

Università degli Studi di Cassino  
Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea in  
Ingegneria della Produzione Industriale

Modulo di:

**Elementi di Azionamenti Elettrici**

prof. Giuseppe Tomasso

e-mail: [tomasso@unicas.it](mailto:tomasso@unicas.it)

telefono: 0776-2993730

Web: [http:// webuser.unicas.it/tomasso](http://webuser.unicas.it/tomasso)

Modulo di:

# Elementi di Azionamenti Elettrici

*programma*

## L'Automazione Industriale

### Introduzione agli Azionamenti Elettrici

- struttura di un azionamento elettrico;
- classificazione;
- settori di impiego.

### Meccanica degli Azionamenti Elettrici

- richiami sulle equazioni del moto;
- organi di trasmissione;
- punto di lavoro e stabilità.

### Motore in cc ad eccitazione indipendente

- principio di funzionamento;
- regolazione della velocità in regime stazionario
- dominio di regolazione
- avviamento
- frenatura

### Azionamenti cc controllati in catena chiusa

- controlli in retroazione;
- regolatori industriali;
- controllo in cascata motore cc ad eccitazione indipendente:  
anello di corrente e velocità

### Introduzione ai PLC

- struttura di un PLC
- programmazione di un PLC

### Motore asincrono trifase

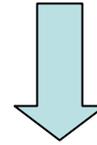
- caratteristiche stazionarie;
- avviamento;
- frenatura;
- regolazione della velocità.

### Azionamenti in alternata

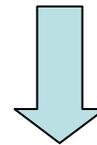
- controllo  $V/f$  motore asincrono;

### Dimensionamento degli azionamenti elettrici

# AUTOMAZIONE



## CONTROLLO DEI PROCESSI AUTOMATIZZATI



Produzione, sia di beni che di servizi, con riferimento a:  
contenimento dei costi, riduzione dei tempi utili di approntamento,  
personalizzazione e assicurazione di qualità di prodotti e servizi,  
adattamento a volumi di vendite variabili nel tempo.

Per essere competitivi è infatti necessario saper coniugare il  
soddisfacimento della flessibilità richiesta dal mercato con il controllo dei  
costi di produzione



Il *processo industriale* può essere definito come l'insieme delle operazioni che concorrono a trasformare le proprietà di uno o più materiali, tipi di energia o informazioni con un obiettivo predeterminato; esempi tipici possono essere la produzione di un determinato bene attraverso una lavorazione continua oppure discreta di tipo manifatturiero, la produzione di energia elettrica oppure il suo trasporto e distribuzione, la raccolta-elaborazione – diffusione di informazioni.



L'impianto industriale è l'insieme degli apparecchi, delle macchine e dei mezzi necessari all'esecuzione dei compiti di trasformazione per cui il processo industriale è concepito; il flusso principale di materiali – energia – informazioni che entra nell'impianto per dar luogo al flusso corrispondente a valle delle operazioni di trasformazione delle loro proprietà è accompagnato da un flusso analogo che si può definire flusso di servizio, ossia necessario al corretto funzionamento di tutte le parti dell'impianto.

## Il sistema di controllo di processo



Il sistema che regola i comandi necessari al funzionamento dell'impianto e quindi al perseguimento dell'obiettivo del processo industriale, ne ottimizza le fasi e ne verifica i risultati è detto sistema di controllo di processo (**PCS, Process Control System**); oltre al processo stesso su cui agisce direttamente il controllo, questo è anche interfacciato al sistema superiore che ne imposta i comportamenti in funzione degli obiettivi che il processo deve conseguire.

## MES & ERP

Il “sistema superiore” può essere semplicemente il personale addetto alla conduzione dell'impianto oppure un sistema di pianificazione della produzione (**MES, Manufacturing Execution System**) oppure ancora un sistema di gestione delle risorse aziendali (**ERP, Enterprise Resources Planning**). Le variabili quindi in ingresso e uscita dal sistema di controllo sono sia scambiate con il sistema superiore (impostazione delle variabili di riferimento, delle soglie, segnalazioni di stati e allarmi, misure, ecc), sia con il processo controllato (rilevamento e misura delle variabili controllate e di controllo, comandi, ecc).

