

Come regola generale, é meglio posizionare le apparecchiature generanti calore nella parte bassa del quadro per favorire la convezione interna e la corrispondente distribuzione del calore. Se risulta inevitabile il dover posizionare delle apparecchiature generanti calore nella parte alta dell'armadio, potrebbe essere necessario incrementare le dimensioni larghezza e profonditá eventualmente a scapito dell'altezza o prevedere l'adozione di ventilatori per assicurare la circolazione dell'aria.

### **Ventilazione dell'armadio**

Se non é richiesto un alto grado di protezione IP, le dimensioni dell'armadio possono essere ridotte utilizzando un ventilatore per lo scambio d' aria tra l'interno e l'esterno.

Per il calcolo del volume dell'aria di ventilazione  $V$  occorre utilizzare la seguente formula.

$$V = \frac{8.6 \times 10^{-4} P_L}{T_i - T_{amb}}$$

dove  $V$  = flusso d'aria richiesto in  $m^3/h$

e  $P_L$ ,  $T_i$  e  $T_{amb}$  hanno gli stessi valori utilizzati in precedenza.

## FORMULE

### ELETTRICHE

$$\begin{array}{ll}
 U = I R & \text{V} \\
 I = \frac{U}{R} & \text{A} \\
 R = \frac{U}{I} & \Omega \\
 G = \frac{I}{U} & \text{S} \\
 \omega = 2\pi f \quad \text{o} \quad 2\pi n & \text{rad / s} \\
 X_L = \omega L & \Omega \\
 X_C = \frac{1}{\omega C} & \Omega
 \end{array}$$

### Impedenza

$$Z = (R^2 + X^2)^{1/2} \quad \Omega$$

dove  $X = X_L + X_C$  per circuiti in serie

### Potenza ( con tensione alternata sinusoidale )

DC  $P = UI$

AC ( con U e I valori rms )

$S = UI$	}	1 fase	$S = \sqrt{3} UI$	}	3 fasi	VA
$P = UI\lambda$		$Q = (S^2 + P^2)^{1/2}$	$P = \sqrt{3} UI\lambda$		W	
					var	

### Rendimento ( per motori )

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

**Fattore di potenza**

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\text{fattore di distorsione}}{\text{fattore di sfasamento}} = \frac{I_1}{I} \cos \phi$$

$$\lambda = g_l \cos \phi$$

**Contenuto armonico della tensione ( fattore di distorsione )**

$$K_u = (1 - G_u^2)^{1/2}$$

**Contenuto armonico della corrente ( fattore di distorsione )**

$$K_i = (1 - G_i^2)^{1/2}$$

**Contenuto della frequenza fondamentale di tensione**

$$g_u = \frac{U_1}{U}$$

$U_1$  = valore RMS della componente fondamentale di tensione

$U$  = valore RMS della tensione totale

**Contenuto della frequenza fondamentale di corrente**

$$g_l = \frac{I_1}{I}$$

$I_1$  = valore RMS della componente fondamentale di corrente

$I$  = valore RMS della corrente totale

**Fattore di sfasamento**

$$\cos \phi = \frac{U_{d\alpha}}{U_d}$$

dove  $\phi$  é l'angolo di fase tra le sinusoidi di corrente e di tensione

**Valore ideale di tensione DC controllata**

$$U_{d\alpha} = U_d \cos \alpha \quad V$$

dove  $\alpha$  é l'angolo di ritardo

**Contenuto ideale di AC di una tensione DC con angolo di ritardo nullo**

$$W = (\sum U^2)^{1/2} / U_d \quad \text{rad / s}$$

**Contenuto ideale di AC di una tensione DC con angolo di ritardo  $\alpha$**

$$W_{\alpha} = (\sum U_{\alpha}^2)^{1/2} / U_d$$

**Relazioni di trifase**

U e I sono quantità RMS

Connessione a stella

Tensione di linea  $U_L = \sqrt{3}$  x tensione di fase  $U_F$

Corrente di linea  $I_L =$  corrente di fase  $I_F$

Connessione a triangolo

Tensione di linea  $U_L =$  tensione di fase  $U_F$

Corrente di linea  $I_L = \sqrt{3}$  x corrente di fase  $I_F$

**MECCANICHE****Moto lineare****Spazio, velocità, accelerazione e tempo****Spazio** percorso dopo un tempo  $t$  a velocità costante

