

Sintesi corso

“ FB14 ”

*Introduzione alla variazione
elettronica della velocità dei motori*

Docente: M. Manione
Email: marco.manione@se.com

Life Is On

Schneider
Electric



Nozioni fondamentali di meccanica

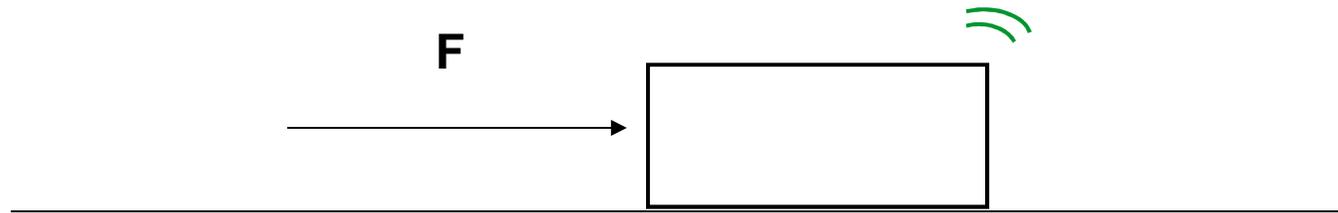
Formatore: Marco Manione
Email: marco.manione@se.com

Life Is On

Schneider
Electric

La Forza

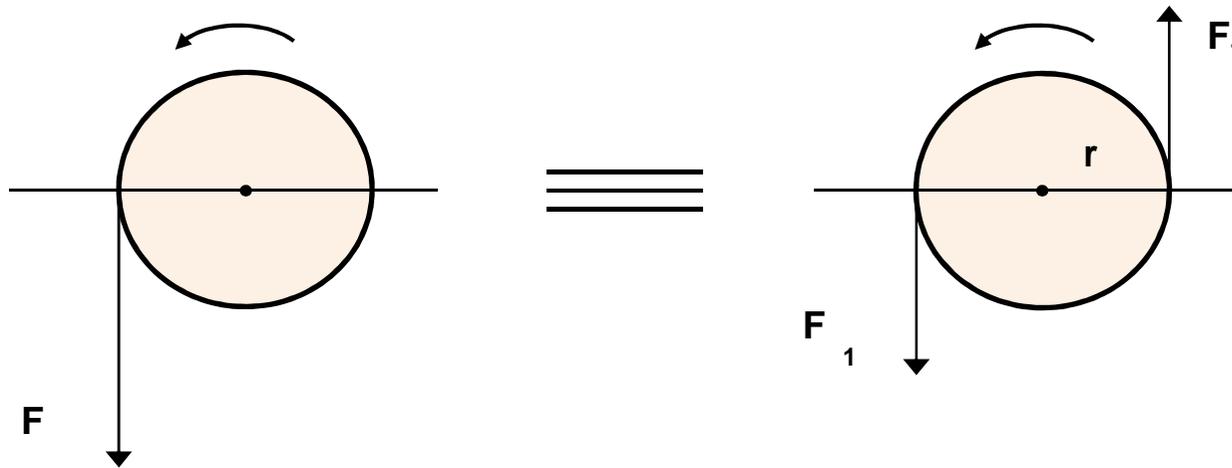
Grandezza fisica che esprime la **capacità di mettere in movimento, accelerare, arrestare un corpo.**



$$F: \text{forza} = m \cdot a$$

La Coppia

È l'equivalente della Forza, riferita ad un movimento angolare.



$$F_1 = F/2$$

$$C = 2F_1 \cdot r$$

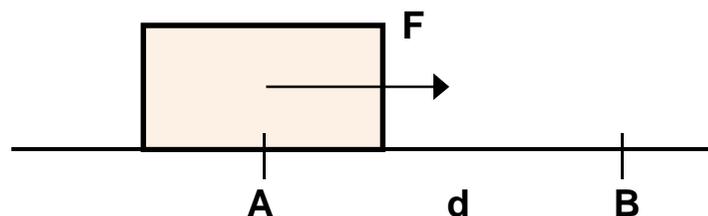
$$C = F \cdot r$$

- L'unità di misura della coppia è il $N \cdot m$ (Newton per metro).

Il Lavoro

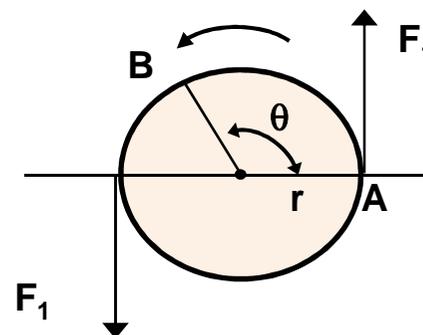
È il prodotto della forza (o coppia) applicata per la distanza percorsa dall'oggetto (indipendentemente dal tempo impiegato).

- Movimento lineare



$$L = F \cdot d$$

- Movimento angolare



$$L = 2F_1 \cdot r \cdot \theta =$$

$$L = C \cdot \theta$$

(θ espresso in radianti (rad))

L'unità di misura del lavoro è il Joule (J)

La Potenza

Rappresenta il lavoro svolto in un determinato tempo.

$$P = \frac{\text{LAVORO}}{\text{TEMPO}}$$

La potenza si esprime in Watt (W).

1 W corrisponde al lavoro di 1 J eseguito in un secondo.

La potenza su movimenti angolari

Per un movimento angolare risulta che:

$$P = \frac{\text{LAVORO}}{\text{TEMPO}} = \frac{C \cdot \theta}{t} = C \frac{\theta}{t}$$

Il termine θ/t (espresso in rad/s) coincide con la velocità angolare ω .

$$P = C \cdot \omega$$

P espresso in W

C espresso in Nm

ω espresso in rad/s

La potenza su movimenti angolari

La velocità angolare viene comunemente espressa in giri al minuto (g/min) piuttosto che in radianti al secondo (rad/s).

Tra le due grandezze c'è il fattore $\frac{2 \cdot \pi}{60}$ quindi la potenza si può esprimere:

$$P_{(W)} = C_{(Nm)} \cdot \omega_{(rad/s)}$$

$$P_{(W)} = C_{(Nm)} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot N_{(g/min)}$$

La potenza su asse motore

Attenzione:

se $\omega_n =$ velocità nominale macchina
e $C_n =$ coppia nominale macchina



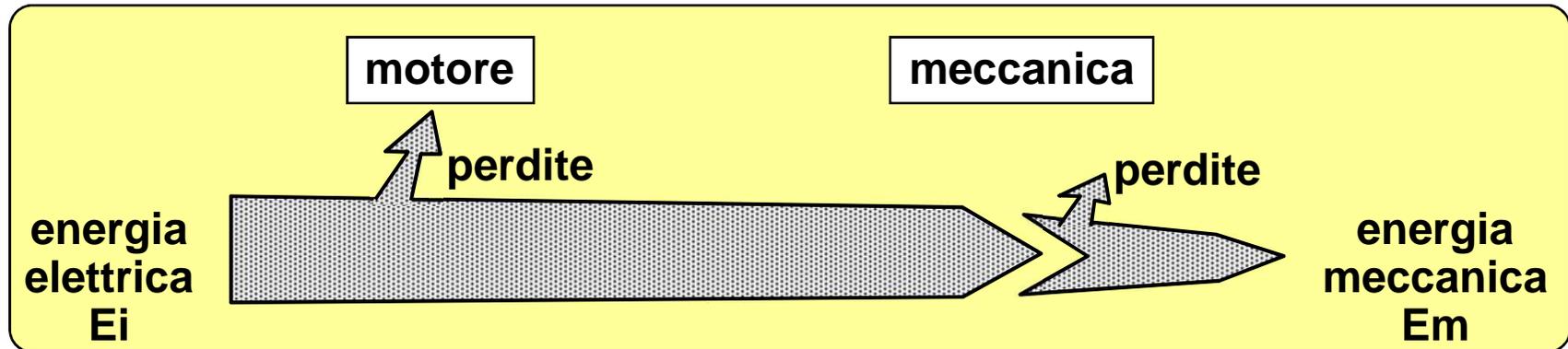
$$P_n = C_n \cdot \omega_n$$

allora $\omega_R = 0,1 \omega_n$ (velocità ridotta)



$$P_R = C_n \cdot \omega_R = 0,1 P_n$$

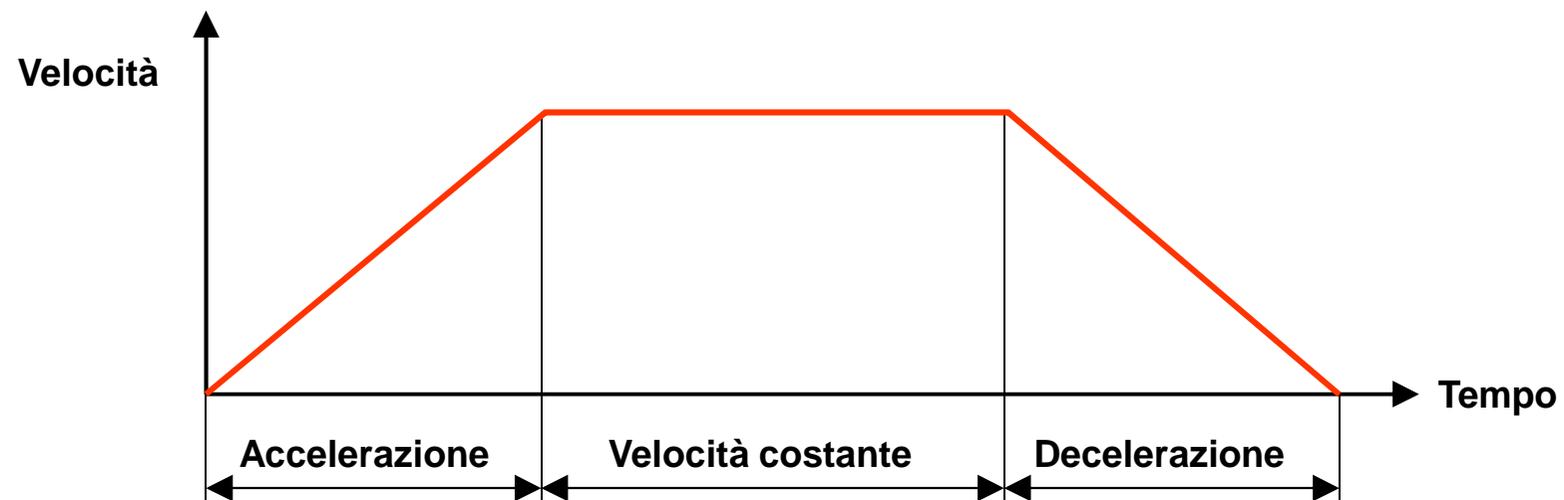
Il Rendimento



- Il rendimento $\eta = \frac{E_m}{E_i}$ è sempre < 1
- Per il dimensionamento del motore ci si basa su E_m .

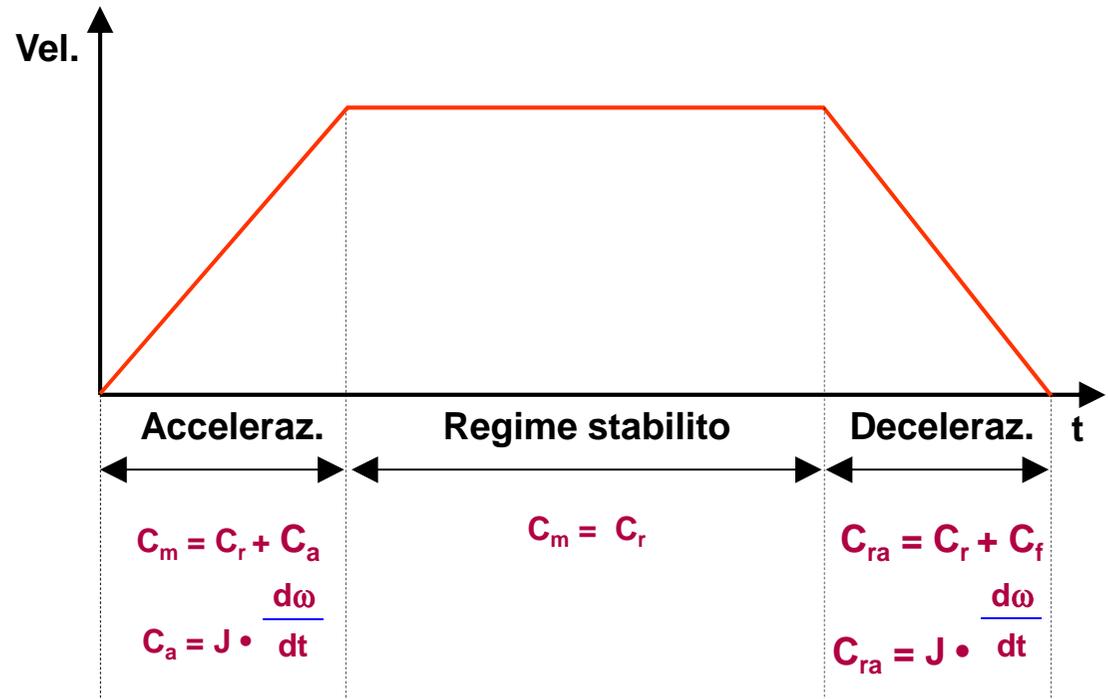
Le fasi del movimento

- Accelerazione
- Avanzamento a velocità costante
- Decelerazione.



Le fasi del movimento: coppie richieste

- $C_{m.} =$
Coppia motrice
- $C_{r.} =$
Coppia resistente
- $C_{a.} =$
Coppia di accelerazione
- $C_{f.} =$
Coppia di frenatura
- $C_{ra.} =$
Coppia di rallentamento



Le fasi del movimento: coppie richieste

- Arresto a ruota libera

- La macchina si arresta in un intervallo di tempo pari a:

$$dt = J \cdot \frac{d\omega}{C_r}$$

- Arresto frenato

- Adottato quando il tempo di arresto libero è troppo elevato.

- La coppia di frenatura C_f può essere fornita da:

- un freno meccanico;
- un motore funzionante da generatore;
- una resistenza elettrica.

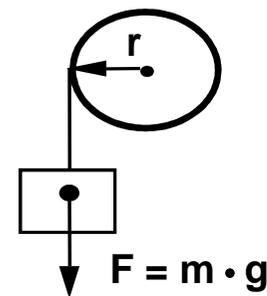
$$C_{ra} = C_r + C_f = C_r + J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Esempio di coppia resistente e trascinante

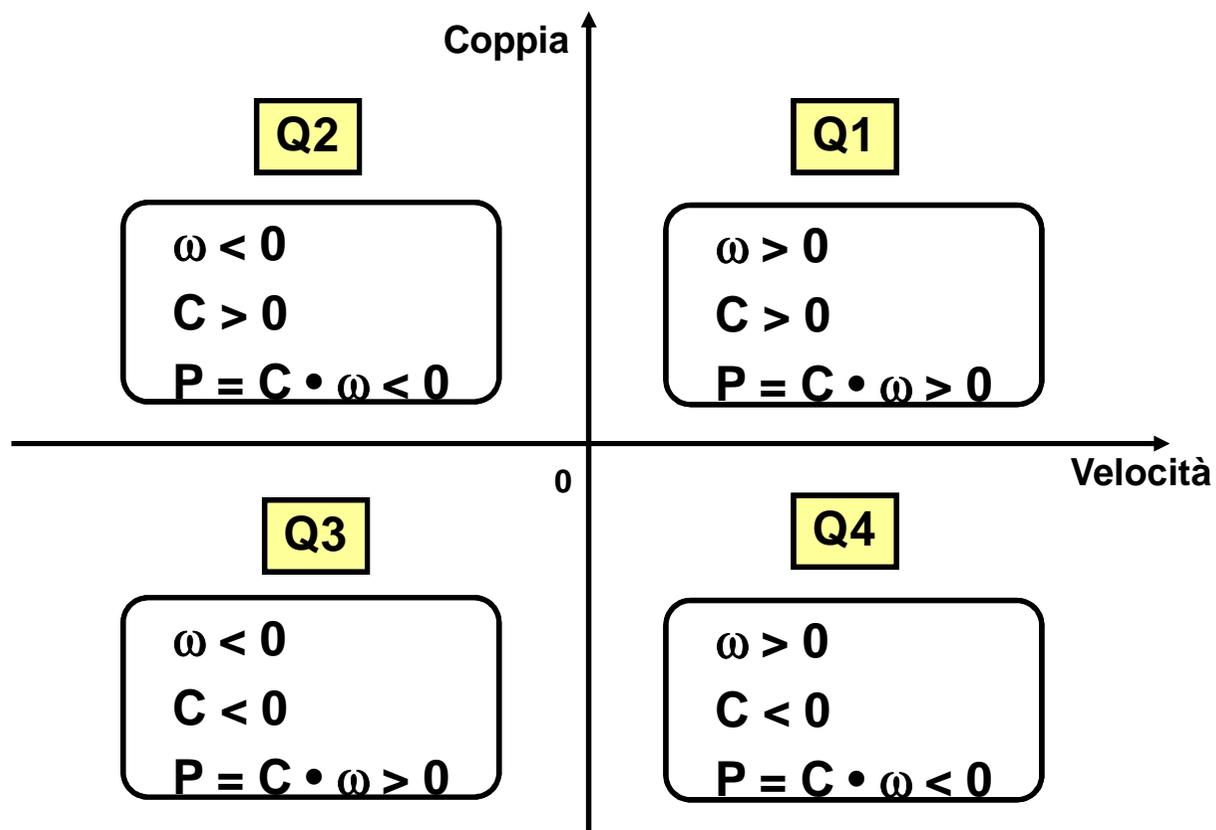
Il sollevamento e la discesa di un corpo verticale

- Si ha una coppia trascinante quando la meccanica trascina il motore. Occorre prevedere un sistema di frenatura.
- **Movimenti orizzontali:**
 - nel caso di un rallentamento rapido;
 - azione del vento nella stessa direzione del movimento del mobile (esterno).
- **Movimenti verticali:**
 - per effetto del peso.

$$C_t = F \cdot r$$

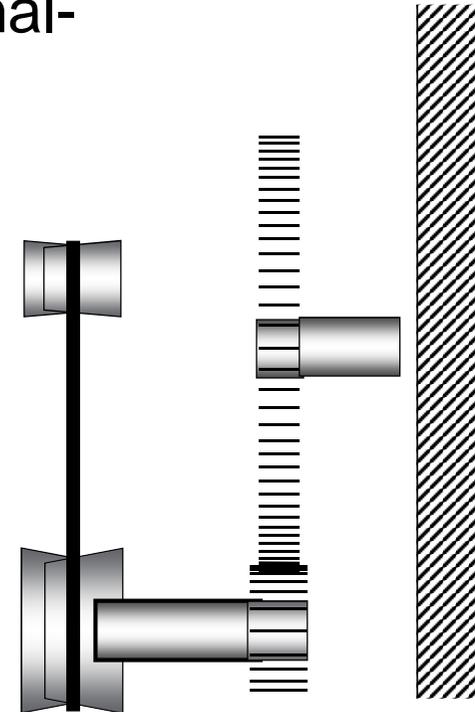
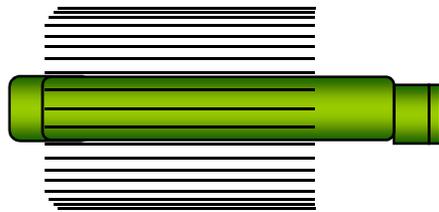


I quattro quadranti del lavoro



La catena cinematica

In un qualsiasi cinematismo è normalmente presente anche un riduttore che



Macchina

ha lo scopo di trasmettere il moto variando il rapporto fra i giri dell'albero trainante e quelli dell'albero trainato. Anche il riduttore, ovviamente, è dotato di inerzia.

Il riduttore: effetti sulla coppia

Un riduttore con rapporto di riduzione "K" riduce di K volte la velocità ed aumenta di K volte la coppia.