## Automazione avanzata: **C**omputer **I**ntegrated **M**anufacturing

Impiego articolato e cooperante della tecnologia informatica nei processi di

- progettazione,
- produzione,
- distribuzione,

per acquisire un durevole vantaggio competitivo.

Ambito: tutte le funzioni dell'impresa che possono

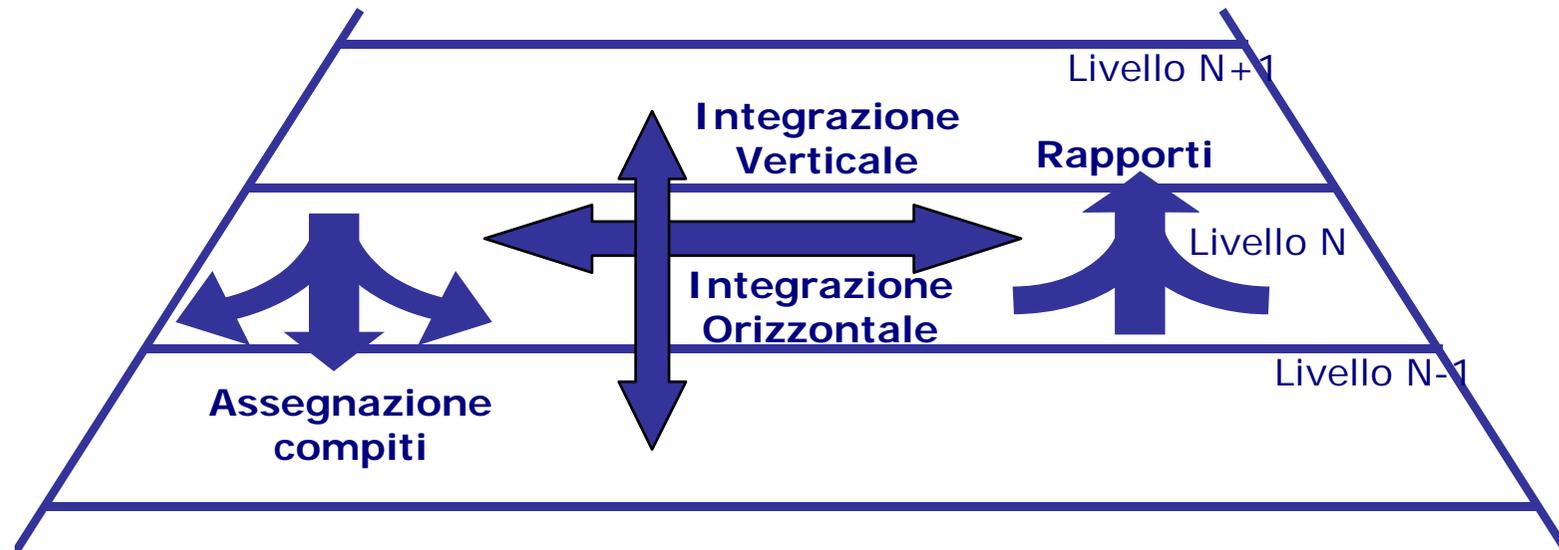
- essere assistite dall'elaboratore,
- essere automatizzate e quindi eseguite e controllate dall'elaboratore,
- con un alto livello di integrazione.

## La piramide CIM



Ad ogni livello sono svolte delle funzioni di base comuni distinguibili in tre categorie:

- Di gestione dal livello superiore: scomposizione dei comandi ricevuti in sottocompiti e rapporto delle attività svolte.
- Di gestione del proprio livello: assegnazione dei sottocompiti e delle risorse, attuazione dei sottocompiti del livello.
- Di gestione verso il livello inferiore: assegnazione dei sottocompiti e delle risorse e analisi delle informazioni di risposta ricevute dal livello inferiore.