$$s = vt \quad m$$

**Accelerazione lineare**

$$a = \frac{v}{t} \quad m \, s^{-2}$$

**Velocità** acquisita dopo un tempo  $t$  di accelerazione costante

$$v = u + at \quad m/sec$$

con  $u$  = velocità iniziale

**Spazio** percorso dopo un tempo  $t$  con accelerazione costante

$$S = ut + (1/2 at^2) \quad m$$

Equazione inversa velocità - accelerazione - spazio

$$v^2 - u^2 = 2 a s \quad m/sec$$

**Forza, Lavoro, Energia e Potenza****Forza acceleratrice**

$$F = ma \quad \text{oppure} \quad mg \quad N, \, kg \, m \, s^{-2}$$

$$F = \frac{mv}{t} \quad N, \, kg \, m \, s^{-2}$$

**Energia cinetica** a velocità costante

$$W = \frac{1}{2} mv^2 \quad Nm, \, Ws$$

**Lavoro compiuto** da una forza

$$L = F s \quad \text{Nm, Ws}$$

corrispondenza con l'energia cinetica in presenza di una accelerazione costante

$$W = 1/2m(V^2 - U^2) \quad \text{Nm, Ws}$$

**MOTO CIRCOLARE**

( Angoli misurati in radianti)

Sfasamento, velocità, accelerazione e tempo

**Velocità angolare**

$$\omega = 2 \pi n \quad ( n \text{ in riv sec}^{-1} ) \quad \text{rad sec}^{-1}$$

oppure  $\frac{\pi n}{30} \quad ( n \text{ in riv min}^{-1} ) \quad \text{rad sec}^{-1}$

**Accelerazione angolare**

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{2\pi n}{t} \quad ( n \text{ in riv sec}^{-1} ) \quad \text{rad sec}^{-2}$$

oppure  $\frac{\pi n}{30} \quad ( n \text{ in riv min}^{-1} ) \quad \text{rad sec}^{-2}$

**Sfasamento angolare** dopo un tempo t con accelerazione costante

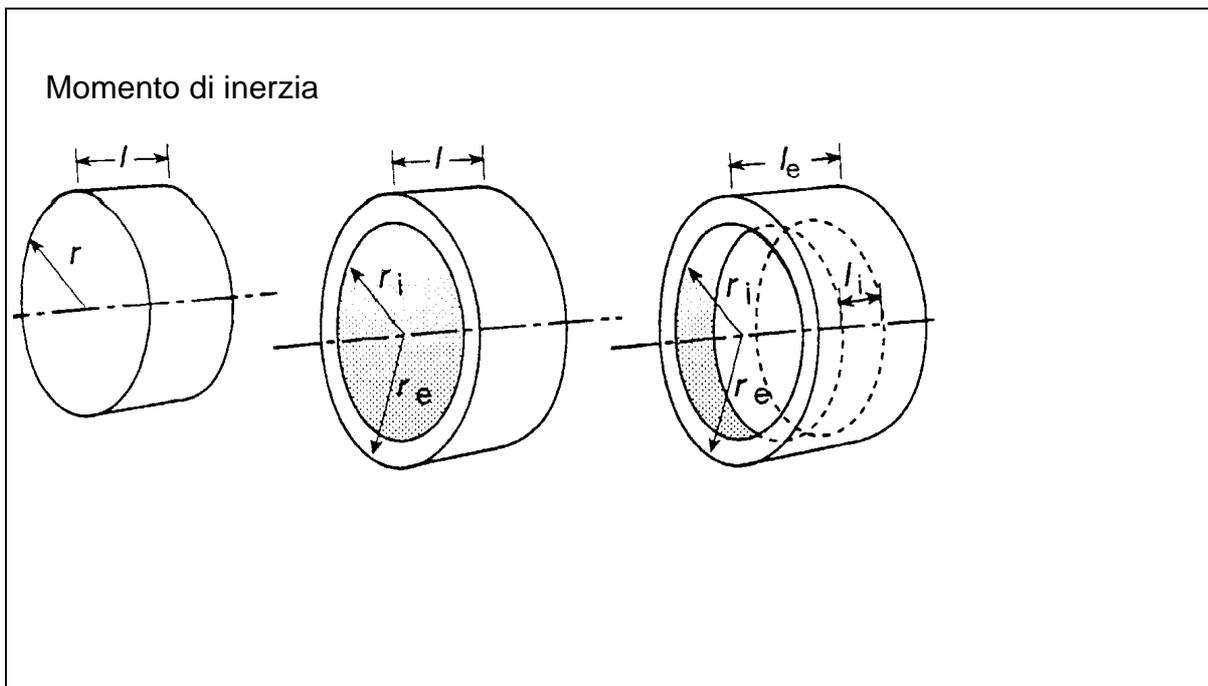
$$Y = \omega_0 t + (1/2 \alpha t^2) \quad \text{rad}$$