Motore	Riduttore	Vel. Uscita	Carico	Vel. Lineare
1.500 g/min	K = 10	150 g/min	1 t	100 m/min
	K = 100	15 g/min	10 t	10 m/min
	K = 0,1	15.000 g/min	0,01 t	10.000 m/min

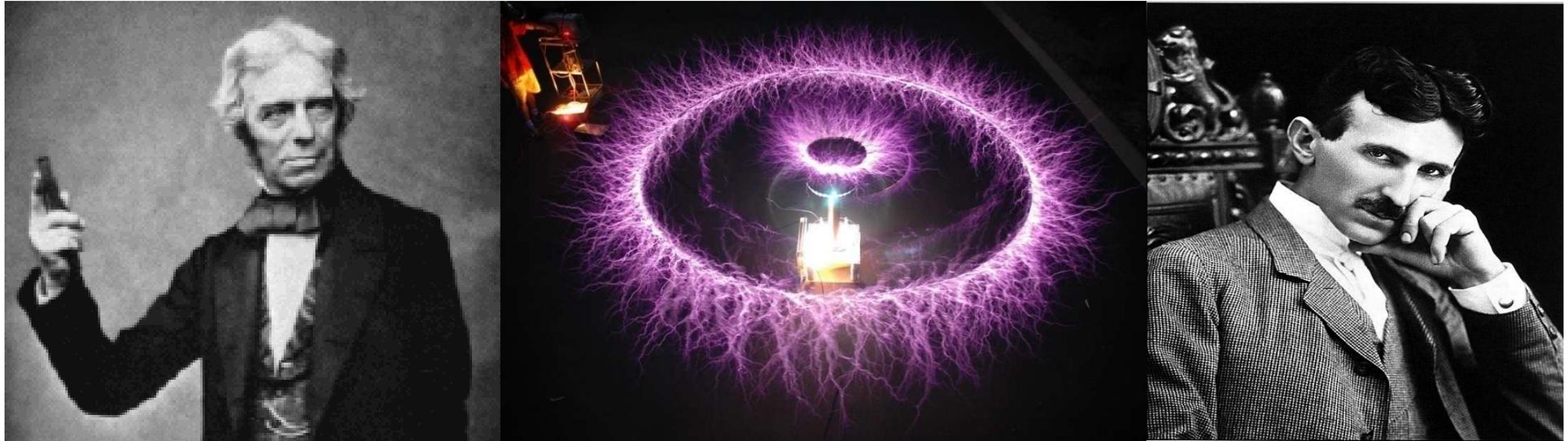
A photograph of the Aurora Borealis (Northern Lights) in a snowy forest. The sky is dark with green and white auroral bands. The foreground shows the silhouettes of evergreen trees against a snowy ground.

Cenni sui fenomeni elettromagnetici
Il motore a corrente continua
Il motore asincrono trifase

Formatore: Marco Manione
Email: marco.manione@se.com

Life Is On

Schneider
Electric



Tutti i motori elettrici sfruttano il fenomeno elettromagnetico, ossia l'interazione fra attività elettriche e magnetiche.

La materia è estremamente complessa ed affascinante...cerchiamo di capire i principi generali

Perché è importante conoscere le
caratteristiche di un motore?

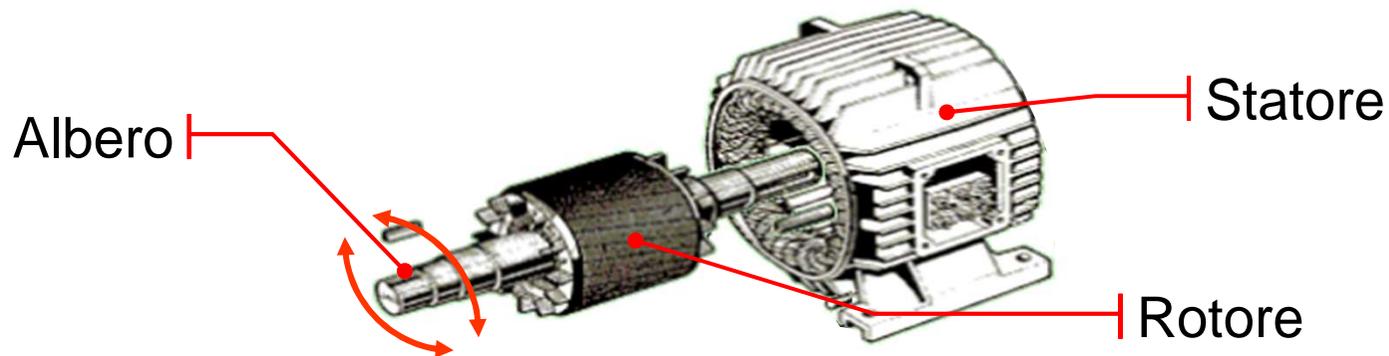
Come si può parlare con competenza di una
soluzione
per variarne elettronicamente la velocità
se non se ne conoscono i principi di
funzionamento?

Illustrando le caratteristiche dei motori
capiremo le ragioni
per cui
è necessariamente
nata la tecnologia dei VFD

In generale

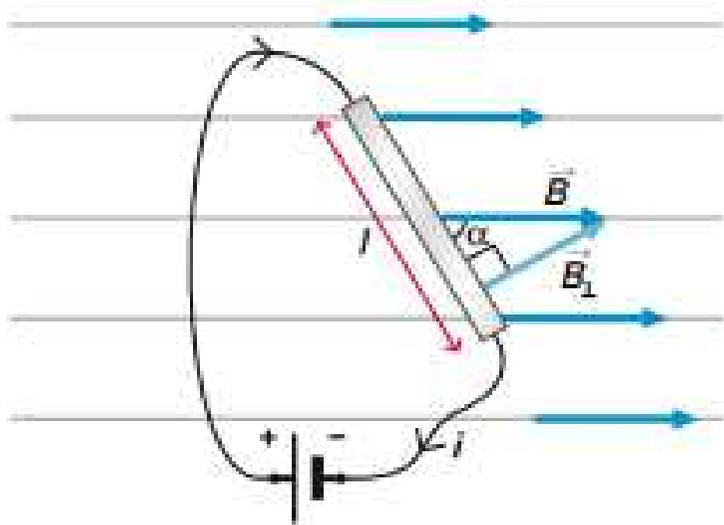
Tutti i motori elettrici sono fondamentalmente composti da due parti: lo **statore**, che è la carcassa fissata al suolo o alla macchina tramite flangia, e il **rotore** che è la parte libera di ruotare all'interno dello statore.

Ciascuno di essi viene magnetizzato con opportuni metodi generando in tal modo l'interazione elettomagnetica.



Grandezze fondamentali

Forze su conduttore percorso da corrente



▲ **Figura 1**

Il conduttore non è perpendicolare al vettore \vec{B} , ma forma con esso un angolo diverso da 90° .

$$F = B_\perp \cdot i \cdot l$$

forza (N) intensità di corrente (A)
componente perpendicolare del campo magnetico (T) lunghezza del conduttore (m)

$$B_\perp = B \cdot \sin \alpha$$

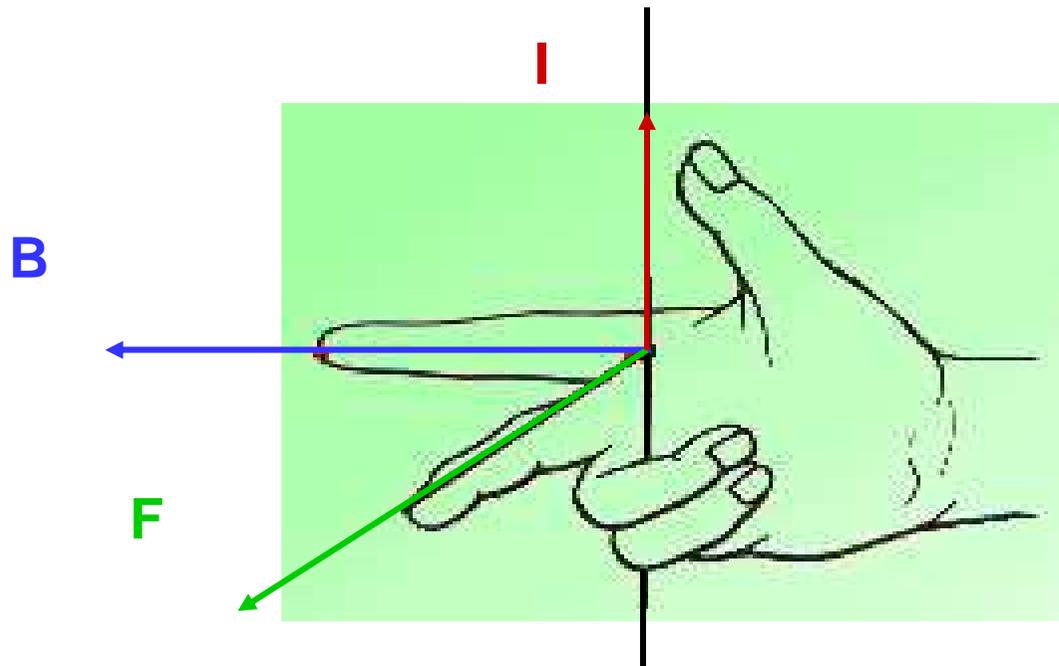
$$F = B * I * L \sin \alpha$$

Forze vettoriali

La regola della mano destra

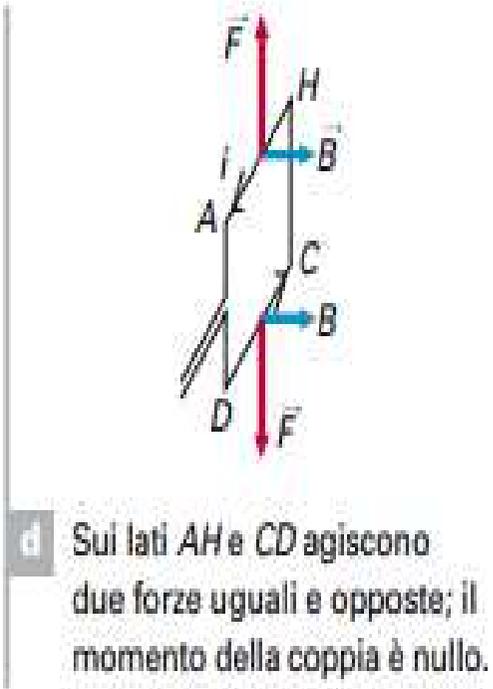
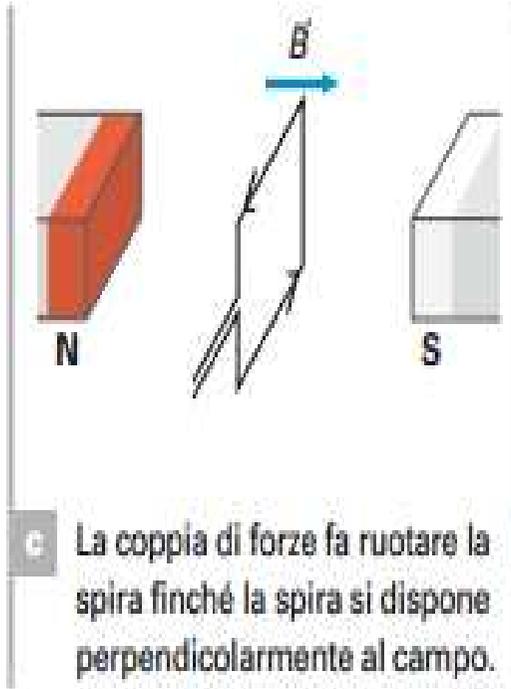
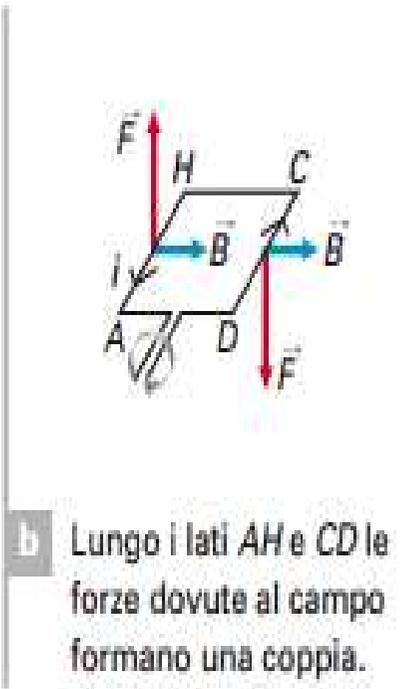
Tutte le grandezze in gioco in gioco sono vettoriali

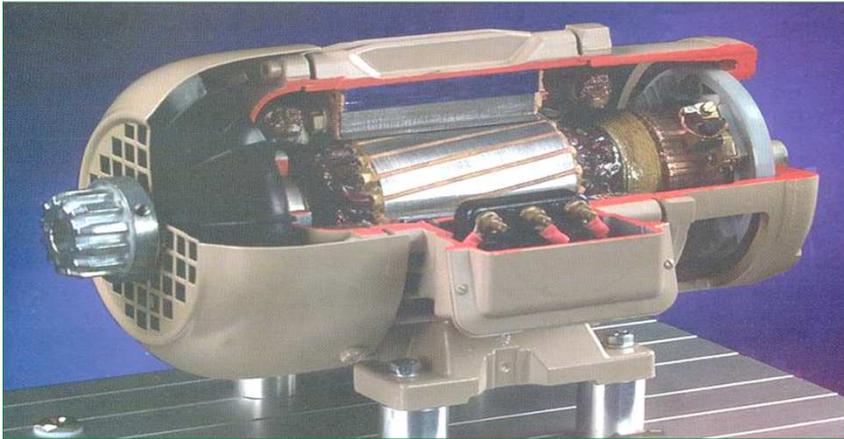
Oltre al modulo, è fondamentale la direzione nello spazio





Sui lati AH e CD agiscono due forze uguali e opposte; il momento della coppia è nullo.

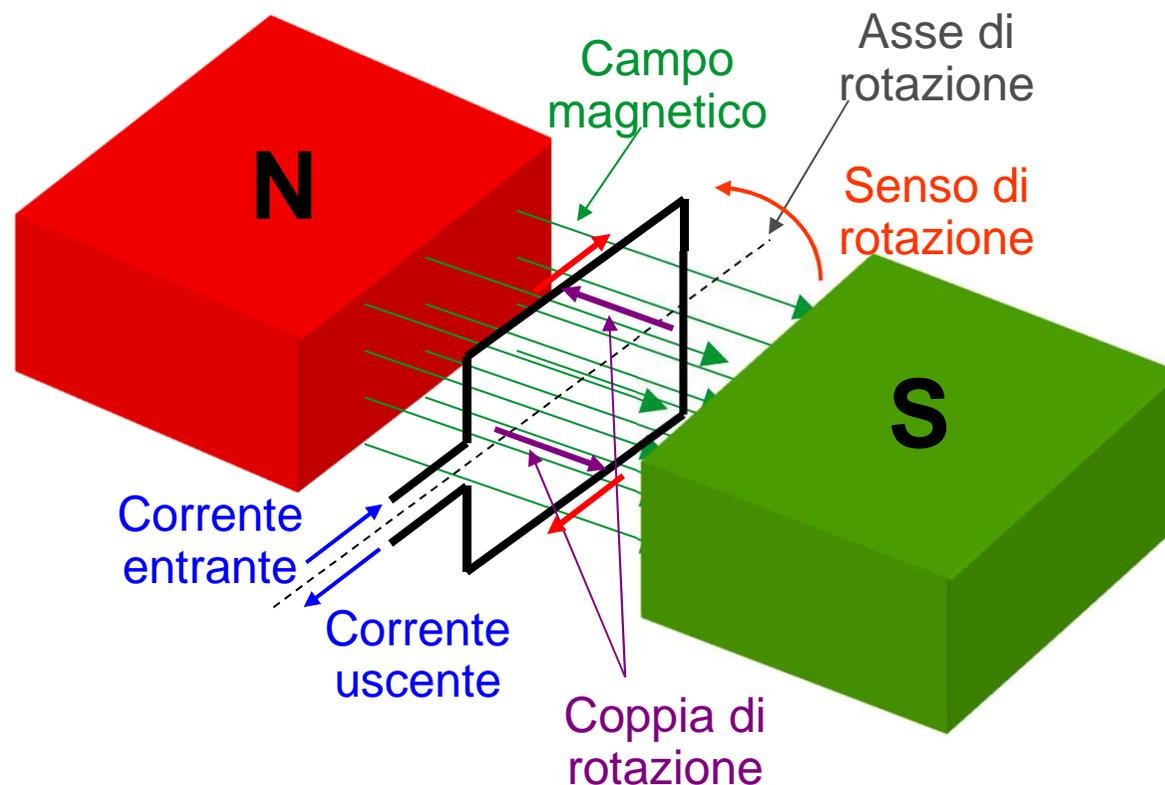




Il motore in corrente continua

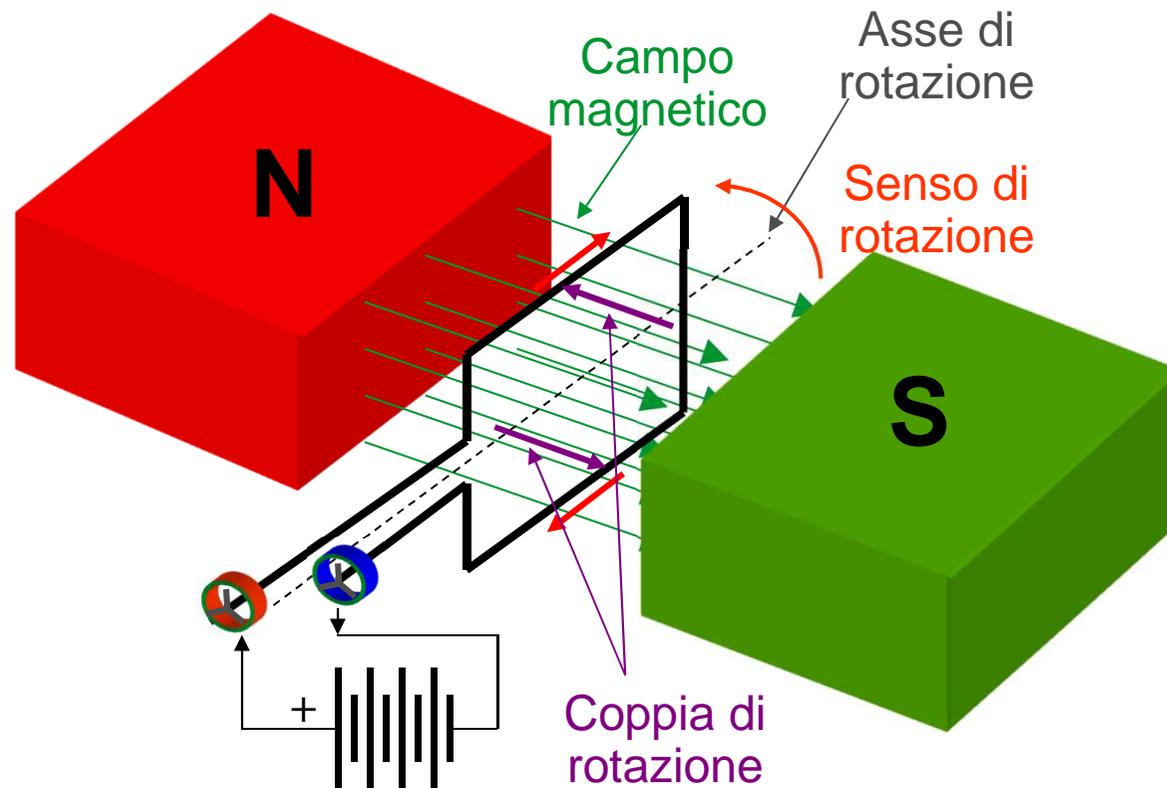
Motori in corrente continua

Se una **spira percorsa da corrente** viene immersa nel campo magnetico generato dalle espansioni polari di un magnete, su di essa **si esplica una coppia** che la pone in rotazione.



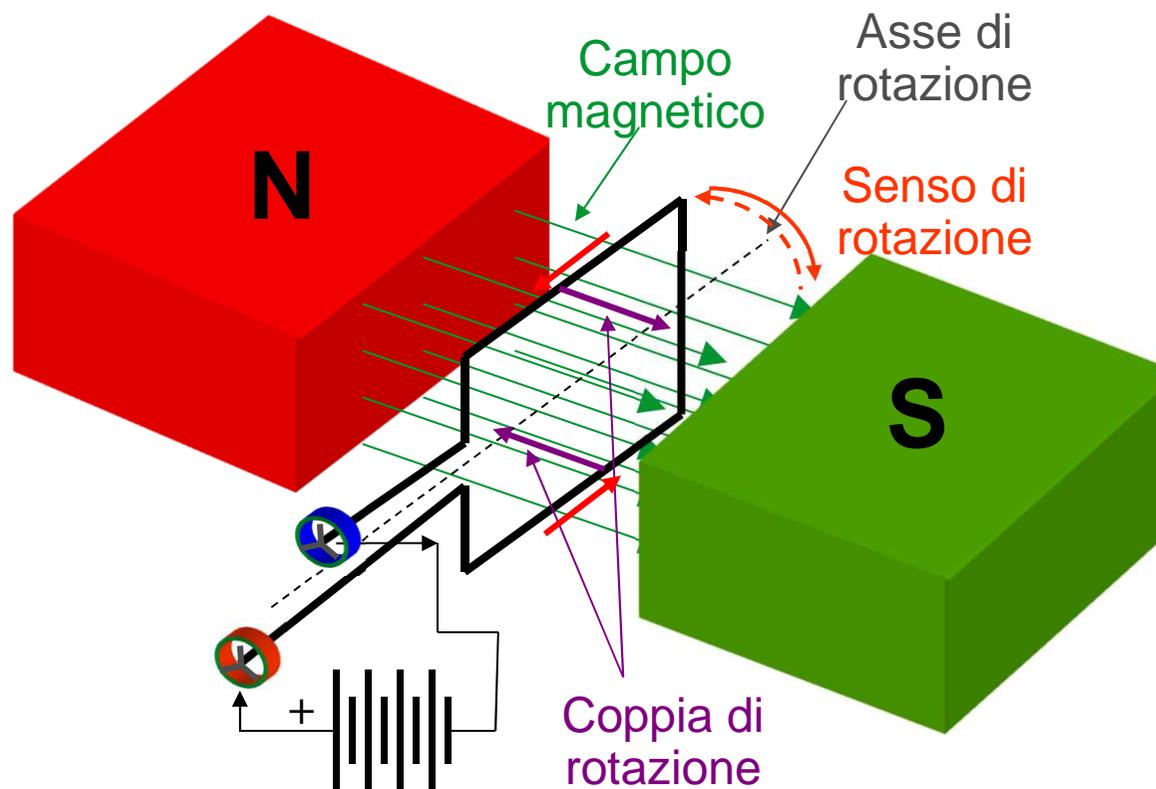
Motori in corrente continua

Per alimentare la spira potrebbero essere utilizzati collettori ad anello e contatti striscianti ma...