Due diverse tipologie di integrazione che è necessario attuare a ciascun livello per raggiungere quella dell'intero sistema:

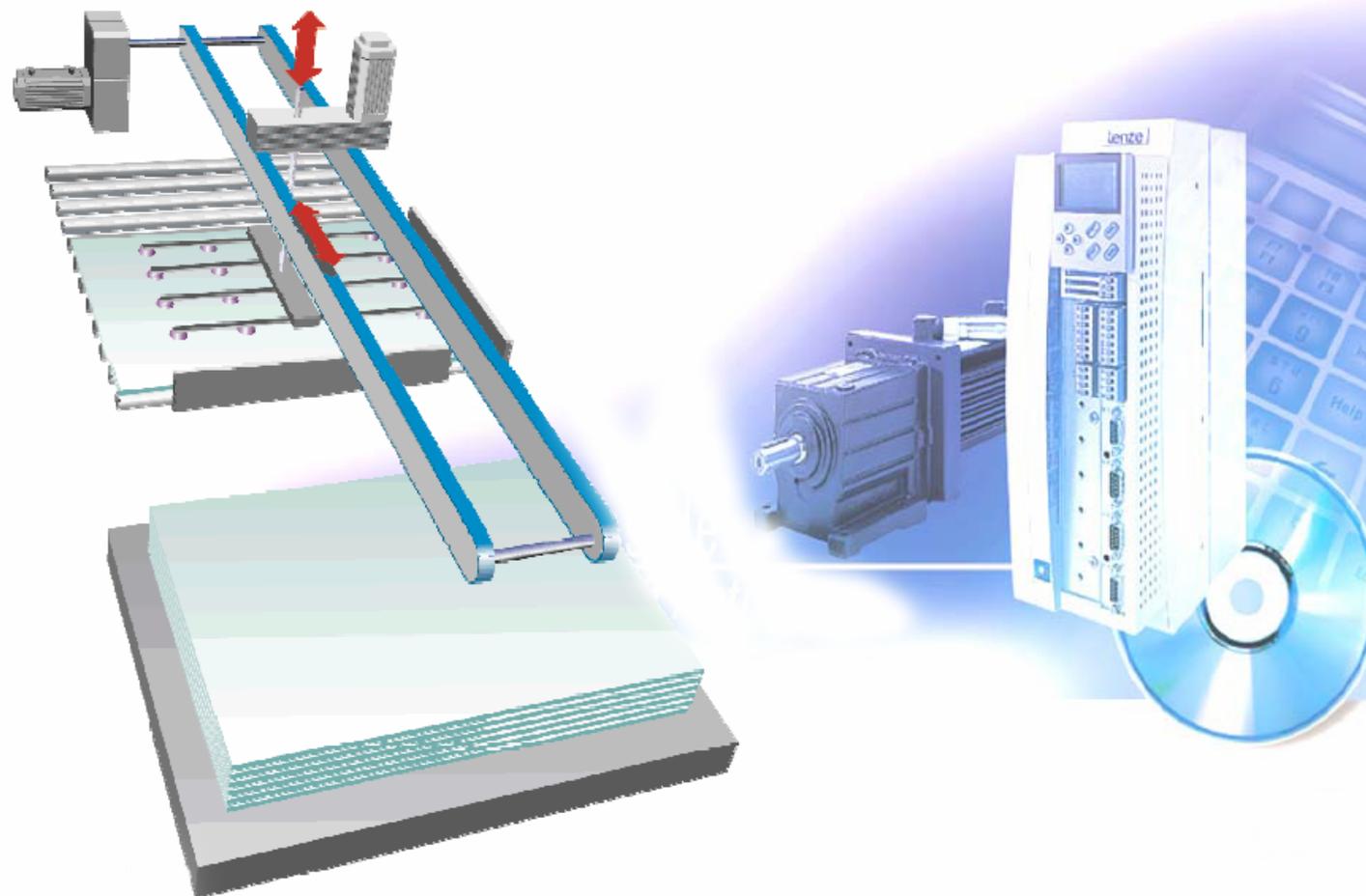
- *Integrazione orizzontale*: all'interno di ciascun livello
- *Integrazione verticale*: tra un livello e quelli adiacenti