**Velocità angolare** dopo un tempo t con accelerazione costante

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad \text{rad sec}^{-1}$$

Relazione inversa velocità - accelerazione- angolo

$$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\gamma \quad \text{rad sec}^{-2}$$



### Momento di inerzia

Se il diametro é noto, sostituirlo nelle seguenti equazioni.

$$2\pi r = \pi d \quad 4\pi r^2 = \pi d^2$$

$$r = \frac{d}{2} \quad r^2 = \frac{d^2}{4}$$

#### Cilindro solido

$$J = \frac{mr^2}{2} \quad \text{Kgm}^2$$

$$\text{oppure } \frac{\pi}{32} \rho l r^4 \quad \text{Kgm}^2$$

dove  $l$  é la lunghezza (m) e  $\rho$  é la densità ( $\text{Nm}^{-3}$ )

#### Cilindro cavo

$$J = m(r_e^2 - r_i^2) / 2 \quad \text{Kgm}^2$$

$$\text{Oppure } \pi/32 \rho l (r_e^2 - r_i^2)^2 \quad \text{Kgm}^2$$

dove  $l$ ,  $\rho$  sono lunghezza, densità e  $r_e$  ed  $r_i$  sono rispettivamente i diametri esterni ed interni

## Ballerino

Occorre sommare i momenti di inerzia di un cilindro solido (mozzo), di un cilindro cavo (braccio) e di un cilindro cavo (corona).

### Massa per momento di inerzia

Cilindro solido

$$m = 2 \pi r^2 l \frac{\rho}{g} \quad \text{kg}$$

Cilindro cavo

$$m = 2\pi (r_e^2 - r_i^2) l \rho/g \quad \text{kg}$$

Corona cilindrica

$$m = 2\pi[(r_e^2 - r_i^2) l_e + (r_i^2 l_i)] \rho/g \quad \text{kg}$$

## Forza, Lavoro, Energia e Potenza

**Coppia accelerante** (corrispondente alla forza lineare accelerante)

$$M = J \omega \quad (\text{dove } \omega = 2 \pi \text{ radianti}) \quad \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

**Tempo** di accelerazione (o frenatura)

$$t = \frac{J \omega}{M} \quad \text{s}$$

**Coppia accelerante** in termini di rivoluzioni

dove

$d$  in metri,  $t$  in secondi,  $\Delta$  é la differenza tra i valori iniziali e finali, e

$n$  in riv  $\text{s}^{-1}$

$$M = \frac{\pi}{4} m d^2 \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$n$  in riv  $\text{min}^{-1}$

$$M = \frac{\pi}{240} m d^2 \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

**Tempo di accelerazione** in termini di rivoluzioni con

$n$  in riv  $\text{s}^{-1}$

$$t = \frac{\pi}{4} m d^2 \frac{\Delta n}{M}$$

oppure  $\frac{2\pi J \Delta n}{M} \quad \text{s}$

$n$  in riv  $\text{min}^{-1}$

$$t = \frac{\pi}{240} m d^2 \frac{\Delta n}{M}$$

oppure  $\frac{\pi J \Delta n}{30 M} \quad \text{s}$

**Energia cinetica** a velocità angolare costante

$$W = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad \text{N m, W s}$$

n in riv s<sup>-1</sup>

$$W = 2\pi^2 J \omega^2 \quad \text{N m, W s}$$

n in riv min<sup>-1</sup>

$$W = \frac{\pi^2 J n^2}{1800} \quad \text{N m, W s}$$

**Lavoro** di una forza accelerante

$$W = M \gamma r \quad \text{N m, W s}$$

- o variazione di energia cinetica

$$W = \frac{1}{2} J(\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad \text{N m, W s}$$