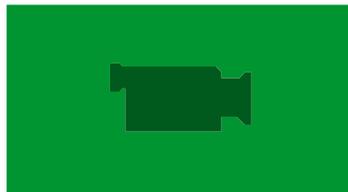
Motori in corrente continua

... dopo **180°** la **spira si troverebbe in condizioni opposte** (corrente circolante in senso inverso rispetto alle linee di flusso del campo magnetico) e la coppia di rotazione **risulterebbe quindi rovesciata innescando un'oscillazione anziché una rotazione!**



Non ci credete?

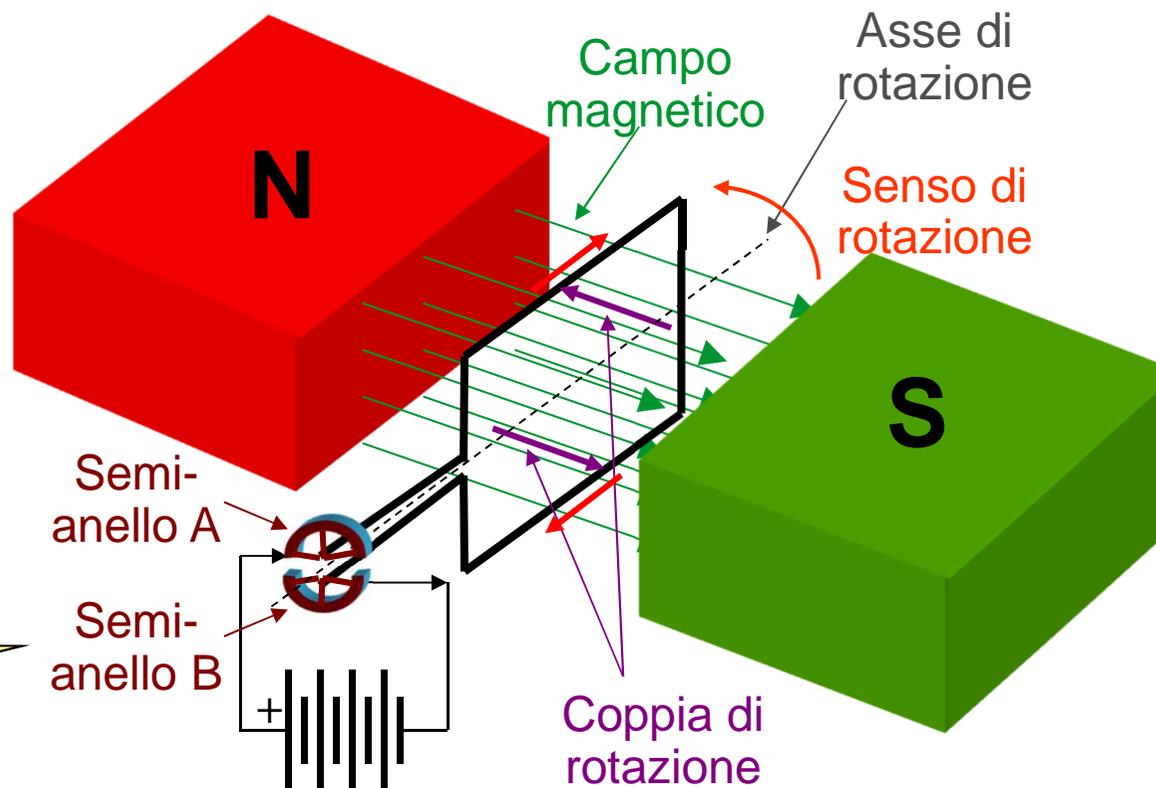
VERIFICHIAMOLO INSIEME



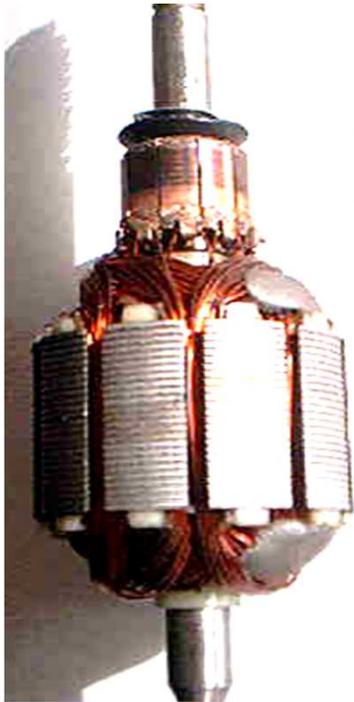
Motori in corrente continua

Se invece di due collettori ad anello separati, viene utilizzato un **collettore segmentato in due semianelli isolati fra loro**, quando la spira ha ruotato di 180° ...rendendo continuo il moto

Anello di Pacinotti



Motori in corrente continua: l'attuatore reale



La "spira" è in realtà realizzata con più avvolgimenti disposti in maniera simmetrica all'interno di cave con le quali è costituito il rotore.

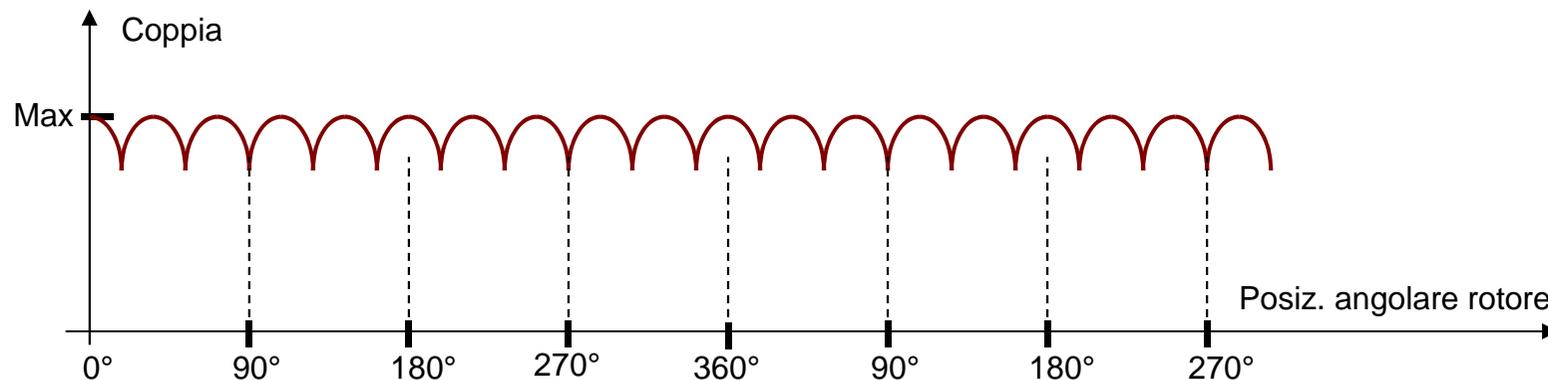
Un rotore reale, quindi, supporta l'equivalente di molte "spire".

Il collettore deve avere tante segmentazioni quante sono le "spire" disponibili; ciò consente di "rinnovare" la coppia ad ogni frazione di angolo giro.



Motori in corrente continua: l'attuatore reale

La coppia di un motore in corrente continua reale è quindi tanto più continua quanto maggiore è il numero degli avvolgimenti rotorici ovvero quanto più segmentato è il collettore.





I motori in corrente alternata

Principali tipologie di motori in corrente alternata

✓ **Motori Brushless trifase**

✓ **Motori Sincroni trifase**

✓ **Motori Asincroni trifase**

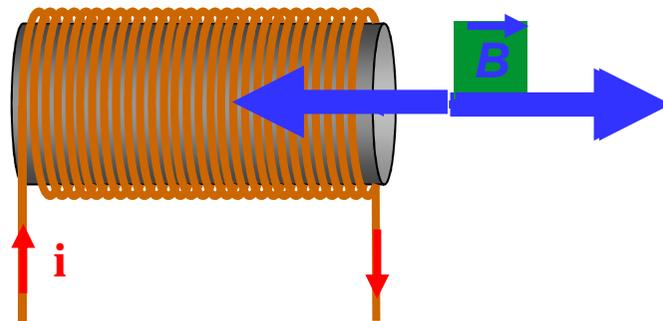
*Sono motori con
caratteristiche e prestazioni
molto diverse*

*Hanno una struttura di
statore simile*

*Cambia la struttura del
rotore ...!!*

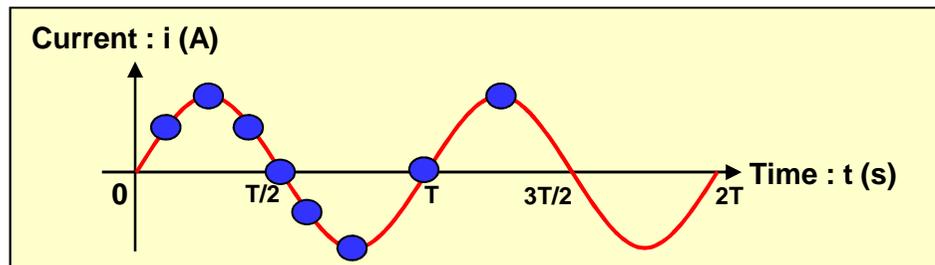
Il denominatore comune di
tutti i motori in C.A.
è
il principio di funzionamento dello statore

Principio di funzionamento dello statore (premessa)



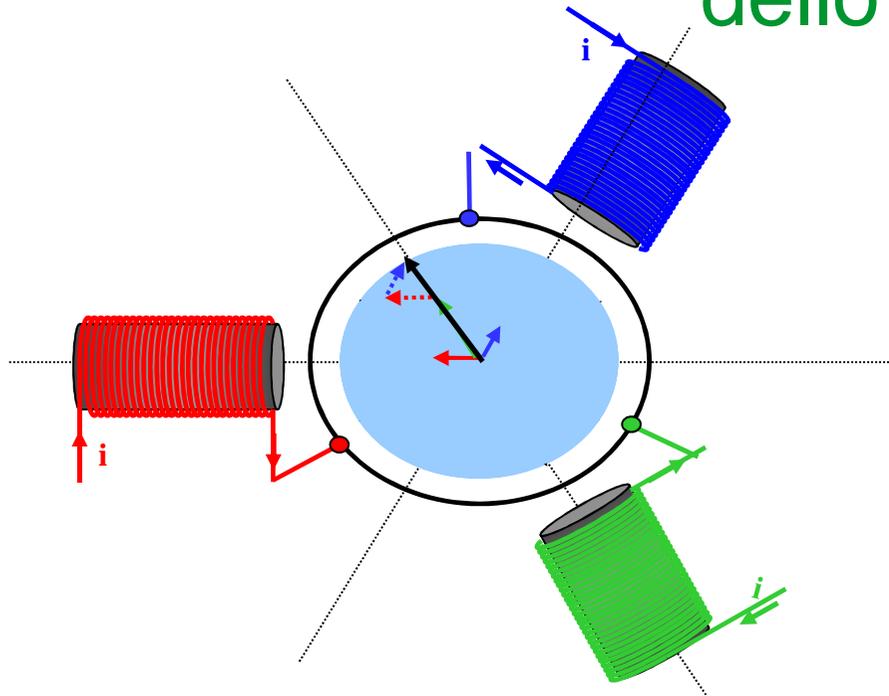
Applichiamo una corrente alternata ad un solenoide (bobina)

Il campo magnetico avrà un andamento sinusoidale



La semionda onda negativa genererà un vettore di campo magnetico B di direzione opposta

Principio di funzionamento dello statore



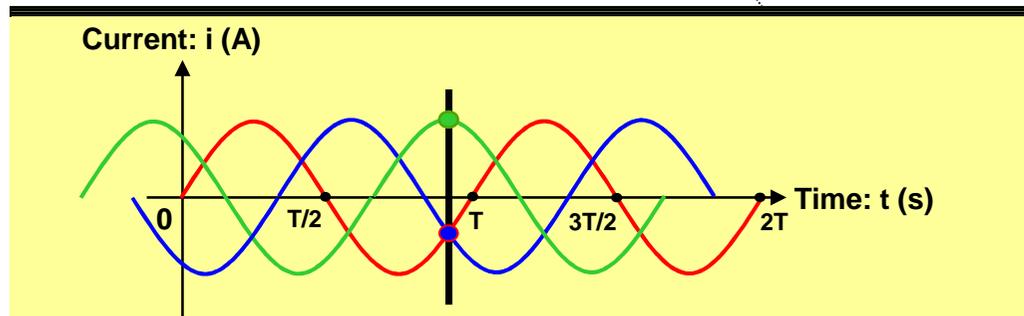
Tre avvolgimenti a 120° sono collegati alla rete trifase

Ogni avvolgimento genera un campo B sinusoidale

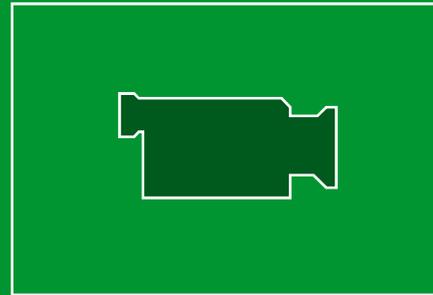
La risultante del campo magnetico B è la somma dei 3 vettori

Il campo magnetico risultante si chiama

Campo magnetico rotante"



Ecco come si presenta nella realtà



Life Is On

Schneider
Electric

Il motore in corrente alternata asincrono trifase

Life Is On

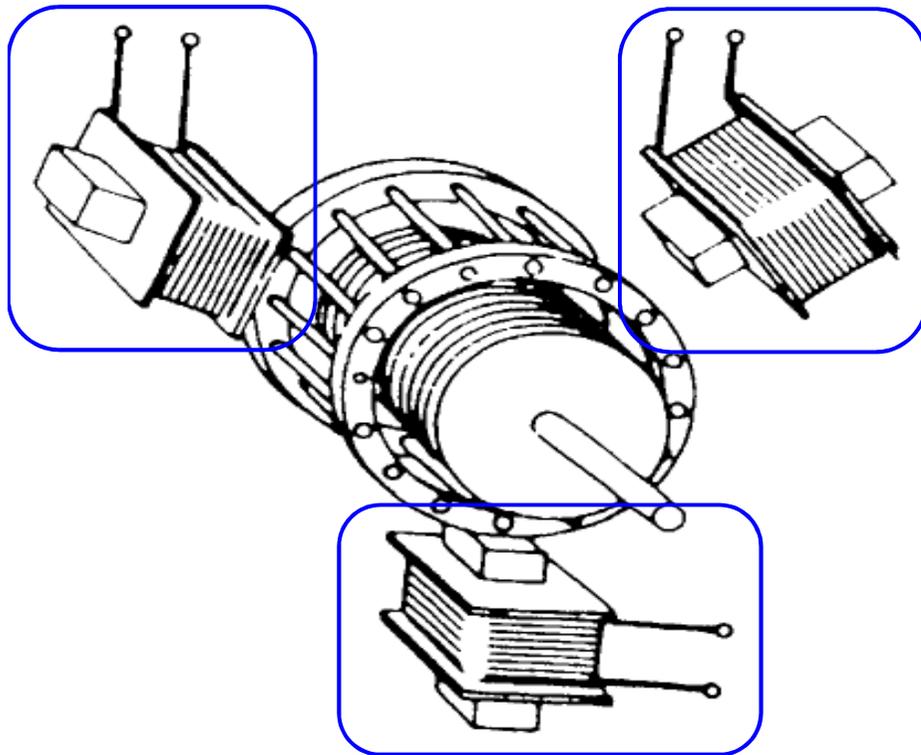
Schneider
Electric

Perché approfondiamo questo tipo di motore?

Perché è di gran lunga il motore più
presente in ambito industriale.

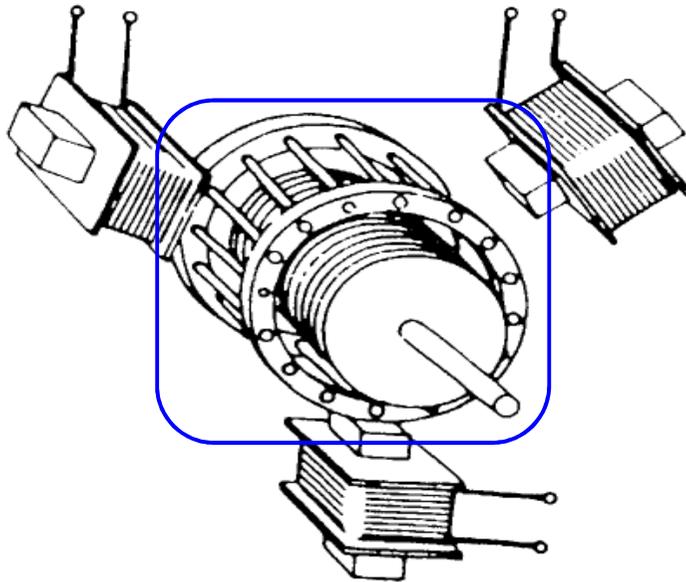
Semplice
Affidabile
Poco costoso

Motore asincrono trifase: lo statore



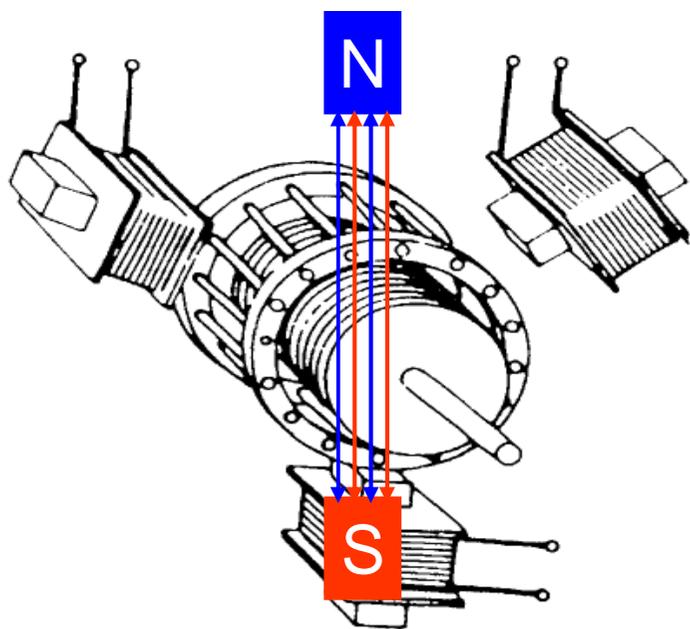
Nella sua forma più semplice il motore asincrono è composto da uno statore nelle cui cave sono presenti **tre avvolgimenti** equidistanziati fisicamente (disposti a 120°) alimentati con una tensione alternata trifase...

Motore asincrono trifase: lo statore



...e un rotore composto da molte barre in alluminio rese solidali alle estremità da due anelli dello stesso metallo. Il rotore così composto viene anche detto “a gabbia di scoiattolo”.

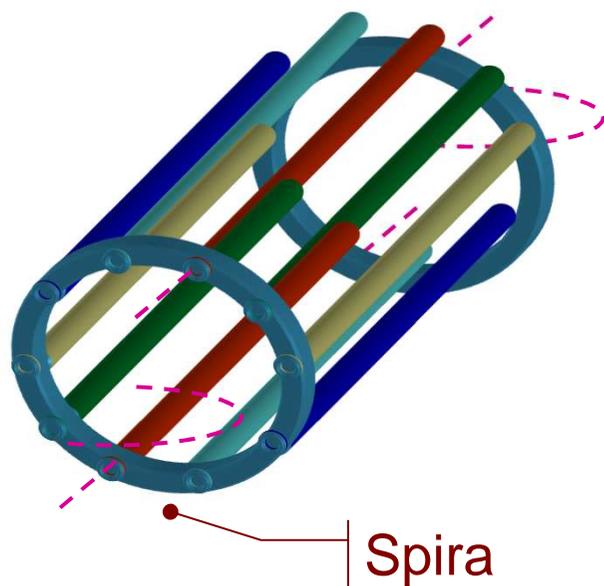
Motore asincrono trifase: lo statore



Come già sappiamo l'avvicinarsi delle tre fasi nei tre avvolgimenti crea un campo magnetico la cui risultante varia circolarmente con costanza.