Corso di Laurea in  
Ingegneria della Produzione Industriale  
**Elementi di Azionamenti Elettrici**

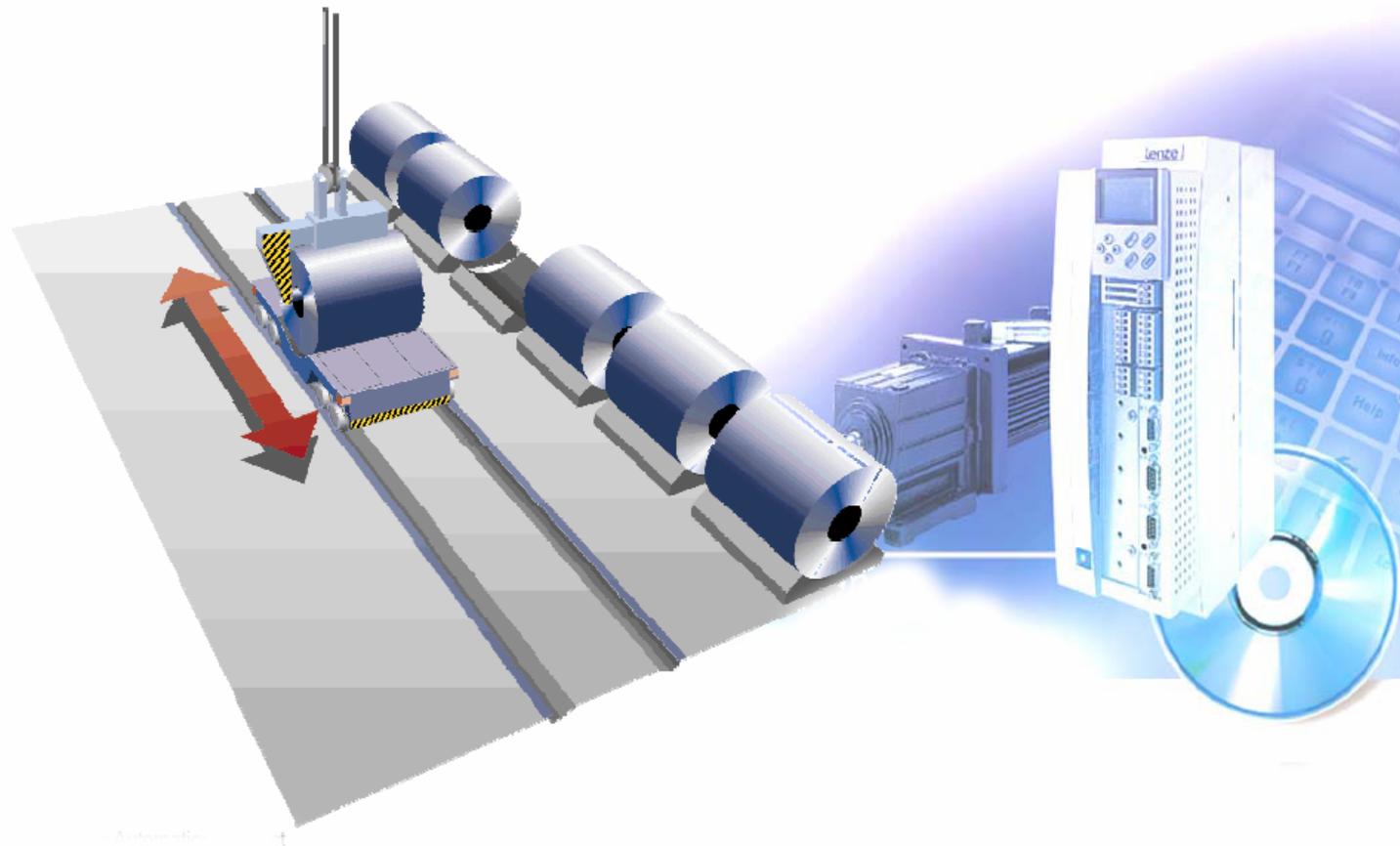
Università  
degli Studi di  