**Potenza - movimento lineare e rotatorio**

Rendimento

$$\eta = \frac{\text{Energia fornita}}{\text{Energia utilizzata}} \quad \text{per unità}$$

$$P = F v \quad \text{N m s}^{-1}, \text{ W}$$

$$P = \frac{m v^2}{t} \quad \text{N m s}^{-1}, \text{ W}$$

$$P = M \omega \quad \text{N m s}^{-1}, \text{ W}$$

n in riv s<sup>-1</sup>

$$P = 2 \pi M n \quad \text{N m s}^{-1}, \text{ W}$$

n in riv min<sup>-1</sup>

$$P = \frac{\pi M n}{30} \quad \text{N m s}^{-1}, \text{ W}$$

$$P = \frac{M n}{9550} \quad \text{kW}$$

Potenza di pilotaggio pompe

$$P = \frac{Q \times h \times \rho}{1.02 \times 3600 \times \eta} \quad \text{kW}$$

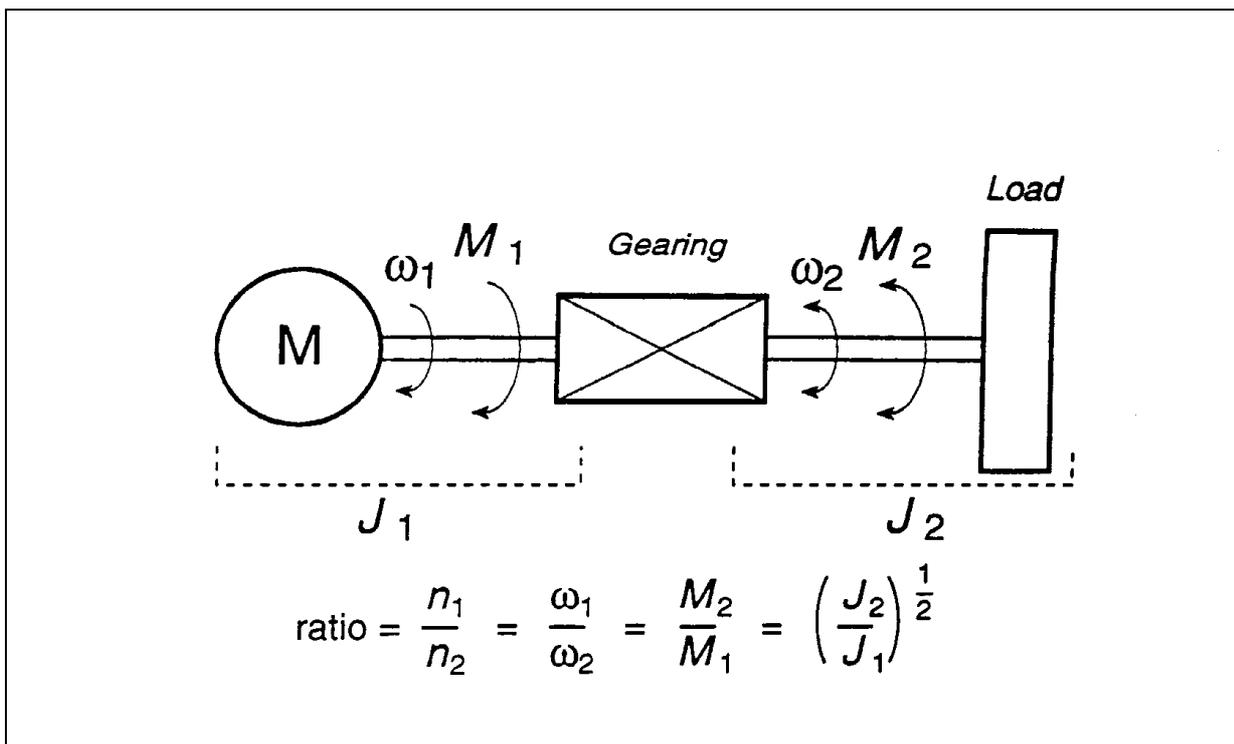
dove  $Q$  = portata  $m^3/ora$   
 $h$  = altezza di sollevamento  $m$   
 $\rho$  = densità del fluido  $kg\ m^{-3}$