Il campo magnetico ruota con velocità legata alla frequenza di rete e le sue linee di forza tagliano le barre del rotore.

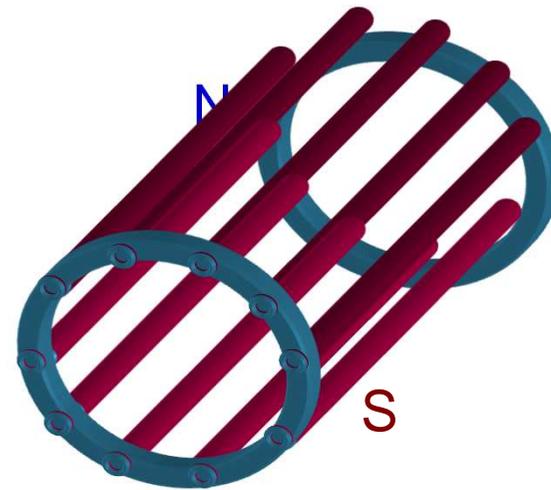
Motore asincrono trifase: il rotore



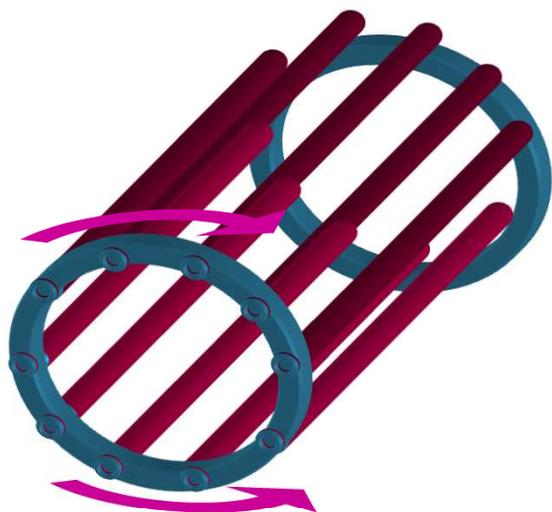
Ogni barra, insieme alla sua omologa diametricale, forma una spira che viene tagliata dalle linee di forza del campo magnetico rotante. Per **la legge dell'induzione magnetica** In ogni spira **circolerà una corrente indotta che genera una f.e.m.**

Motore asincrono trifase: il rotore

Poiché tutte le spire sono in parallelo gli effetti si sommano ed il **rotore diviene sede di un campo elettromagnetico** che, interagendo con quello rotante statorico, cerca di allinearsi nella posizione di equilibrio (legge di Lenz: il rotore tenderà ad allinearsi al flusso rotante)



Motore asincrono trifase: il rotore



Per tale motivo il **rotore** è **soggetto ad una coppia** che lo pone in rotazione **accelerandolo** fin quasi a raggiungere la **velocità del campo magnetico rotante...** senza però mai riuscirci !

Esercizio

Quanti giri al minuto fa un motore asincrono con 1 coppia di poli ?

Partiamo dal n° giri \ min del flusso vettoriale

In un periodo della sinusoide il vettore compie un giro
→ frequenza di rete → 50 Hz = 50 giri in un secondo
→ multiplico x 60 → trovo i giri al minuto

Perché viene chiamato motore asincrono

La velocità del campo magnetico rotante è detta **velocità di sincronismo** e, in Italia, vale 3000 g/min.

$$n_{\text{Sinc}} = 50 \text{ Hz} \cdot 60 \text{ s} = 3000 \text{ rpm}$$

La velocità del rotore è sempre minore di quella del campo magnetico rotante

$$n_R < n_{\text{Sinc}}$$

Questo è il motivo per cui il motore asincrono si chiama così: la sua velocità non è sincrona con la frequenza di rete dell'alimentazione.

Lo scorrimento

La differenza di velocità fra campo magnetico rotante e rotore, è detta **scorrimento** (espressa in %)

$$S = \frac{ns - nr}{ns} \quad \left. \vphantom{S = \frac{ns - nr}{ns}} \right\} \text{ compreso tra 2\% e 10\%}$$

Lo scorrimento non può mai essere nullo perchè ciò significherebbe che $n_R = n_{Sinc}$

velocità di sincronismo

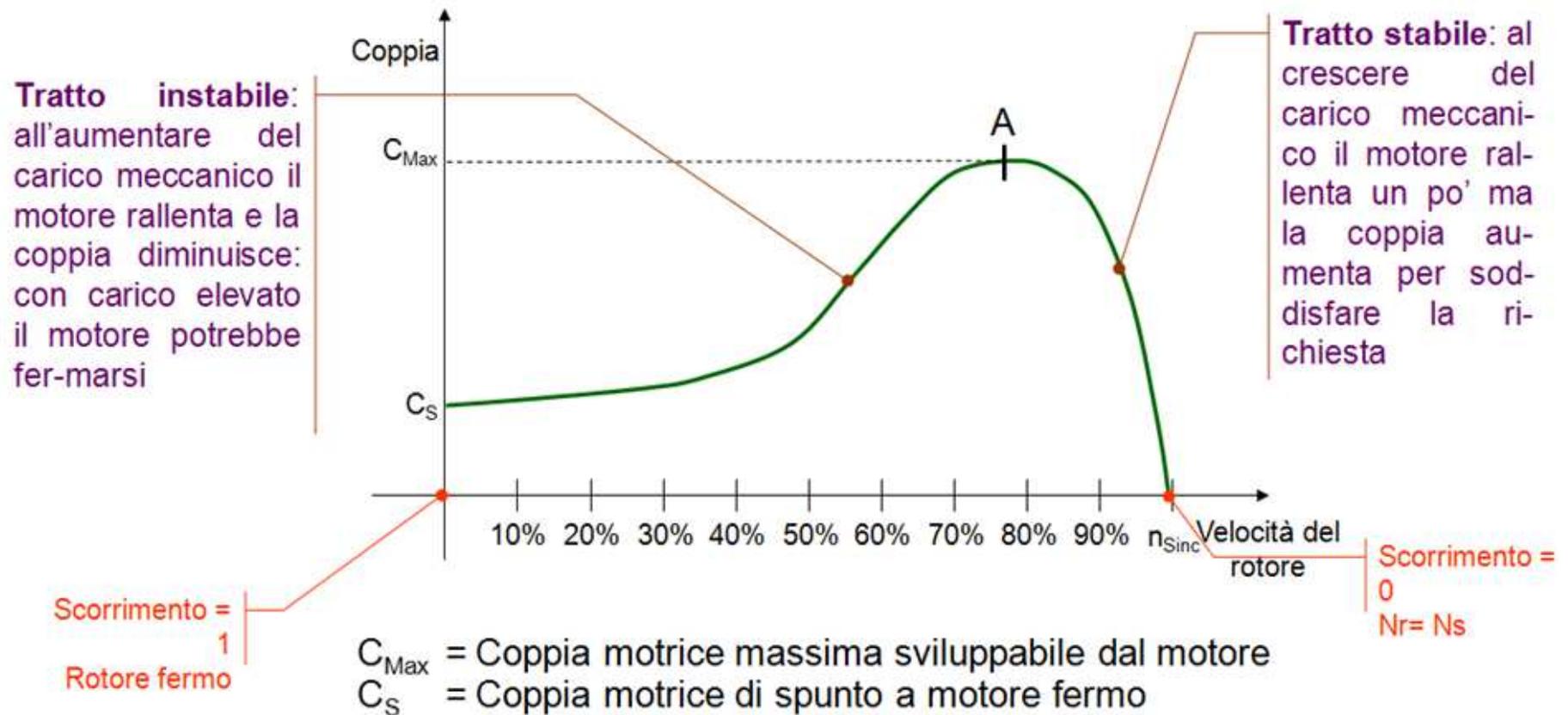
La velocità di sincronismo di un motore asincrono trifase non dipende quindi solo dalla frequenza di rete, ma anche dal numero di coppie polari disponibili:

$$n_{\text{Sinc}} = \frac{60 \cdot f}{P}$$

N° poli	N° coppie polari	Vel. sincronismo	Vel. rotore
2	1	3.000 rpm	S • 3.000
4	2	1.500 rpm	S • 1.500
6	3	1.000 rpm	S • 1.000
8	4	750 rpm	S • 750
10	5	600 rpm	S • 600
12	6	500 rpm	S • 500

Altra rappresentazione ma stesso concetto

Caratteristica meccanica coppia-velocità



Avviamento del motore

Uno dei comandi più consueti è l'avviamento, che consiste nel portare la velocità del motore da zero a quella nominale.

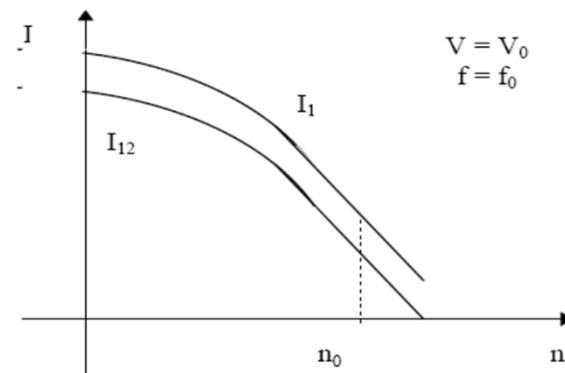
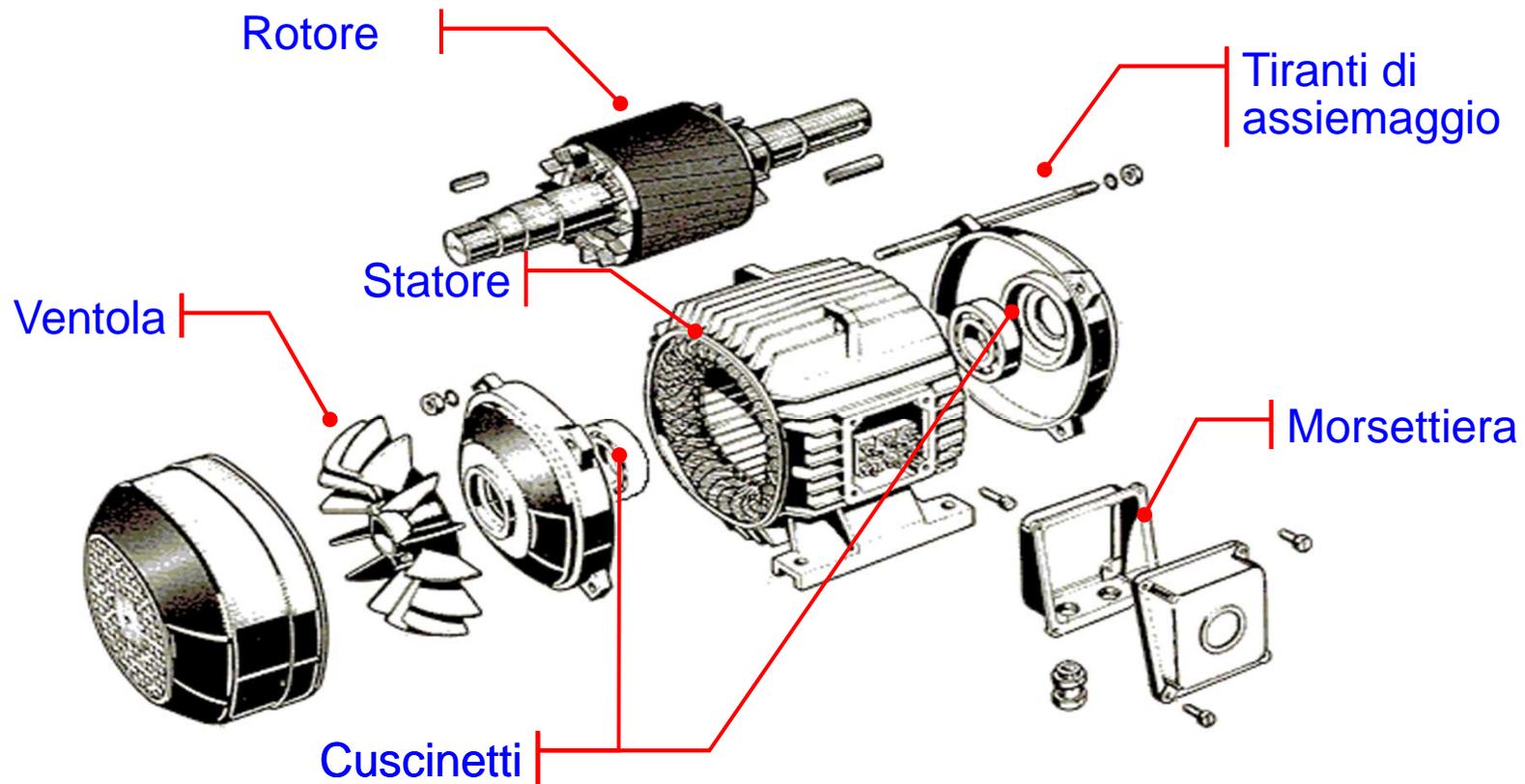


Figura 8.3 - Caratteristica elettromeccanica di statore e di rotore

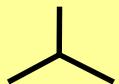
Affinché il motore possa avviarsi ed accelerare, è necessario che la coppia di spunto sia superiore alla coppia resistente, sempre all'avviamento, del carico.

Quando si chiude l'interruttore che collega la linea al motore (rotore fermo, $s = 1$) questo si comporta come un trasformatore chiuso in cortocircuito e nel primo istante di avviamento, assorbe dalla linea la massima corrente, 4 ÷ 8 volte la corrente nominale)

Motore asincrono trifase: costruzione



Motore asincrono trifase: alimentazione

Tensioni di targa	127 - 220		220 - 380		380 - 660	
Tensione di alimentazione	127	220	220	380	380	660
Tipo di collegamento						

Dati di targa

Motor XZ2004		N° 120058 1998		Mot. 3 -- LS75	
IP 65	I.c.l	40° c	uF	V	
S 1	%	c/h c	uF	V	
V	Hz	min-1	kW	Co	A
Δ 230	50	1410	· 37	· 7	1.9
Y 380-400	50	1420	· 37	· 7	1.1
Y 415	50	1430	· 37	· 65	1.1
Y 440-460	60	1710	· 44	· 7	1.1
IEC 28 - 2					

CQ 0380

Motori asincroni: leggere un catalogo

Moteurs triphasés 50 Hz
Rotor en court-circuit CAG

Construction **FERMÉE IP 44**
Types **LS-FLS** **IP 55**
Isolation classe B

Puissance		Type	Intensité absorbée				Caractéristiques en charge						Vitesse MD ^{2*}		Masse approx.	
kW	ch		In	I _d	Cd/	Cm/	Rendement %			Cos. φ			tr/mn	kg m ²		
		380 V	I _n	Cn	Cn	1/2	3/4	4/4	1/2	3/4	4/4	kg				
1500 tr/mn (moteurs 4 pôles)																
0,09	0,12	LS 56	0,38	2,89	1,8	1,85	41	48	54	0,48	0,58	0,67	1375	0,0008	4	
0,12	0,17	LS 63E	0,43	2,79	2	2	52	56	55	0,52	0,67	0,80	1350	0,0014	4,8	
0,18	0,25	LS 63E	0,60	3,50	2,10	2,10	56	60	63	0,57	0,68	0,78	1390	0,0019	5	
0,25	0,33	LS 63L	0,85	3,76	2,24	2,06	56	62	61	0,53	0,64	0,73	1400	0,0021	4	
0,37	0,5	LS 63L	1,2	4,17	2,5	2,44	59	64	64	0,51	0,61	0,73	1390	0,0029	6	
0,25	0,33	LS 71L	0,82	3,90	1,8	2,4	50	57	61	0,51	0,64	0,75	1415	0,0027	6,4	
0,37	0,50	LS 71L	1,1	4,36	1,85	2,5	58	65	67	0,51	0,66	0,76	1400	0,0034	7,3	
0,55	0,75	LS 80L	1,65	4,61	2,1	2,2	60	66	68	0,50	0,64	0,75	1400	0,0055	9	
0,75	1	LS 80L	2,1	4,76	2,4	2,4	66	71	72	0,57	0,70	0,75	1400	0,0072	10,5	
0,9	1,25	LS 80L	2,6	5,38	2,9	2,7	67	73	73	0,48	0,61	0,76	1415	0,0094	11,5	
1,1	1,5	LS 90S	2,7	5,67	2,2	2,4	74	76	77	0,60	0,74	0,82	1420	0,0127	14	
1,5	2	LS 90L	3,7	5,92	2,3	2,6	75	78	78	0,57	0,72	0,80	1420	0,0157	15	
1,8	2,5	LS 90L	4,3	5,65	2,1	2,3	78	80	79	0,62	0,75	0,82	1410	0,0196	17	
2,2	3	LS 100L	5,25	6,3	2,5	2,6	78	80,5	81	0,58	0,70	0,79	1435	0,0238	21	
3	4	LS 100L	7,1	6,35	2,8	2,8	78	81	81	0,60	0,72	0,79	1435	0,0298	23	
4	5,5	LS 112M	9,5	5,7	2,3	2,4	79	81	82	0,56	0,70	0,78	1440	0,0538	28	
4,5	6	LS 112M	10,8	6,9	2,8	2,9	79	82	84	0,57	0,72	0,74	1450	0,0601	32,5	
5,5	7,5	LS 112MS	11,8	7,2	2,4	2,5	79	82	83	0,57	0,73	0,85	1435	0,0709	36	

Le necessità del mondo industriale
La scelta in base al tipo di carico
Fasi di un movimento



Formatore: Marco Manione
Email: marco.manione@se.com

Life Is On

Schneider
Electric

Le necessità del mondo industriale

Macchine utensili



Accostamento

**Gestione del processo
di lavorazione**

Ritorno rapido

Le necessità del mondo industriale

Movimento fluidi

Portata dei flussi

Cadenze di produzione



Le necessità del mondo industriale

Trasporto e movimentazione

Movimentazione di prodotti fragili

Posizionamento di oggetti

Sicurezza degli operatori

Riduzione dei picchi di assorbimento



Le necessità del mondo industriale Packaging

Avvolgimento a velocità costante

Impacchettamento

Velocità di taglio

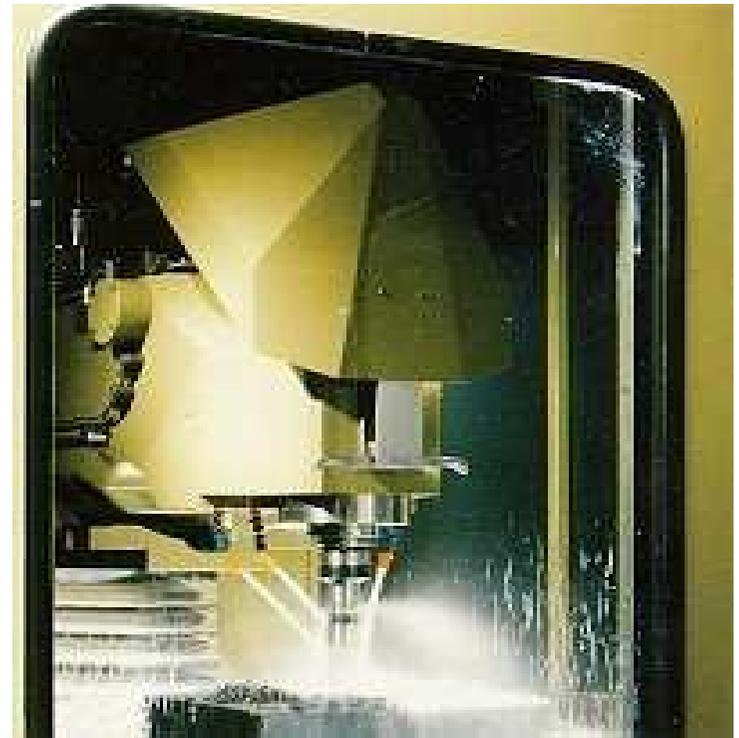


Le necessità del mondo industriale

Gestione delle grandezze variabili

Velocità costante qualunque siano:

- **il carico**
- **le fluttuazioni della rete di alimentazione**
- **la temperatura**



Motori corrente alternata asincroni trifase

Rappresentano l'80% del mercato poiché sono economici, robusti e non necessitano di grande manutenzione

Necessitano però di soluzioni esterne per la regolazione della velocità, rispetto a ω_n nominale

FONDAMENTALE: Il motore c.a. si porta sempre alla stessa velocità. Il metodo più semplice per modificarne la ω consiste nell'affiancargli un variatore di velocità.