Cassino

# Esempi di sistemi per movimentazione industriale

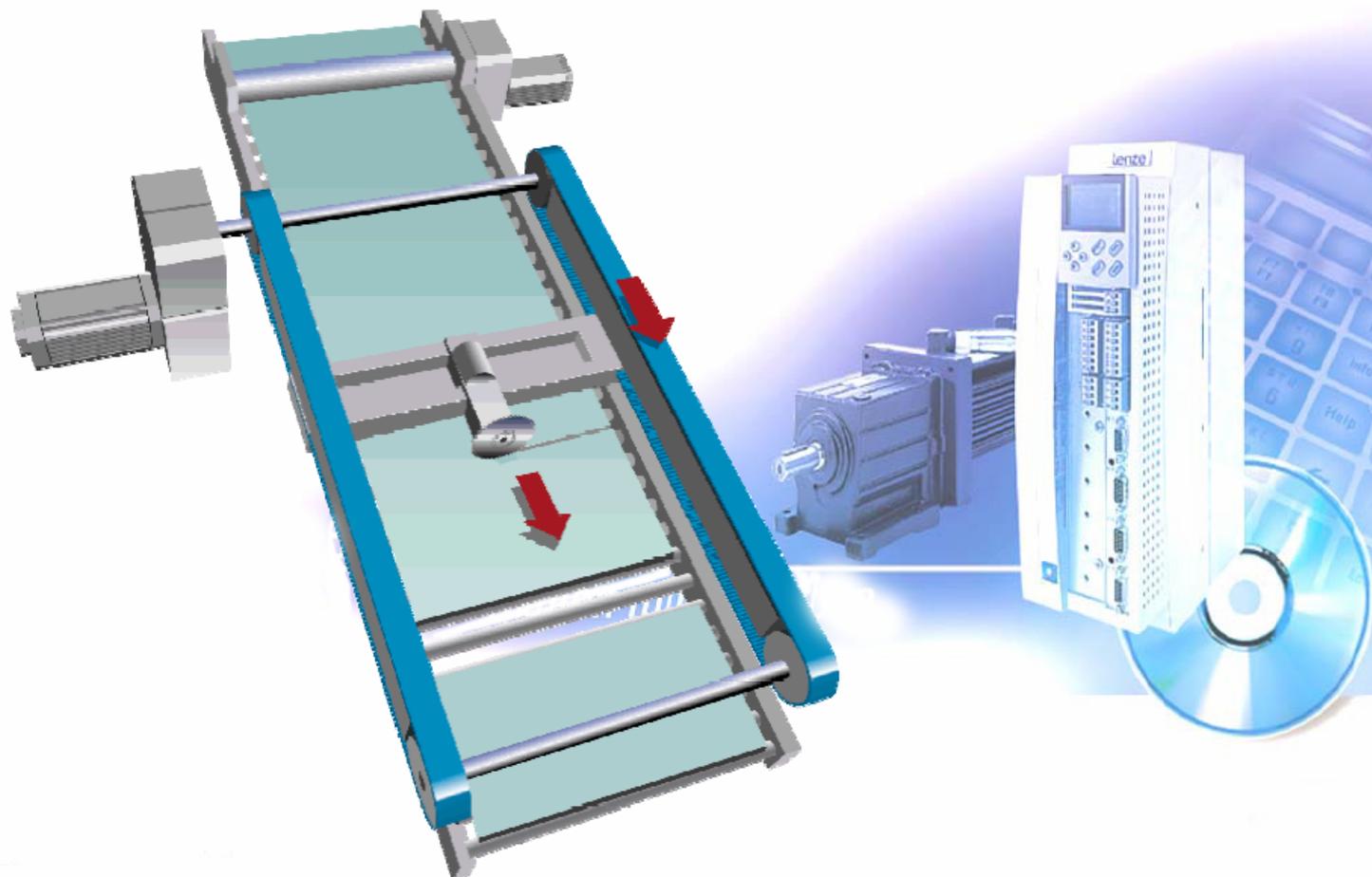
### Applicazioni tipiche positioning: Pallettizzatori