Rapporto di riduzione  $k$  (trascurando le perdite nel riduttore)

$$K = n_1 / n_2 = \omega_1 / \omega_2 = M_1 / M_2 = (J_2 / J_1)^{1/2}$$

Inerzia totale all'albero motore (inerzia riflessa)

$$J_{totale} = J_1 + \frac{J_2}{k^2} \quad (\text{si veda figura seguente})$$



## FATTORI DI CONVERSIONE

Per conversione inversa, moltiplicare per l' inverso del fattore di conversione dato

### TEMPERATURA

Unitá SI - gradi Kelvin (K)

DA	A	SI ESEGUA
Gradi Centigradi (Celsius) (°C)	K	+273.15
Gradi Fahrenheit (°F)	K	$[(F-32) \times 0.556]+273.15$

### LUNGHEZZE

Unitá SI - metri

DA	A	MOLTIPLICARE PER
pollici (inches)	m	$2.54 \times 10^{-2}$
piedi (feet)	m	0.3048
yarde (yards)	m	0.9144
miglia (miles)	m	1609.344
miglia nautiche	m	1853

### AREA

Unitá SI - metri quadrati (m<sup>2</sup>)

DA	A	MOLTIPLICARE PER
Pollici quadri	m <sup>2</sup>	$6.45 \times 10^{-4}$
piedi quadrati	m <sup>2</sup>	$9.29 \times 10^{-2}$
yarde quadrate	m <sup>2</sup>	0.8361
miglia quadrati	m <sup>2</sup>	$2.59 \times 10^6$
agri	m <sup>2</sup>	4047
ettari (ha)	m <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>

Per conversione inversa, moltiplicare per l' inverso del fattore di conversione dato

## VOLUME

Unitá SI - metri cubi (m<sup>3</sup>)

DA	A	MOLTIPLICARE PER
pollici cubi	m <sup>3</sup>	6.45 x 10 <sup>-4</sup>
piedi cubi	m <sup>3</sup>	2.83 x 10 <sup>-2</sup>
yarde cubiche	m <sup>3</sup>	0.765
pinta (britannico)	m <sup>3</sup>	5.68 x 10 <sup>-4</sup>
pinta (USA)	m <sup>3</sup>	4.73 x 10 <sup>-4</sup>
gallone (britannico)	m <sup>3</sup>	4.55 x 10 <sup>-3</sup>
gallone (USA)	m <sup>3</sup>	3.79 x 10 <sup>-3</sup>

## MASSA

Unitá SI - kilogrammi (kg)

DA	A	MOLTIPLICARE PER
oncia (oz)	kg	2.84 x 10 <sup>-2</sup>
libbra (lb)	kg	0.4536
tonnellata (britannica)	kg	1016
tonnellata (USA)	kg	907.2
tonnellata (metrica)	kg	10 <sup>3</sup>

Per conversione inversa, moltiplicare per l' inverso del fattore di conversione dato

## FORZA & PESI

Unitá SI - Newton (N)

DA	A	MOLTIPLICARE PER
oncia peso (oz f)	N	0.278
libbra peso (lb f)	N	4.448
tonnellata peso (ton f)	N	9964
grammo peso (g f)	N	$9.807 \times 10^{-2}$
pond (p)	N	$9.807 \times 10^{-2}$
kilogrammo peso (kg f)	N	9.807
dine	N	$10^{-5}$

## PRESSIONE

Unitá SI - Pascal (Pa)

DA	A	MOPLTIPLICARE PER
atmosfera (atm)	Pa	$9.807 \times 10^{-3}$
pollici di acqua (in WG)	Pa	248.9
pollici di mercurio (in Hg)	Pa	3385
libbra forza su pollice quadro (lb f in <sup>-2</sup> )	Pa	6895
libbra forza su piede quadro (lb f ft <sup>-2</sup> )	Pa	47.88
millimetri d'acqua (mm WG)	Pa	10.34
millimetri di mercurio (mm Hg) (torr)	Pa	131
Newton su metro quadro (Nm <sup>-2</sup> )	Pa	1
bar	Pa	$10^5$