La scelta della
migliore soluzione per la
variazione elettronica della velocità
è fortemente influenzata
dal
comportamento del carico e
quindi dal **tipo di applicazione**

Life Is On

Schneider
Electric

Memo formule

La **coppia** esprime la forza che un motore imprime al proprio asse

C_m = Coppia Motrice

La coppia che imprime il motore

C_r = Coppia Resistente

La coppia del carico meccanico che si oppone alla coppia motrice, detta anche coppia di carico

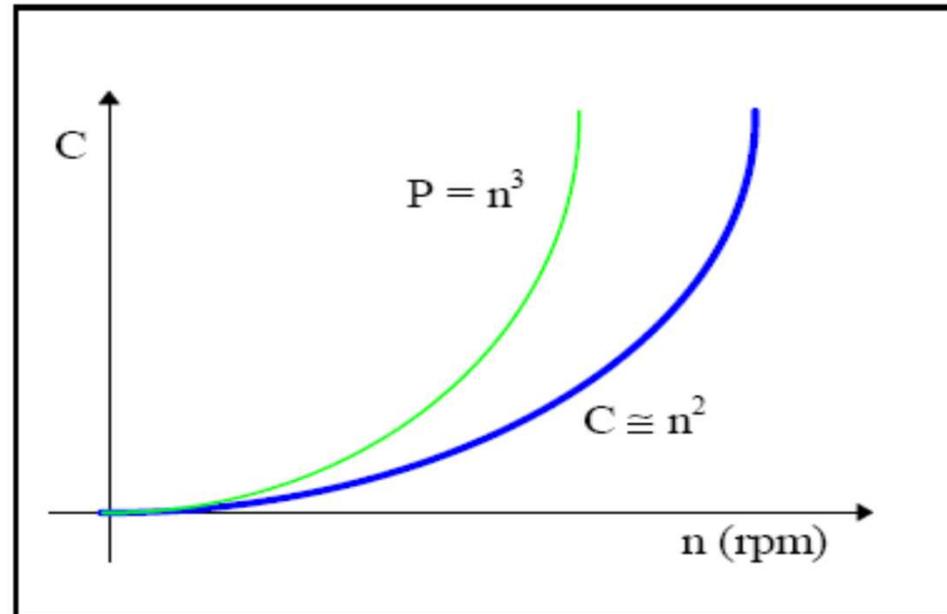
ω = velocità angolare del motore (espressa anche in n = numero di giri / m)

C = coppia (il motore deve seguire la richiesta dal carico)

$$P = \text{potenza} = C * \omega$$

La curva di carico cambia in funzione dell'applicazione
es: macchine a coppia quadratica crescente

- Ventilatori e ventole di ogni tipo
- Eliche
- Macchine a pistoni con erogazione in rete aperta
- Pompe Centrifughe
- Pompe Assiali
- Compressori a vite
- Agitatori,
- Centrifughe
- Veicoli.



La **coppia** richiesta cresce **quadraticamente con la velocità**, la **potenza** cresce **proporzionalmente al cubo della velocità**

ATTENZIONE

Le curve relative a
COPPIA
e
POTENZA
permettono di comprendere
il CONSUMO EFFETTIVO del motore
al variare del CICLO DI FUNZIONAMENTO RICHIESTO

Sono elementi fondamentali quando si parlerà
dell'utilizzo dei VVD per ottenere
Efficienza Energetica

Life Is On

Schneider
Electric

Coppia di spunto

Tutte le macchine, normalmente, necessitano di una coppia di spunto che serve per coprire le maggiori necessità energetiche in fase di avvio. Questo fattore influenza molto la scelta della giusta tipologia di variatore

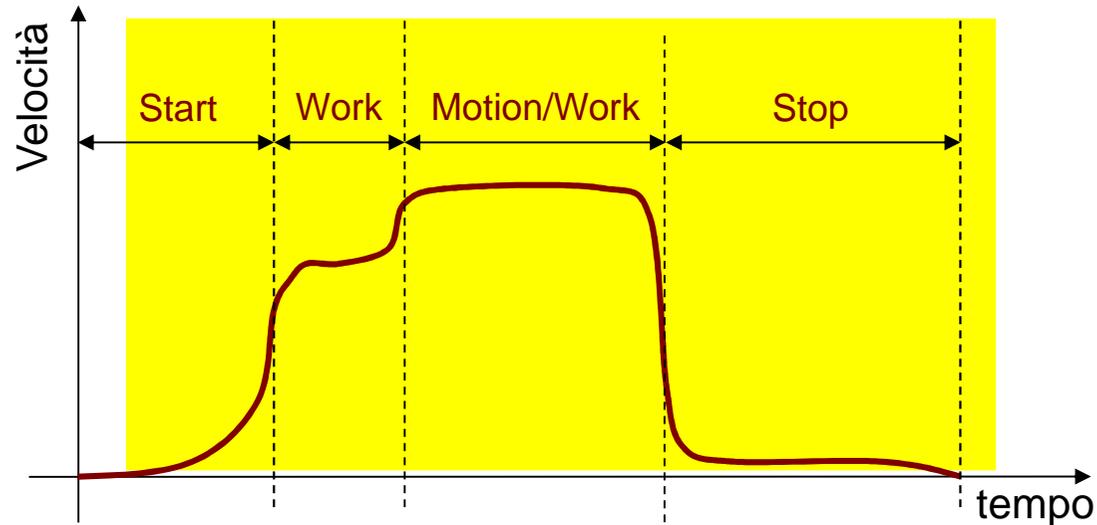
Tipo di macchina	Coppia di spunto o sovracoppia In marcia	Scelta del variatore
Macchine con rotazione su sfere o a rulli	100 ÷ 125%	Normale
Macchine a bronzine	130 ÷ 150%	Normale
Convogliatori o macchine con notevoli attriti	160 ÷ 250%	Sovradimensionare il variatore ed eventualmente anche il motore
Macchine il cui ciclo di funzionamento è caratterizzato da movimenti bruschi (presse, macchine con camme o con sistemi biella-manovella)	250 ÷ 600%	Sovradimensionare sia il variatore che il motore

La regolazione della velocità nei motori a.c. la gestione delle fasi di avvio e arresto

Life Is On

Schneider
Electric

Regolazione della velocità le fasi di un movimento



Possiamo gestire le fasi di un movimento:

- nella sola fase di avvio
- nelle fasi di avvio e di arresto
- durante l'intero processo

Gestione dell'avvio dei motori asincroni

Due condizioni critiche all'avviamento del motore ac

- **Elevata corrente assorbita**
- **Coppia naturale di spunto, che potrebbe non essere sufficiente per la partenza sotto carico**

E' quindi necessario “modulare” l'avvio del motore per evitare strappi, rotture o extra-assorbimenti di corrente che potrebbero danneggiare il motore e/o la meccanica da esso movimentata.

Principali metodi “storici” di avviamento

	Avviamento diretto	Avviamento stella triangolo	Avviamento con reattanze statoriche	Avviamento con autotrasformatore	Avviamento con resistenze rotoriche
I_{avvio} $I_{nominale}$	4 ÷ 8	1,5 ÷ 2,5	4,5	1,5 ÷ 4	0,5 ÷ 1

In quasi tutti i casi le correnti di avvio sono dei picchi molto importanti...!!

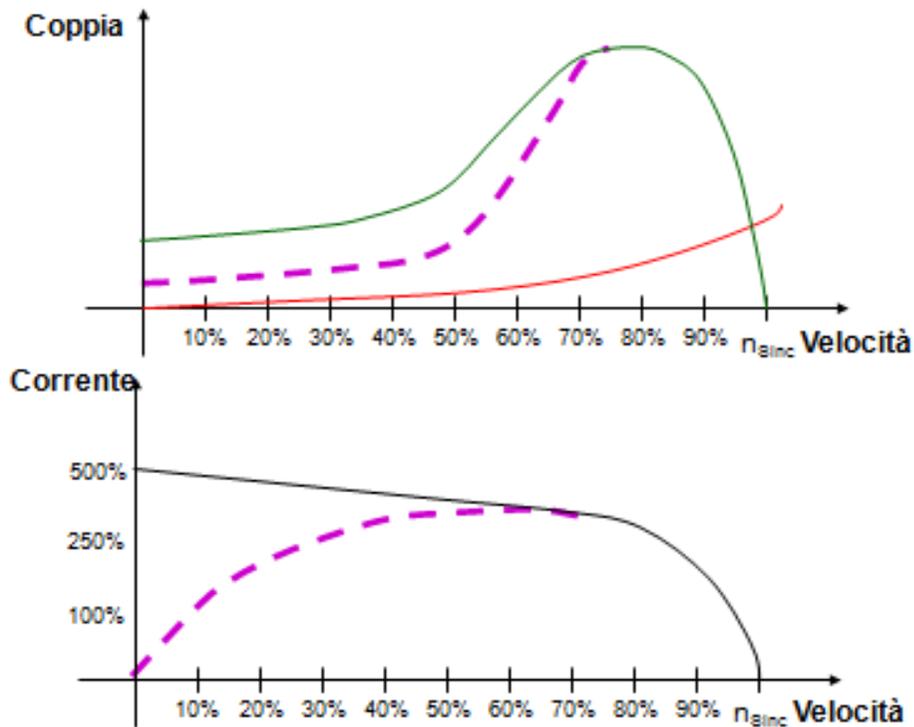
Regolazione della velocità avviamento con avviatori elettronici



Vengono anche detti “**Soft starter**” perché consentono avvii morbidi, limitando i picchi di corrente (attraverso una gestione elettronica parzialmente complessa)

$\frac{I_{avvio}}{I_{nominale}}$	Regolabile 2 ÷ 5
$\frac{C_{avvio}}{C_{nominale}}$	Regolabile 0,1 ÷ 1

Avviamento con soft starter esempio con “rampa di tensione”



Si rinuncia a un po'
di coppia...

...ma si guadagna
molto in corrente!

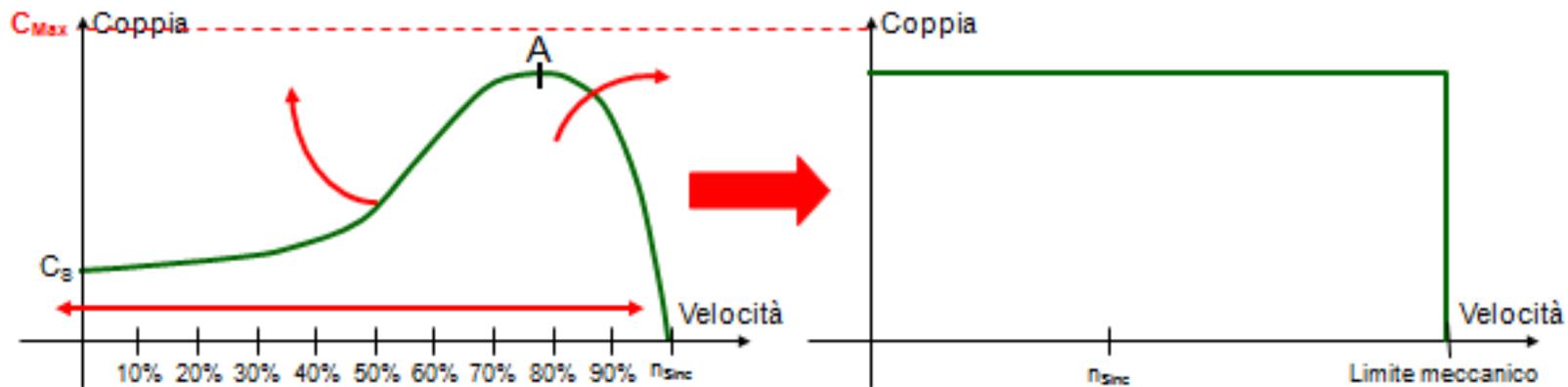
Regolazione della velocità Utilizzo degli inverter

Un **inverter** è quindi in grado di gestire il motore **in tutte le fasi del movimento** garantendo prestazioni **quasi linearizzate** (attraverso un'elettronica più sofisticata)



Le prestazioni di un inverter ideale

- linearizzare la curva di funzionamento caratteristica di un motore
- garantire la massima coppia a qualsiasi velocità
- garantire qualsiasi velocità fra zero e quella limite di rottura meccanica



Per ciascuna applicazione dovrà essere scelta la giusta tecnologia



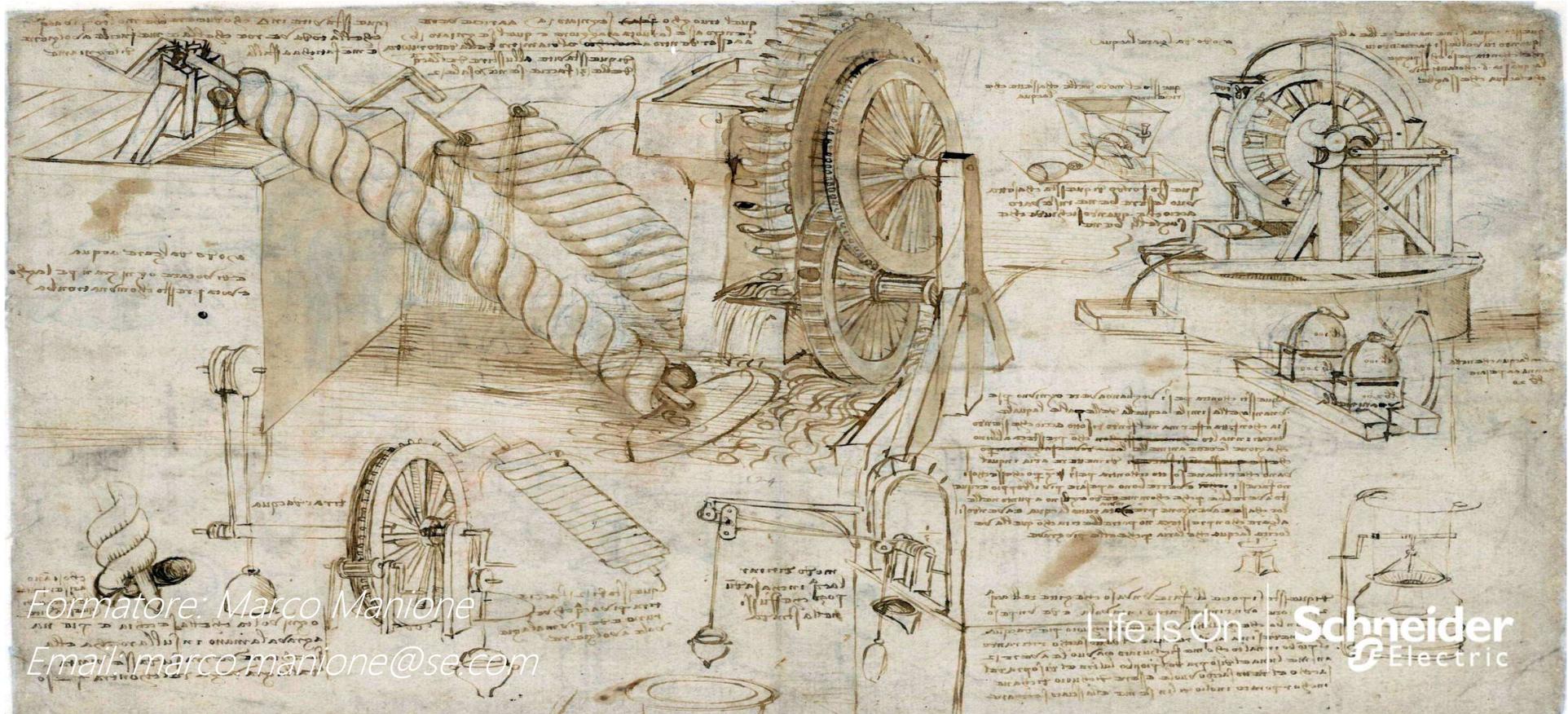
Vedremo più avanti nei **criteri di scelta**

e negli **scenari applicativi**

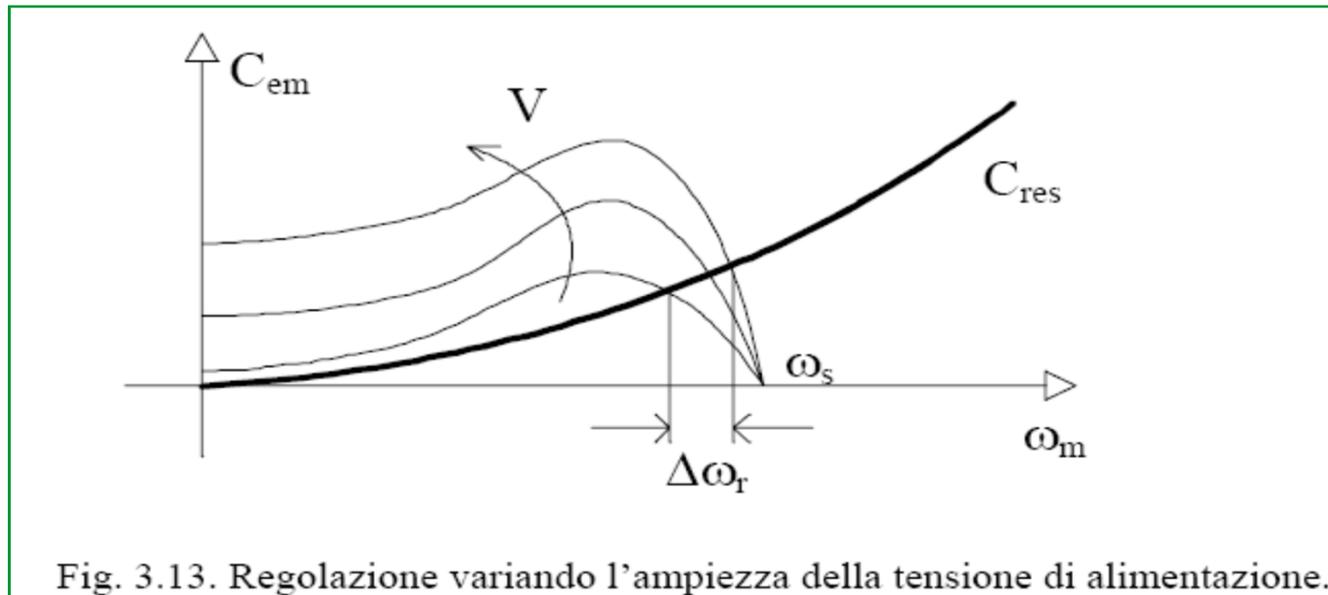
come **determinare** la soluzione **più adatta** ai nostri scopi

Principi di funzionamento di un inverter

Tipologie: inverter scalari e vettoriali



Per regolare la velocità a volte non basta solo variare la tensione di alimentazione del motore



Si riduce la tensione, si riduce la velocità del motore ma aimhè anche la coppia motrice !

Vi ricordate il principio dell'avviamento stella triangolo?