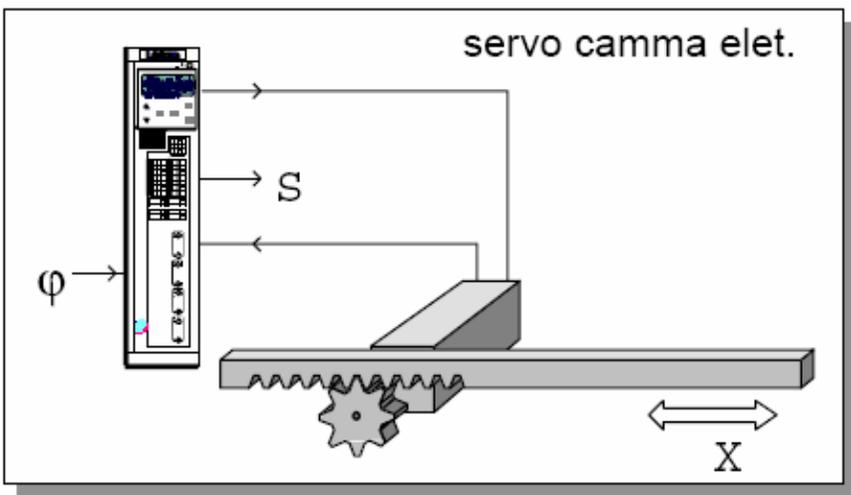
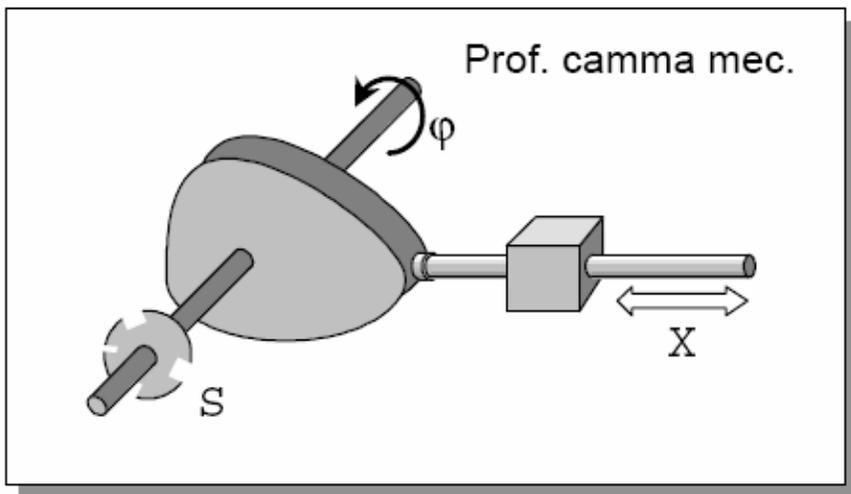
Applicazioni tipiche positioning: Caricatori di materiale