Per conversione inversa, moltiplicare per l' inverso del fattore di conversione dato

### VELOCITÀ LINEARE

Unità SI - metri al secondo ( $\text{ms}^{-1}$ )

DA		A
piedi al secondo (f s-1)	$\text{ms}^{-1}$	0.3048
piedi al minuto (f m-1)	$\text{ms}^{-1}$	$5.08 \times 10^3$
miglia all'ora (mph)	$\text{ms}^{-1}$	0.447
metri al minuto (m m-1)	$\text{ms}^{-1}$	$1.667 \times 10^{-2}$
kilometri all'ora (km h-1)	$\text{ms}^{-1}$	0.2778

### VELOCITÀ ANGOLARE

Unità SI - radianti al secondo ( $\text{rad s}^{-1}$ )

DA	A	MOLTIPLICARE PER
rivoluzioni al minuto (rpm)	$\text{rad s}^{-1}$	$0.1037 = 2\pi/60$
rivoluzioni per secondo (rs-1)	$\text{rad s}^{-1}$	$6.283 = 2\pi$
gradi al secondo ( $^{\circ} \text{s}^{-1}$ )	$\text{rad s}^{-1}$	$1.75 \times 10^{-2} = 2\pi/360$

### COPPIA

Unità SI - Newton metro (Nm)

DA	A	MOLTIPLICARE PER
oz f in	Nm	$7.062 \times 10^{-3}$
lb f in	Nm	0.1129
lb f ft	Nm	1.356
kg f m	Nm	9.8067
kp m	Nm	9.8067

Per conversione inversa, moltiplicare per l' inverso del fattore di conversione dato

## ENERGIA o LAVORO

Unitá SI - Joule (J)

British Thermal Unit (Btu)	J	$1.055 \times 10^3$
therm (Btu x 105)	J	$1.055 \times 10^8$
calorie (cal)	J	4.187
kilowattora (kWh)	J	$3.601 \times 10^6$

## POTENZA

Unitá SI - kilowatt (kW)

Cavallo vapore (hp)	kW	0.7457
cheval vapeur (cv)	kW	0.7355
Piede libbra forza al secondo (ft lb f s <sup>-1</sup> )	kW	$1.36 \times 10^{-3}$
Btu a secondo (Btu s <sup>-1</sup> )	kW	1.055
kilocalorie al secondo (kcal s <sup>-1</sup> )	kW	4.1868

Per conversione inversa, moltiplicare per l' inverso del fattore di conversione dato

## MOMENTO di INERZIA

Unitá SI - Kilogrammo metro quadro ( $\text{kg m}^2$ )

DA	A	MOLTIPLICARE PER
$\text{kg f m}^2 (=GD^2)$	$\text{kgm}^2$	0.25
$\text{lb f ft}^2 (=WK^2)$	$\text{kgm}^2$	$4.214 \times 10^{-2}$
$\text{kp m s}^2$	$\text{kgm}^2$	9.807
$\text{ft lb f s}^2$	$\text{kgm}^2$	1.356
$\text{lb f in}^2$	$\text{kgm}^2$	$2.926 \times 10^{-4}$
$\text{oz f in}^2$	$\text{kgm}^2$	$1.829 \times 10^{-5}$

## FLUSSO

Unitá SI - metri cubi per secondo ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )

DA	A	MOLTIPLICARE PER
piedi cubi al secondo (cusec)	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$2.83 \times 10^{-3}$
piedi cubi al minuto (cfm)	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$4.72 \times 10^{-4}$
galloni all'ora (britannici)	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$1.26 \times 10^{-6}$
galloni per ora (USA)	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$1.05 \times 10^{-6}$
litri al secondo ( $\text{l s}^{-1}$ )	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$\times 10^{-3}$
litri al minuto ( $\text{l min}^{-1}$ )	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$1.67 \times 10^{-5}$
metri cubi per minuto ( $\text{m}^3\text{min}^{-1}$ )	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$1.67 \times 10^{-2}$
metri cubi per ora ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ )	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$	$2.78 \times 10^{-4}$

## GLOSSARIO

### *Accelerazione*

*angolare* - indica il grado di variazione della velocità angolare.