Regolazione della velocità la legge Tensione Frequenza

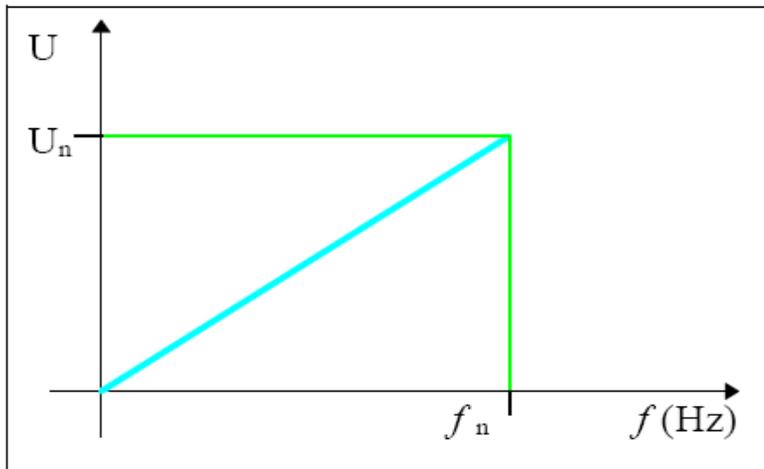
La coppia motrice è direttamente proporzionale alla tensione di alimentazione e inversamente proporzionale alla sua frequenza

$$C = K \cdot \frac{V}{f}$$

l'inverter scalare è in grado di impostare elettronicamente la tensione e la frequenza che si desidera avere ai capi del motore

Mantenendo costante il rapporto V / f otterremo coppia motrice costante e una velocità del motore a piacimento

Esempio pratico



Posso impostare la velocità che mi serve

Mantenendo la coppia motrice costante !!

$$n_{\text{Sinc}} = \frac{60 \cdot f}{P}$$

$$V_{\text{nom}} = 400\text{v}$$

$$F_{\text{nom}} = 50 \text{ Hz}$$

$$N_{\text{sinc}} = 3000 \text{ g}\backslash\text{m}$$

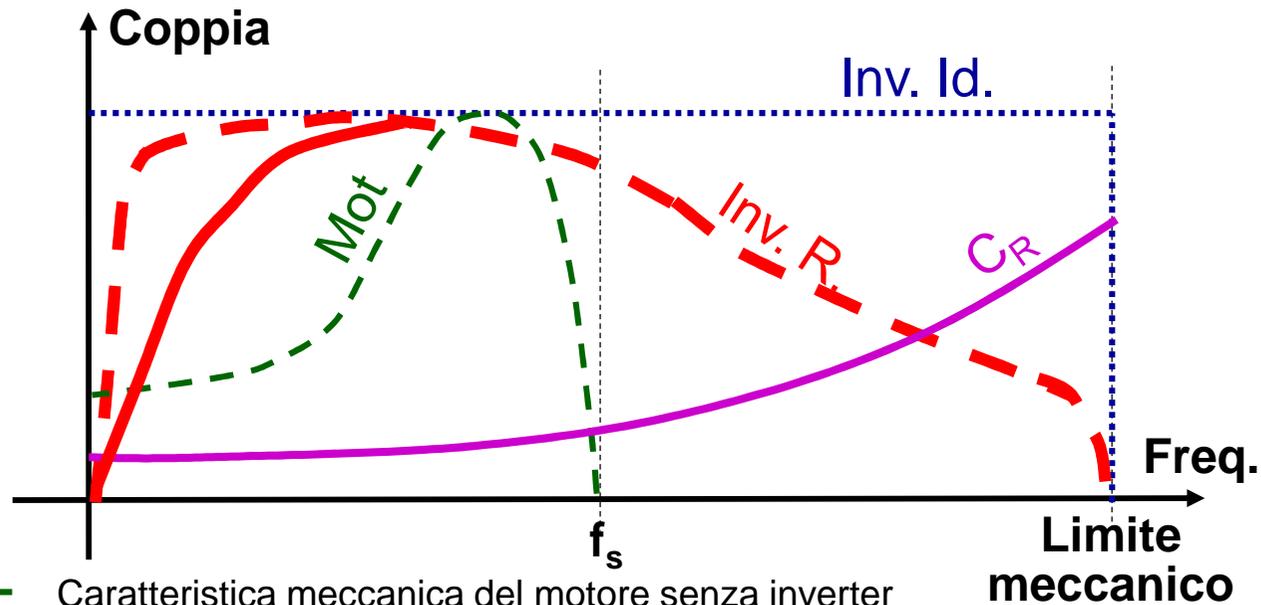


$$V_1 = 320\text{v}$$

$$F_1 = 40 \text{ Hz}$$

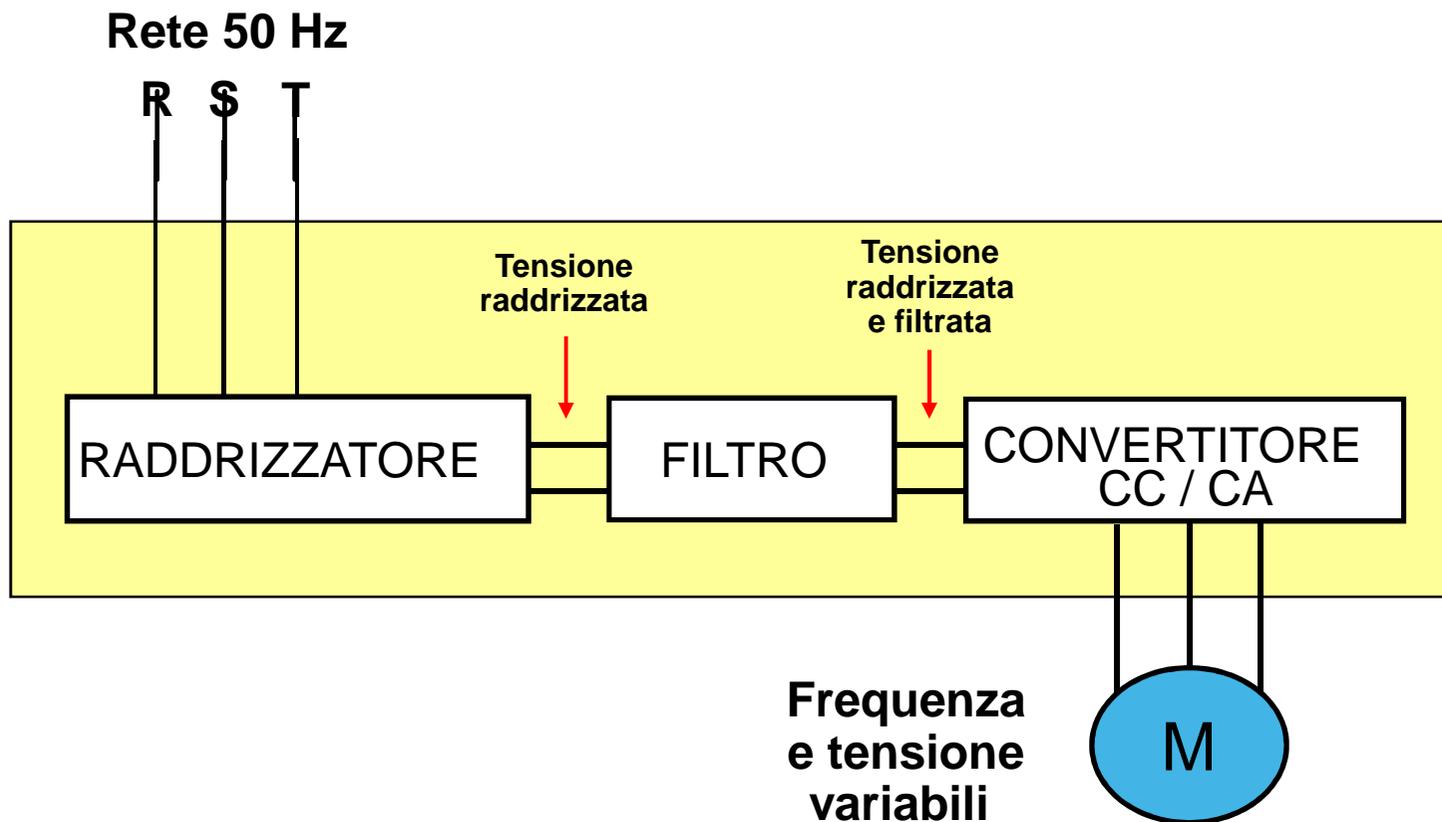
$$N_{\text{sinc}1} = 2400 \text{ g}\backslash\text{m}$$

Grafico di un inverter scalare reale



- - - - - Caratteristica meccanica del motore senza inverter
- Caratteristica meccanica del motore con inverter ideale
- Caratteristica meccanica di un motore autoventilato con inverter **scalare** reale
- - - - - Caratteristica meccanica di un motore motoventilato con inverter **scalare** reale
- Coppia resistente; ad esempio ventilatore

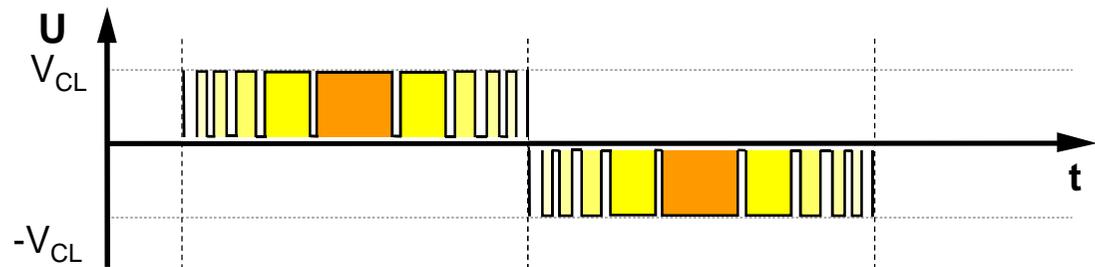
L'inverter scalare: struttura interna



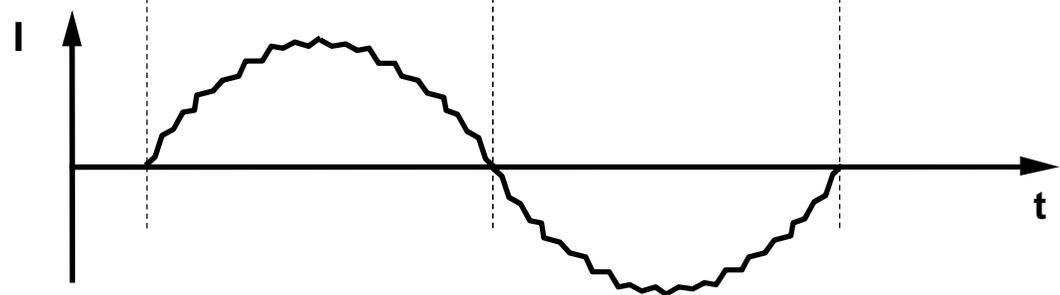
Inverter scalare: sezione ondulatore

La tecnica normalmente utilizzata, detta **PWM**, prevede la ricostruzione della forma sinusoidale tramite la modulazione della durata del tempo di conduzione dei transistor o SCR dello stadio finale di potenza

Pulse Width Modulation



Anziché modulare l'ampiezza (il valore di tensione) viene modulata la durata in modo tale che l'effetto elettrico sul carico sia esattamente lo stesso; si ottiene una pseudo-sinusoide scalata; lo scaling è tanto meno percettibile quanto più è alta la frequenza di commutazione dello stadio finale di potenza.



Variando il duty cycle potrò ricostruire un
onda sinusoidale trifase

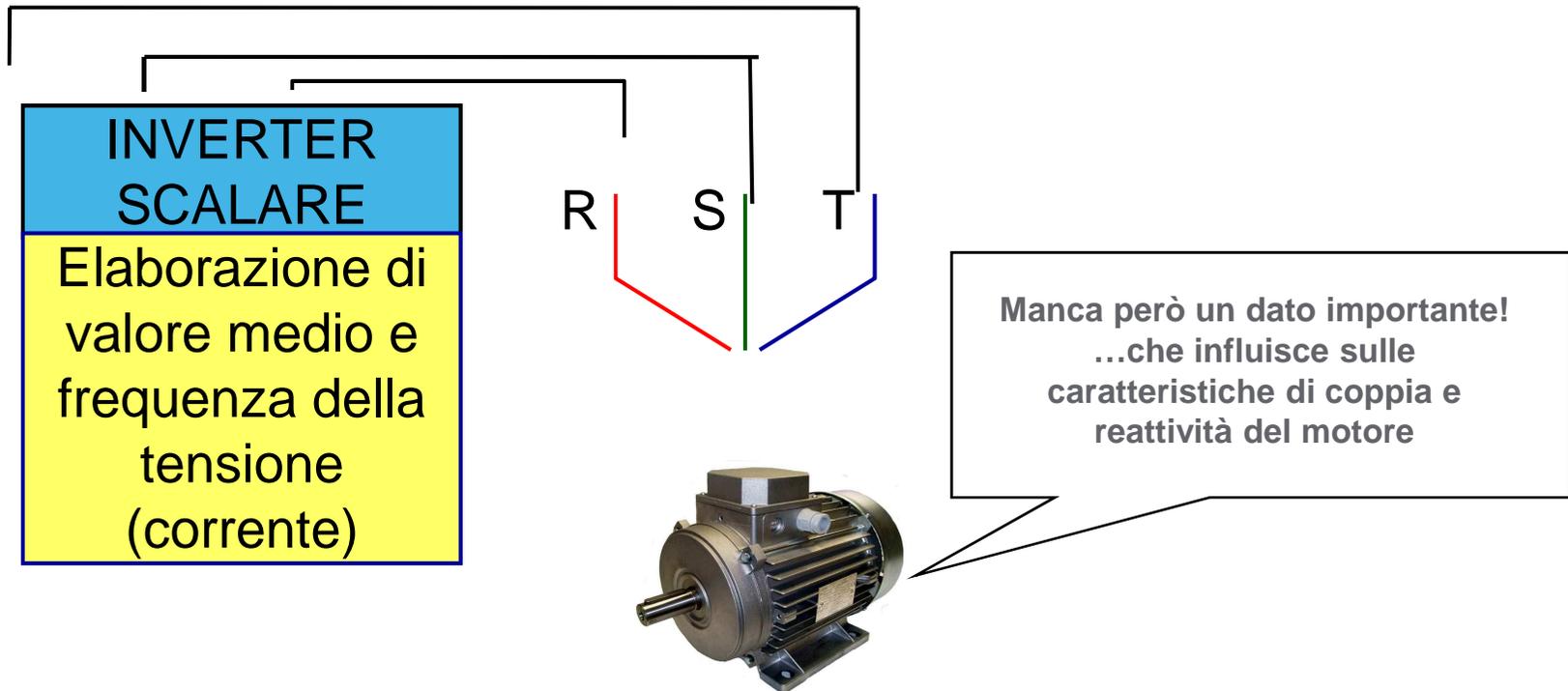
con tensione V e frequenza f desiderate

ottenendo

differenti velocità del motore a coppia costante

(almeno entro certi limiti)

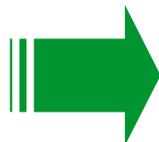
dall'inverter scalare all'inverter vettoriale



dall'inverter scalare all'inverter vettoriale

INVERTER SCALARE

Elaborazione di valore medio e frequenza della tensione (corrente)



INVERTER VETTORIALE

Elaborazione di valore medio, frequenza e **fase** della tensione (corrente)

Gli inverter vettoriali: caratteristiche

1) Sono indispensabili per la gestione dei transistori al fine di ottenere sistemi performanti in termini di dinamica; con sistema a regime (velocità costante o lentamente variabile) non aggiungono nessun vantaggio ai normali inverter scalari.

2) Consentono di ottenere **coppia costante** anche a **bassissime frequenze (0,5Hz) di pilotaggio** cioè praticamente quasi a motore fermo.



5° capitolo
La retroazione
anello aperto e anello chiuso

Controllo proporzionale, integrato, derivato
Utilizzo del PID nei variatori di velocità

Compatibilità elettromagnetica:
armoniche e modalità di filtraggio

Formatore: Marco Manione
Email: marco.manione@se.com

Life Is On

Schneider
Electric

I sistemi di controllo

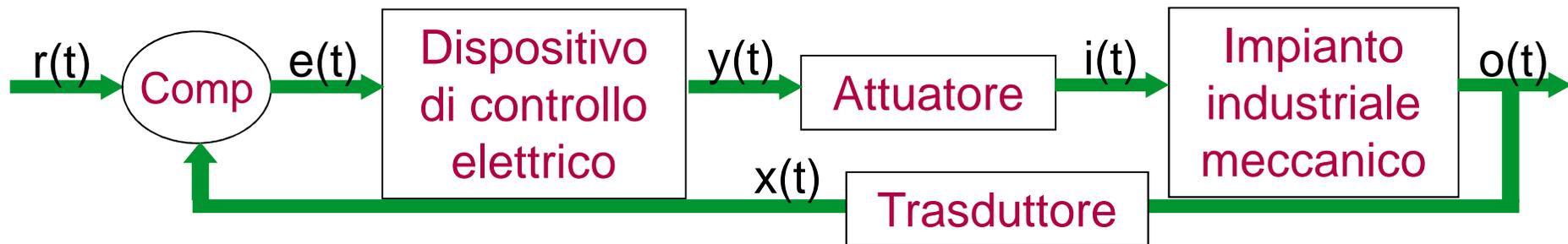
Anello aperto



un **controllo in anello aperto** (o ad azione diretta) è caratterizzato dal fatto che il valore della *variabile manipolabile* non dipende da quello della *variabile controllata* né da quelli di altre *variabili dipendenti* del sistema controllato; non ci sono dunque percorsi di segnale chiusi;

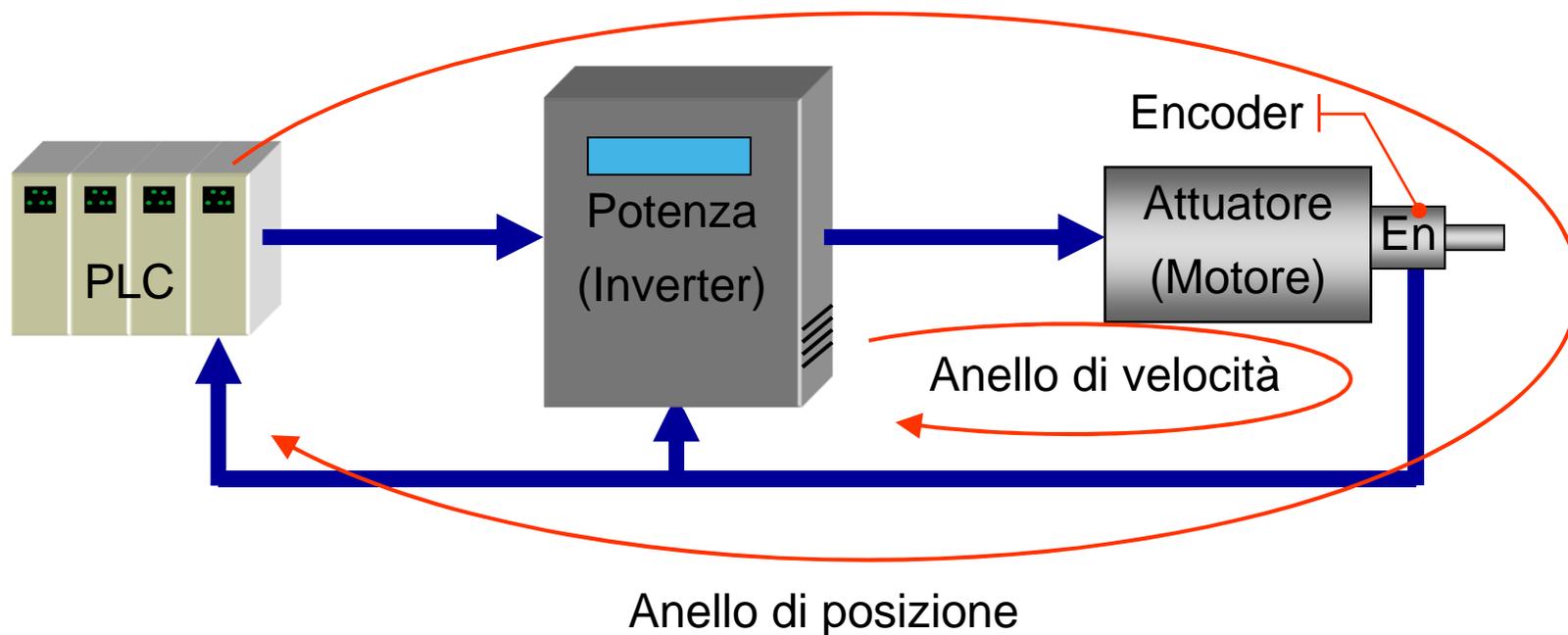
I sistemi di controllo

Anello chiuso



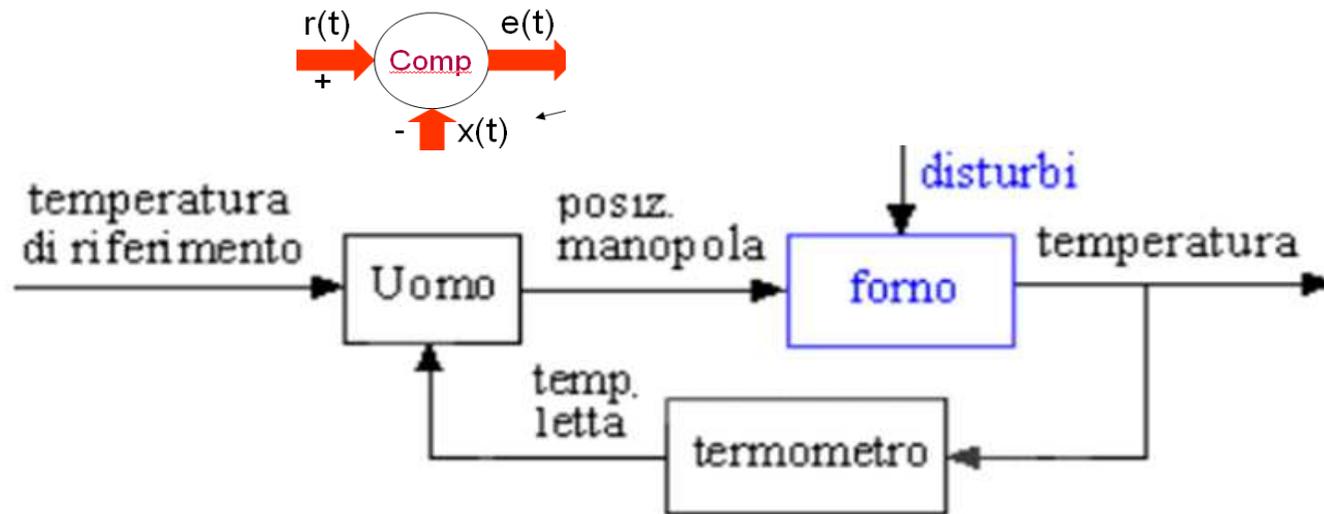
al contrario, in **un controllo in retroazione** (o in anello chiuso) il valore della *variabile manipolabile* dipende da quello della *variabile controllata* e da quelli di altre *variabili dipendenti* del sistema controllato, per cui è presente sempre almeno un percorso di segnale chiuso (detto **anello di retroazione**).

Gestione di un sistema di posizionamento in anello chiuso



Lo stesso trasduttore di posizione viene utilizzato dall'inverter per ricavare l'informazione di velocità e dal controller per ottenere l'informazione di posizione; a volte controller e inverter sono nello stesso chassis.