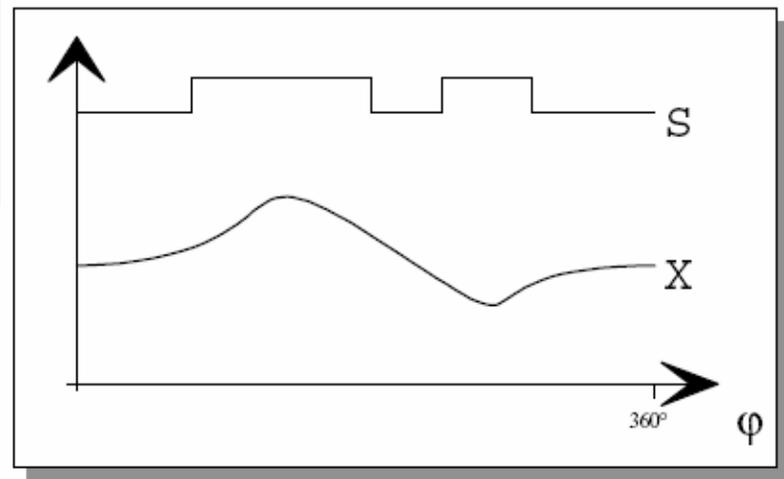
### Applicazioni tipiche positioning: Taglierine lineari



### Principio del generatore a camme



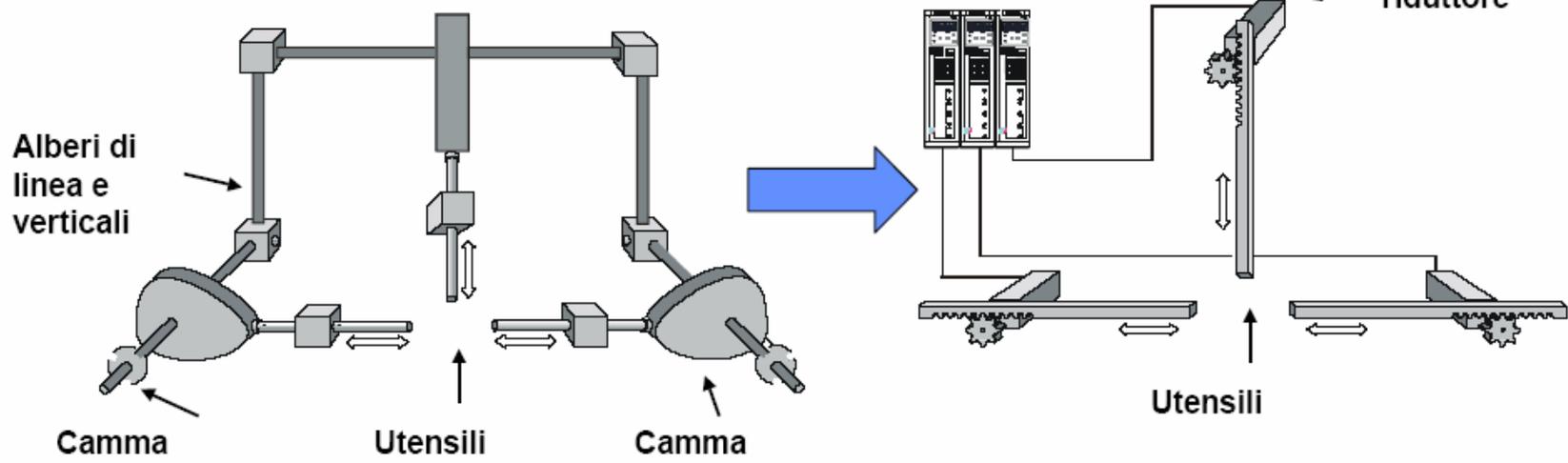
$\phi$  Frequenza pilota  
S Cam switch  
X Corsa