Simbolo SI,  $\alpha$ . Unità  $\text{rad/s}^2$

*lineare* - indica il grado di variazione della velocità lineare. Simbolo SI a. Unità  $\text{m/s}^2$ .

### *Velocità angolare*

Angolo descritto da un corpo in rotazione nell'unità di tempo.

Simbolo  $\omega$ . Unità  $\text{rad/s}$ .

### *Fattore di sfasamento*

È definito come fattore di potenza per la frequenza fondamentale o, Potenza in ingresso (media) espressa in watt.

Corrisponde a:

tensione fondamentale rms x corrente fondamentale rms

Si esprime come  $\cos \phi$  dove  $\phi$  è l'angolo di sfasamento.

### *Drive o Azionamento*

Termine generico utilizzato per identificare l'elettronica di controllo della velocità o, più propriamente, l'intera catena di movimentazione dal modulo elettronico fino al motore compresi.

### *Contenitore*

Una struttura chiusa non necessariamente dotata di ventilazione forzata, progettata per proteggere apparecchiature elettriche da contatti accidentali, interferenze o sostanze dannose presenti nell'ambiente. In alcuni casi permette l'utilizzo delle apparecchiature in totale sicurezza anche quando impiegate in ambienti pericolosi.

***FLC***

Corrente a pieno carico. É la corrente che il motore é in grado di fornire alla massima velocità in presenza del massimo carico, quando alimentato alla tensione e frequenza nominali.

***Inverter a controllo vettoriale***

Si tratta di un particolare tipo di inverter in grado di controllare i vettori del flusso magnetico indotto nello statore e nel rotore di un motore asincrono AC.

***Kilogrammo kg***

Nel sistema SI di unità, rappresenta l'unità di misura della massa. Spesso viene erroneamente utilizzato anche come unità di misura del peso.

***Inerzia***

Rappresenta la tendenza di una massa ad opporsi al cambiamento del suo stato di quiete o alla variazione di velocità.

***Massa***

É una proprietà indipendente di una sostanza che si manifesta attraverso la sua inerzia. Simbolo SI, m. Unità, kg.

***Momento di inerzia***

É la proprietà tipica di un corpo in rotazione, ad opporsi al cambiamento del suo stato di quiete o alla variazione di velocità. Simbolo SI, J. Unità kg m<sup>2</sup>.

***Sovraccarico***

Un carico che richieda per la sua movimentazione una quantità di corrente superiore all'FLC di una macchina elettrica.

### *Fattore di potenza*

Corrisponde al rapporto tra la potenza attiva e la potenza apparente fornita da una sorgente sinusoidale. Per un'onda alternata sintetizzata come quella disponibile in uscita ad un inverter si considera il rapporto:

corrente rms fondamentale / corrente rms totale

Simboli SI: per tensioni e correnti sinusoidali,  $\cos \phi$ ;  
per tensioni e correnti non sinusoidali,  $\lambda$ .

### *Soft Starter*

Controllo della tensione fornita ad un motore AC attraverso il controllo della sequenza di accensione di un ponte a tiristori.

### *Speed*

Termine comunemente utilizzato per specificare lo spazio percorso nell'unità di tempo sia nei moti lineari che circolari.

### *Velocity*

Termine utilizzato per specificare lo spazio percorso nell'unità di tempo nei moti lineari.

Simboli SI,  $u$  e  $v$ . Unità m/s.

In italiano si utilizza la parola velocità sia per speed che per velocity.

### *VSD (variabile speed drive)*

Normalmente un inverter in grado di controllare la tensione e la frequenza fornita ad un motore AC oppure un convertitore in grado di controllare le tensioni di armatura ed il campo di un motore DC.

### *Peso*

La forza verticale determinata dalla massa e dall'accelerazione di gravità. (Di frequente viene espresso in kilogrammi. Quando un peso è espresso in Kg, questo è una massa.

Simbolo SI, nessuno. Unità, N.