Il controllo automatico

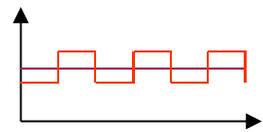


Sostituendo all'uomo un controllo automatico la "posizione della manopola" (cioè il valore di tensione imposto sulla resistenza di riscaldamento del forno) viene determinata da un' "azione" che si basa sull'errore rilevato ($e(t)$ = scostamento dal valore desiderato= offset).

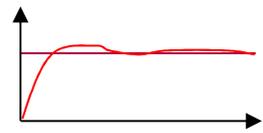
Il valore matematico di questa "azione" potrà essere associato a differenti algoritmi

Le regolazioni più comuni in ambito industriale

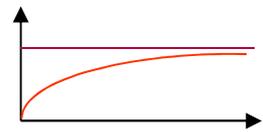
Ecco come viene trattato il valore $e(t)$



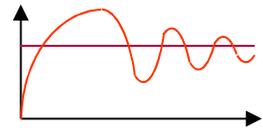
- Regolazione “tutto o niente”



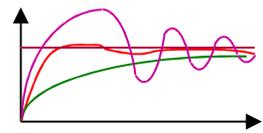
- Regolazione proporzionale



- Regolazione Integrativa



- Regolazione derivativa

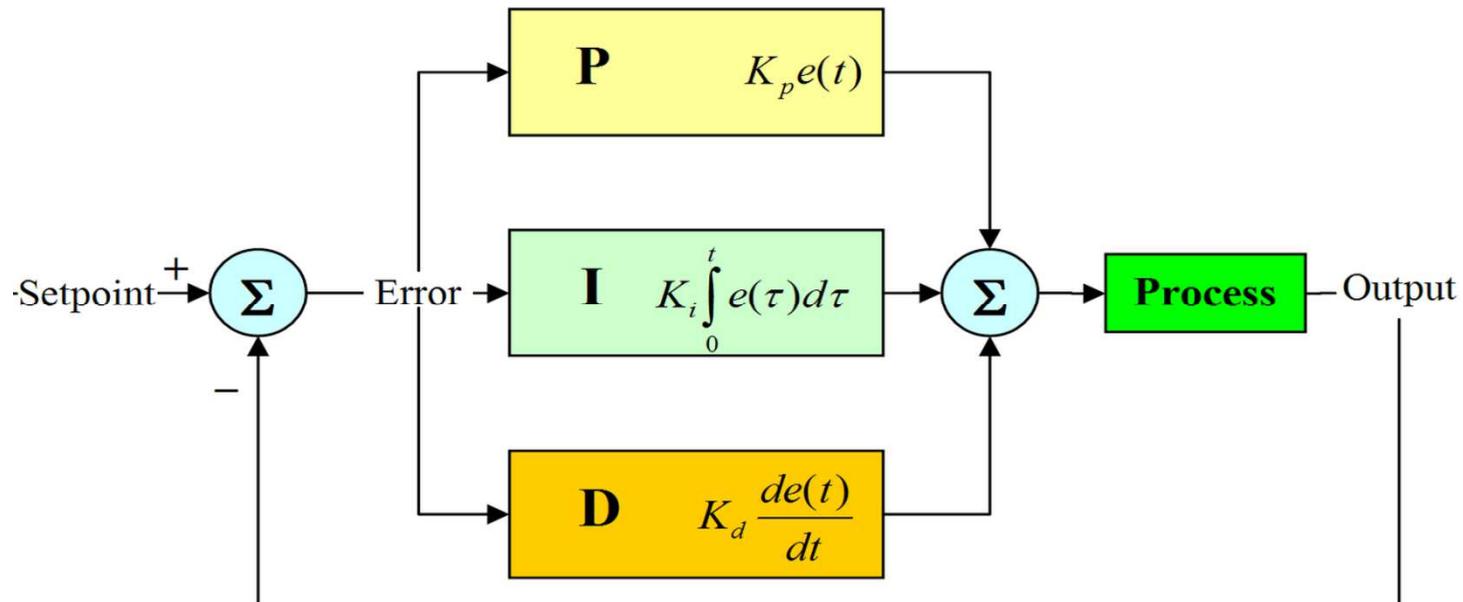


- Regolazione mista PID

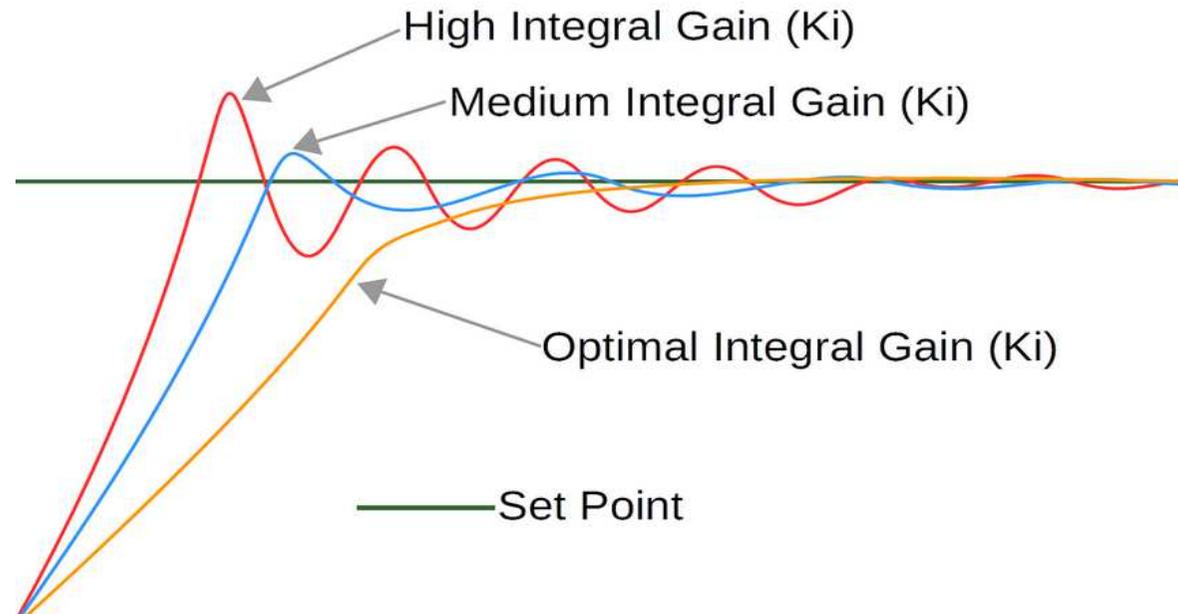
Il PID: *proporzionale integrativo derivativo*

In un sistema automatico PID viene utilizzato un algoritmo composto da 3 distinte funzioni: proporzionale, integrativo e derivativo.

Tali funzioni, adeguatamente sommate sono in grado di fornire, a basso costo, un controllo ottimale della maggior parte dei sistemi industriali



Effetti del PID sul sistema controllato



Modificando i parametri K del PID il sistema di controllo modificherà il proprio comportamento in base alle esigenze richieste

PID con un Altivar ad anello chiuso

Utilizzo tipico: pompaggio e ventilazione

Il regolatore PID dell'ATV 61 permette di regolare un processo attraverso i propri ingressi collegati alle uscite di un sensore (collegato a sua volta su una uscita: tubo di mandata o simili)

Settando correttamente tale funzione il variatore sarà in grado, attraverso un algoritmo matematico di reagire con la dovuta tempestività alle variazioni di portata

EMC

La compatibilità elettromagnetica

Life Is On

Schneider
Electric

Il problema EMC

EMC = **E**lectro **M**agnetic **C**ompatibility

I concetti sulla compatibilità elettromagnetica sono stati introdotti a seguito dello sviluppo della tecnologia elettronica e riguardano la necessità che ogni apparato, durante il suo regolare funzionamento, non generi disturbi che possano interferire con il normale funzionamento di apparati contigui.

Il problema EMC e le armoniche

Con riferimento alla problematica EMC è quindi necessario tener conto che un **inverter** che alimenta un motore tramite segnali ad onda quadra opportunamente modulati in larghezza (PWM) genera non solo la tensione di alimentazione vera e propria ma anche una serie di armoniche il cui effetto

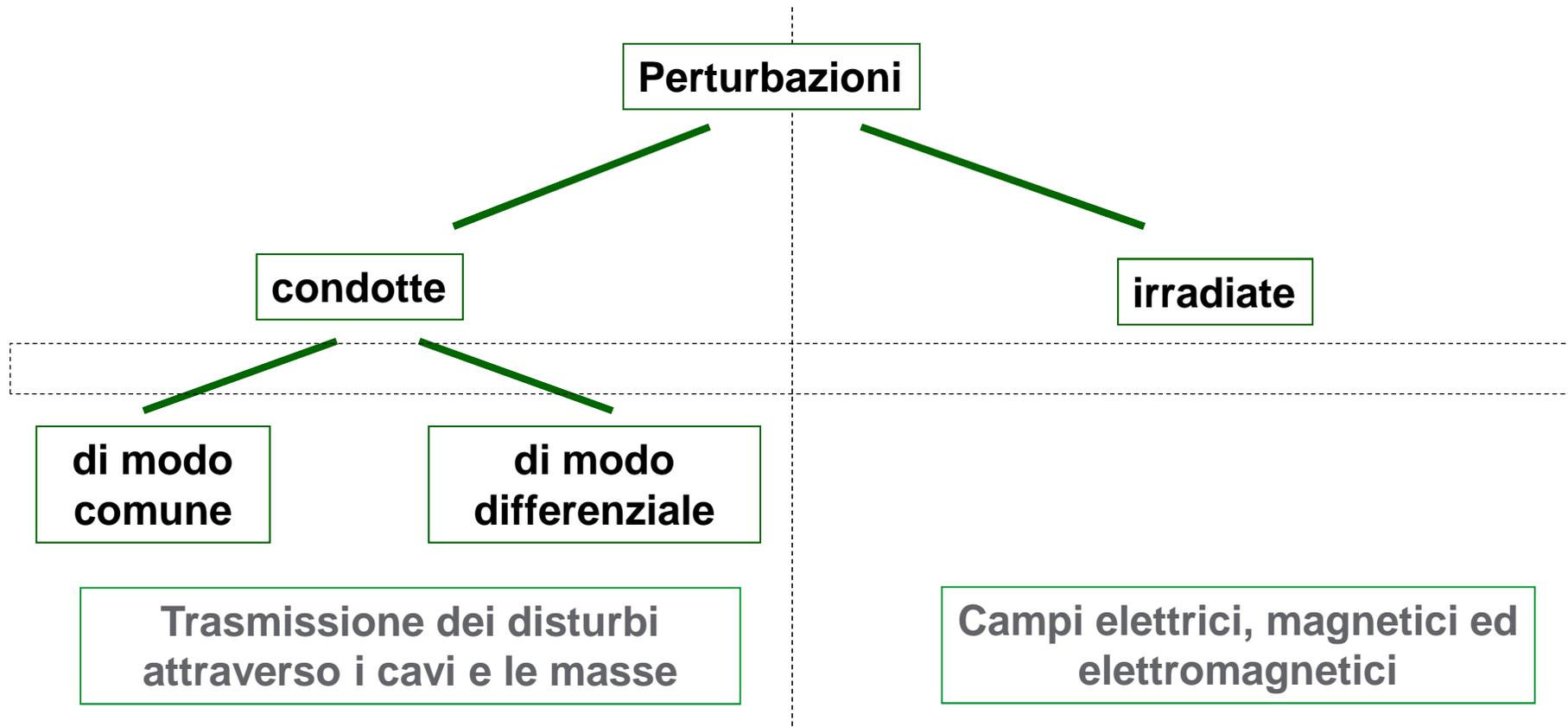
sul motore controllato

è di generare tensioni e correnti che non contribuiscono al movimento ma che anzi ad esso si oppongono e devono essere dissipate

sull'ambiente circostante

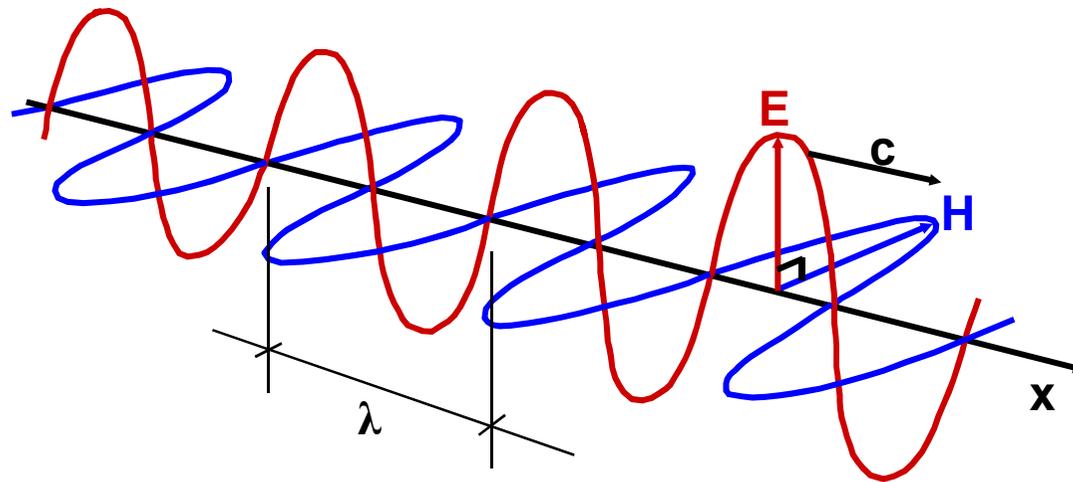
è di generare tensioni e correnti che attraverso percorsi cablati (collegamenti di terra, cavi di collegamento, ecc...) e per semplice irradiazione disturbano i dispositivi contigui

Il problema EMC ed i disturbi



Il problema EMC: perturbazioni irradiate

Si propagano nello spazio sottoforma di onde elettromagnetiche.



Sono emesse dall'apparato e dai cavi ad esso collegati.

Nel caso di un convertitore di frequenza le sorgenti di irradiazione sono:

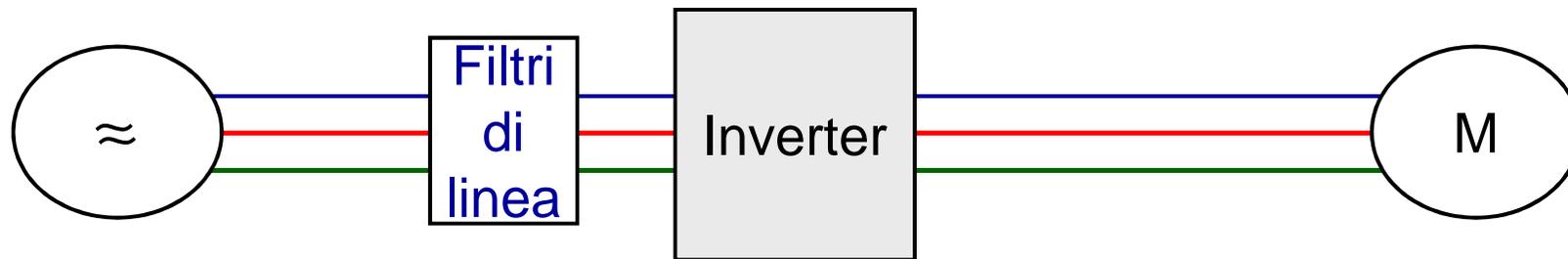
- i cavi di alimentazione del convertitore di frequenza
- il convertitore di frequenza
- i cavi di alimentazione del motore

EMC e inverter

il metodo di attenuazione dei disturbi condotti

La riduzione dell'ampiezza delle armoniche di corrente prodotte dal variatore si attua attraverso l'introduzione di **induttanze di linea** (a monte del variatore).

Le stesse induttanze garantiscono una miglior protezione dalle sovratensioni di rete.

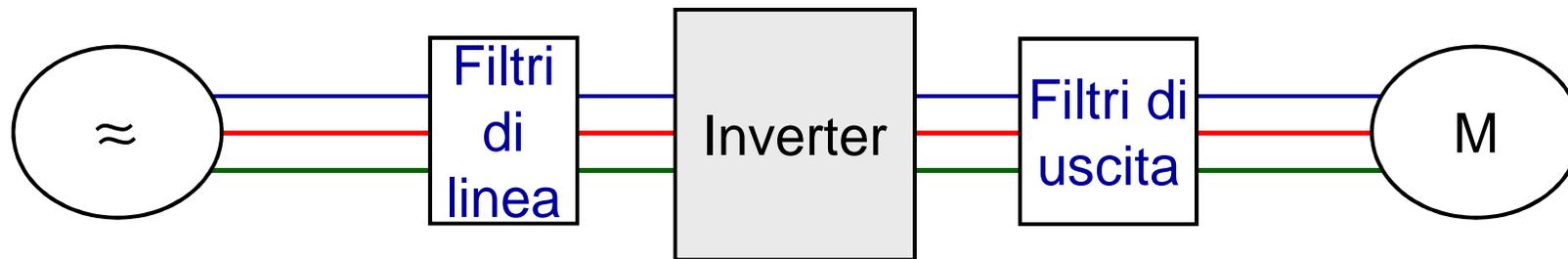


Le induttanze di linea sono necessarie quando

- la rete è fortemente disturbata ad esempio da altri carichi
- esiste uno squilibrio tra le fasi $> 1,8\%$
- la rete di alimentazione è a bassa impedenza (variante in prossimità di grandi trasformatori)
- sulla stessa rete sono installati molti variatori

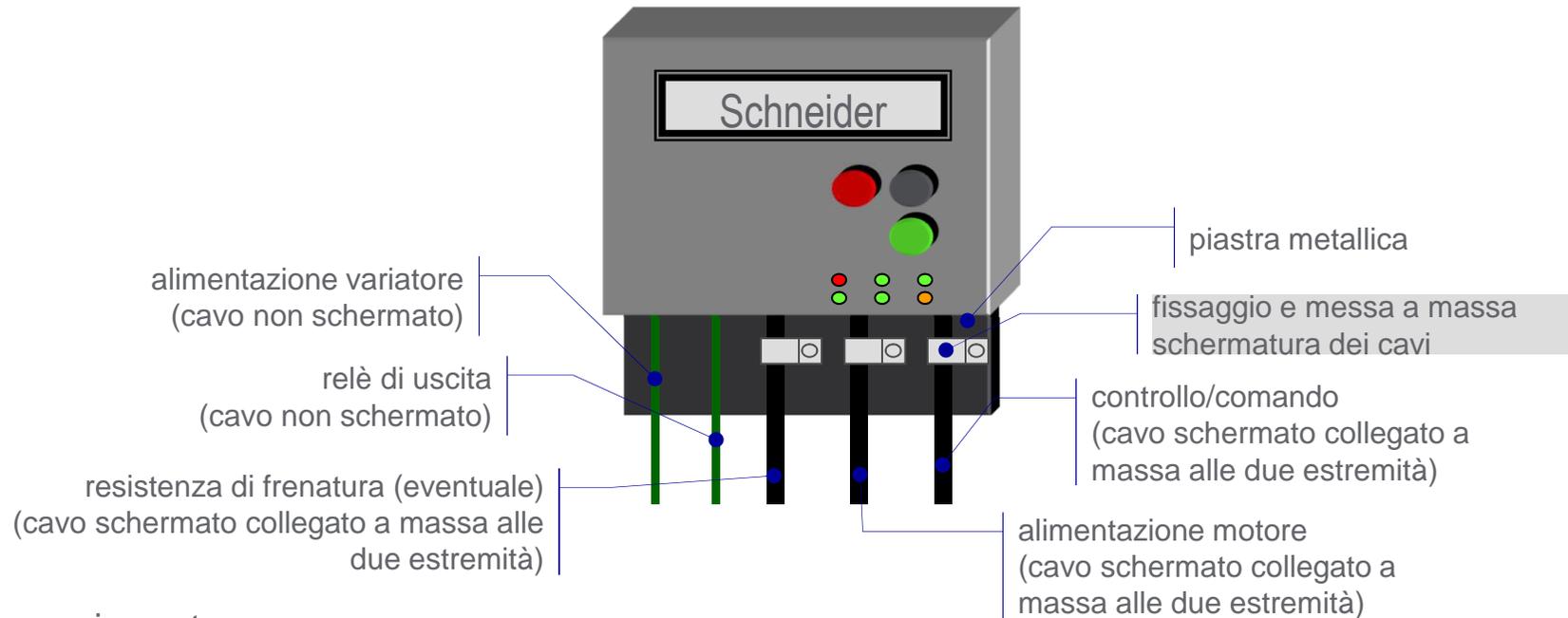
EMC e inverter: il metodo di attenuazione dei disturbi irradiati

Un **filtro a valle dell'inverter** ha invece lo scopo di limitare disturbi irradiati quando è necessario utilizzare cavi di collegamento di notevole lunghezza (>15 ÷ 20 m)



I filtri di uscita, limitano il comportamento irradiante da “antenna” dei cavi. Inoltre collaborano ad attenuare i fenomeni dissipativi dovuti a correnti parassite e di dispersione nel motore.

EMC e inverter: la corretta installazione per ridurre le emissioni



e, ovviamente...

...giunzioni di cavi schermati devono essere effettuate in cassetta metallica



Efficienza energetica tramite l'utilizzo dei variatori di velocità



Formatore: Marco Manione
Email: marco.manione@se.com

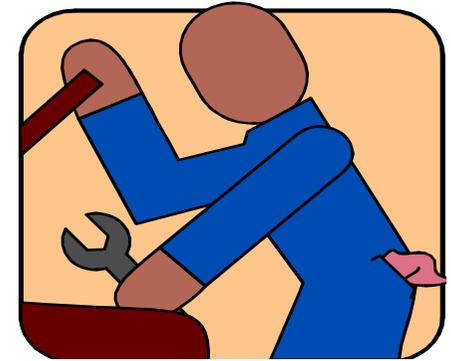
Life Is On

Schneider
Electric

La variazione di velocità. Perché ?

**Perché consente
di
Risparmiare !!!**

Questioni di coppia...



La **coppia motrice** esprime la forza che un motore imprime al proprio asse, ossia al carico meccanico, quindi è un parametro fondamentale per conoscere le caratteristiche meccaniche del motore.

La **coppia resistente**, come la coppia motrice, non è sempre costante, ma varia a seconda della velocità di rotazione del motore ed è dipendente dall'applicazione

Caratteristiche del carico

- Il tipo di coppia resistente del carico trascinato dal motore elettrico determina l'esistenza di presupposti o meno per ottenere del risparmio energetico.

pompa



ventilatore



gru edile

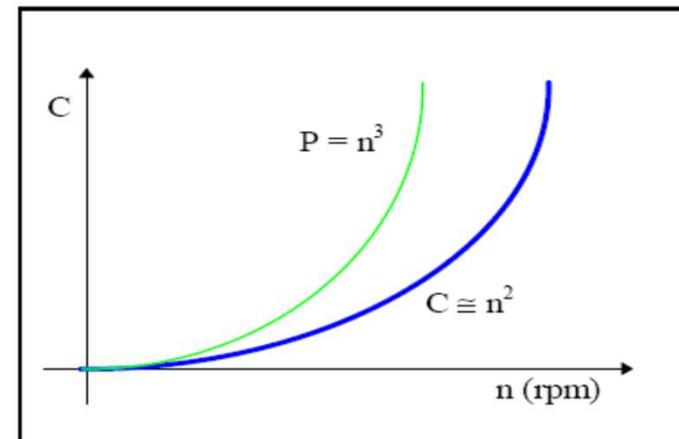


trasportatore

Macchine a coppia quadratica

In queste macchine **la coppia resistente è in rapporto quadratico rispetto alla velocità**, mentre la potenza cresce proporzionalmente al cubo della velocità. Tipicamente sono le macchine che trattano i fluidi (liquidi o aeriformi).

- Ventilatori e ventole di ogni tipo
- Eliche
- Pompe Centrifughe
- Pompe Assiali
- Compressori a vite
- Centrifughe



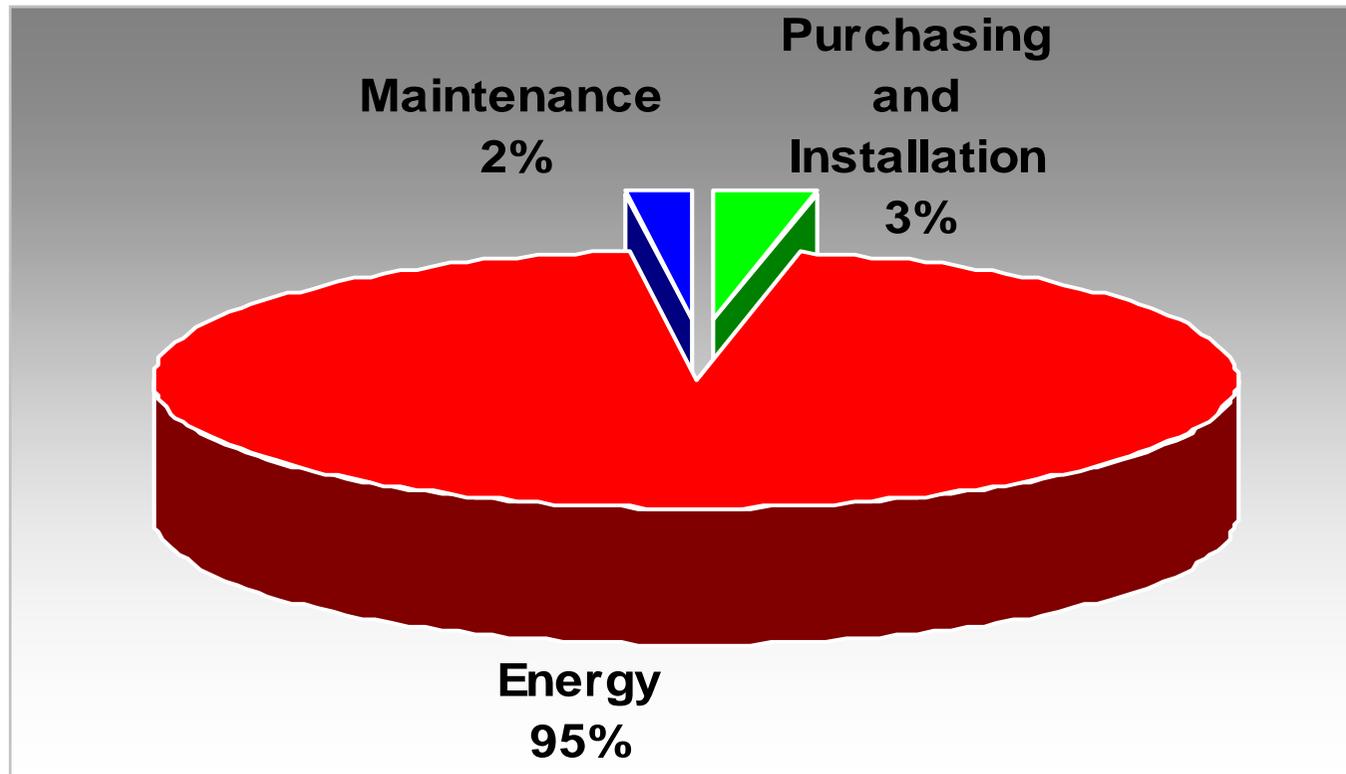
Principi fondamentali delle macchine a coppia quadratica

Il **flusso** è proporzionale alla velocità
del motore

La **pressione** è proporzionale al
quadrato della velocità del motore

La **potenza** è proporzionale al cubo
della velocità del motore

Energia per Pompe e Ventilatori

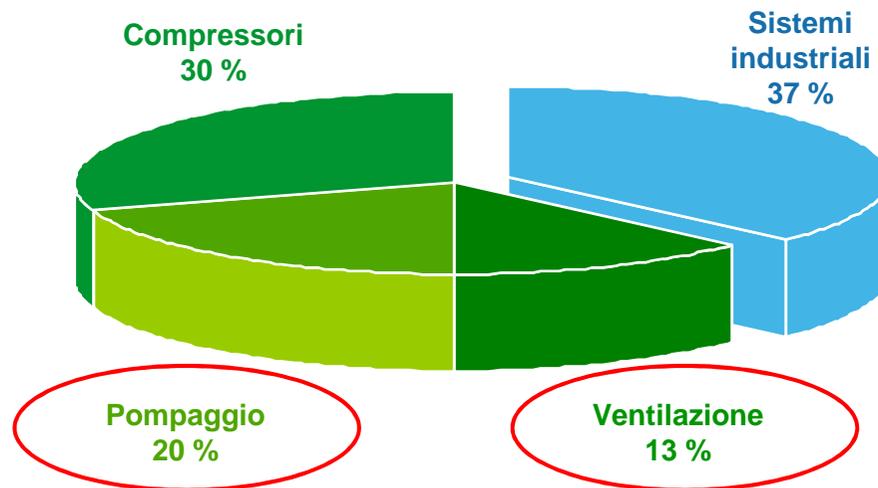


Distribuzione dei Costi nel Ciclo di Vita

Applicazioni principali dove fare EE

Dove è possibile risparmiare energia con la variazione di velocità ?

Oltre il **60 %** dell'elettricità consumata nei sistemi industriali è usata per alimentare motori destinati al comando di macchine per il trattamento di fluidi



Campi di applicazione con il più alto valore di risparmio energetico:

- **V e n t i l a z i o n e**
- **P o m p a g g i o**

Applicazioni motore

Ma quanto possiamo **risparmiare** con l'installazione di un variatore di velocità ?

Tecnologie e metodi di regolazione meccanici

Ventilatori

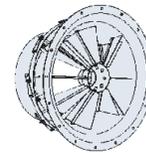
- Assiali



- Centrifughi con Serranda Dapò o Serranda sull'aspirazione



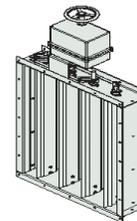
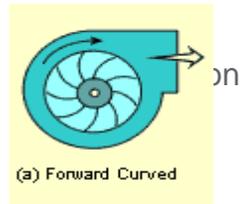
con



o



- Centrifughi , Palette in avanti con Serranda sulla mandata



Tecnologie e metodi di regolazione meccanici

Pompe

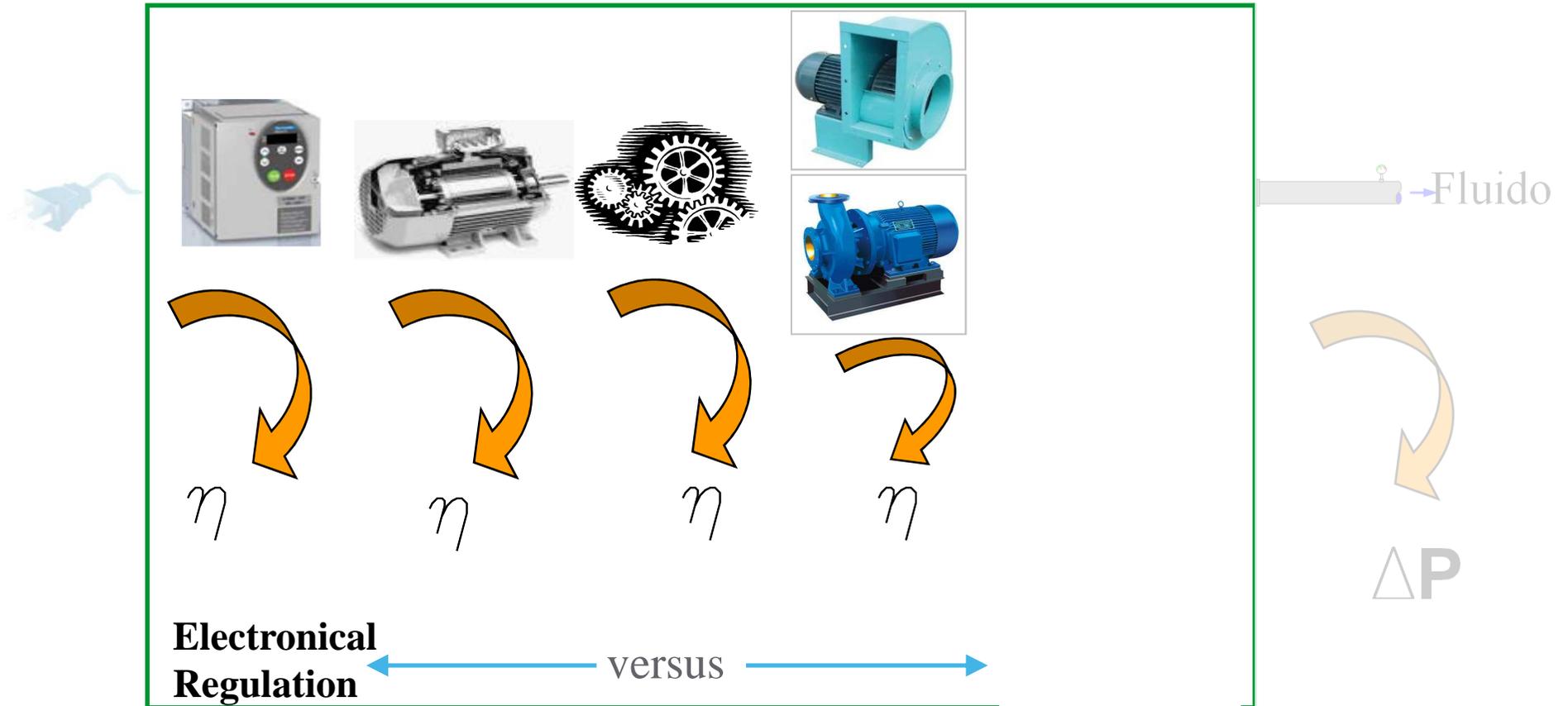
- Pompe con Valvola di strozzatura sulla mandata
- Pompe controllate con Ricircolo (Bypass)
- Funzionamento intermittente (Controllo Start/Stop)



- Pompe in parallelo (Controllo in Cascata)

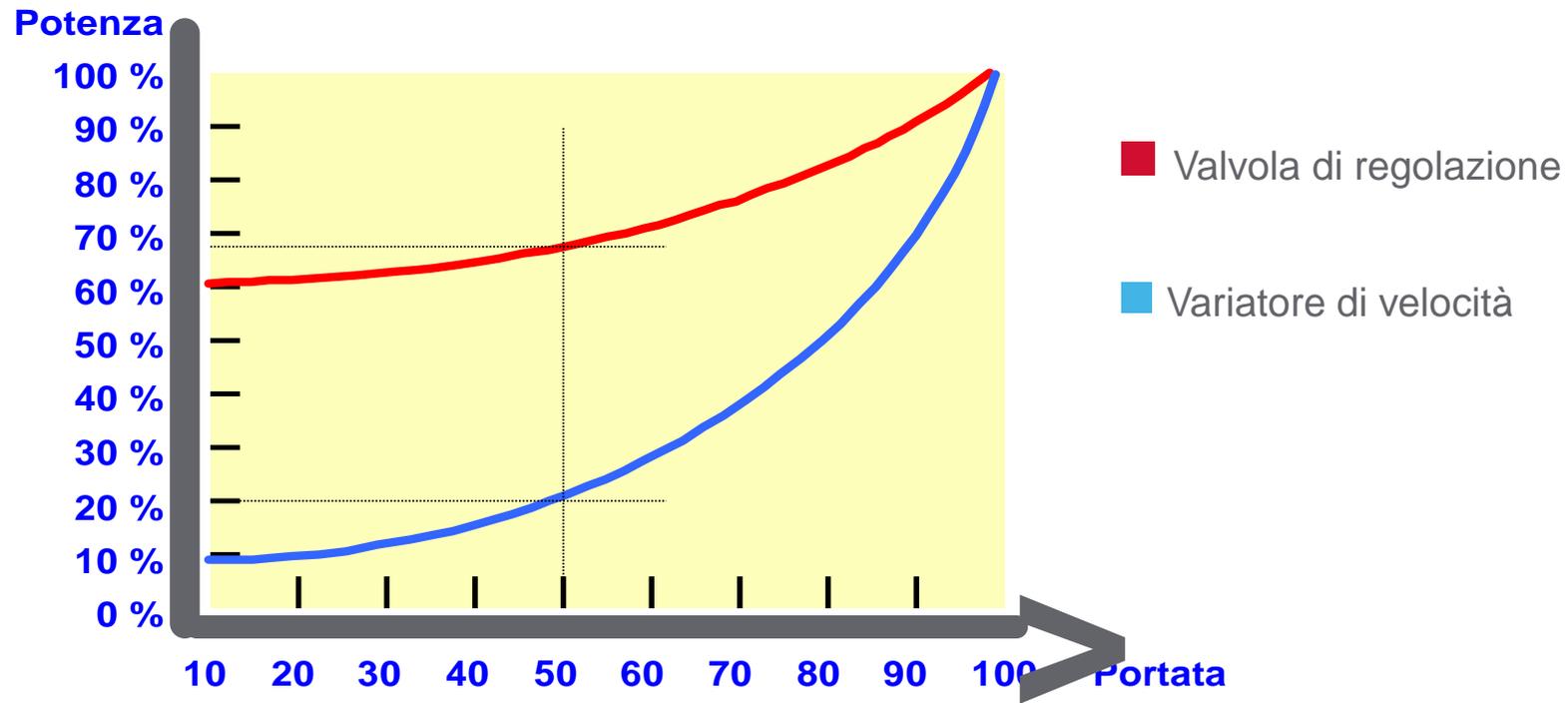


Dove si dissipa l'energia?

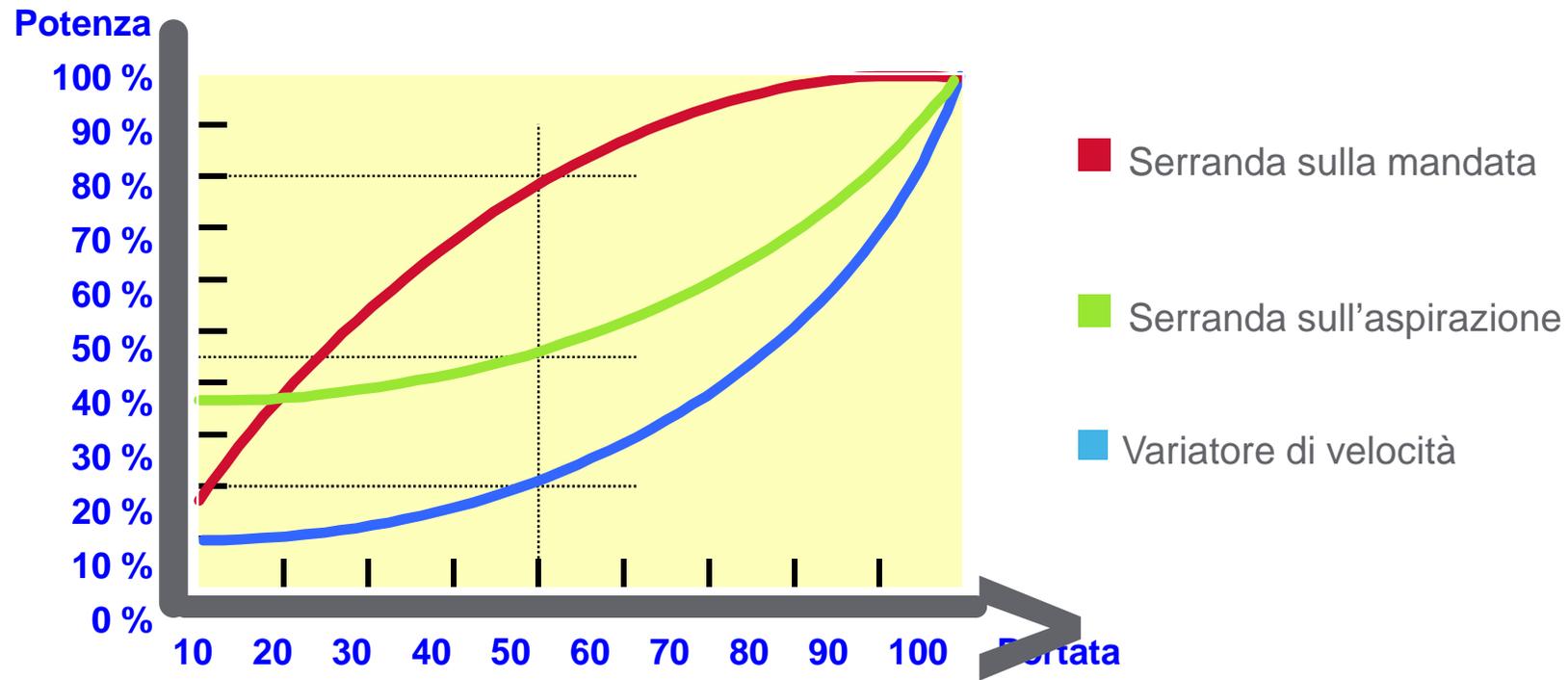


Risparmio Energetico con inverter

La curva di potenza della pompa



La curva di potenza del ventilatore



Dove fare Efficienza Energetica ?



Applicazioni per l'industria

Caldaie

da 0.75 a 55kW



Aspiratori

da 0.2 a 7.5kW



Ventilatori e Soffianti

da 0.4 a 250kW



Pompe processo

da 0.75 a 160kW



Torri raffreddamento

da 2.2 a 15kW



UTA unità trattamento aria

da 1.5 a 75kW



Applicazioni per il building ed il terziario

UTA unità trattamento aria
da 1.5 a 75kW



Fan Coil Unit
da 0.2 a 3.7kW



Chiller
da 0.4 a 22kW



Building



Terziario



Gruppi frigoriferi
da 75 a 400kW



Pompe di calore
da 1.5 a 30kW



Roof Top Unit
da 37 a 110 kW



Grazie per l'attenzione

Marco Manione

A futuristic digital interface with a world map on the left, a bar chart on the right, and a central glowing point with concentric circles and arrows. The interface is overlaid on a background of a hand pointing at a screen.

3141592653589793238462643383279
502884119716839837510582084944
5923038164052962088999528034825
342117057982148086513282306647
0938944608550582231725359408128

> Ready for
the future

Life Is On

Schneider
Electric