### Principio del generatore a camme

Da sistema meccanico a **meccatronico**

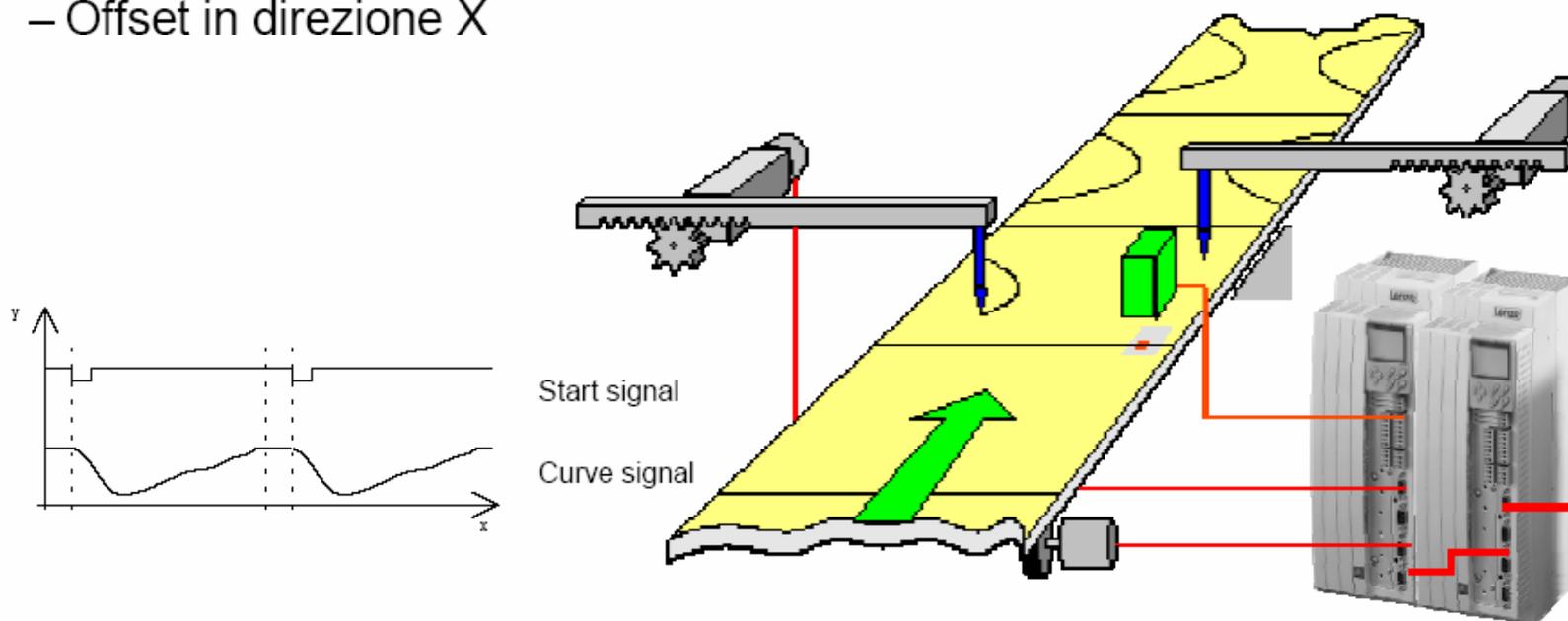
Gli alberi di linea e verticali e le camme rimangono unicamente disponibili come insieme di informazioni all'interno dei controlli asse.



## Applicazioni tipiche camma: Taglio profilato

### Funzioni aggiuntive

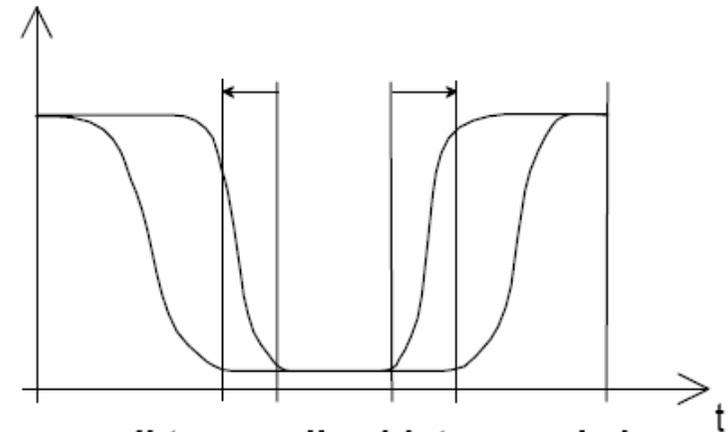
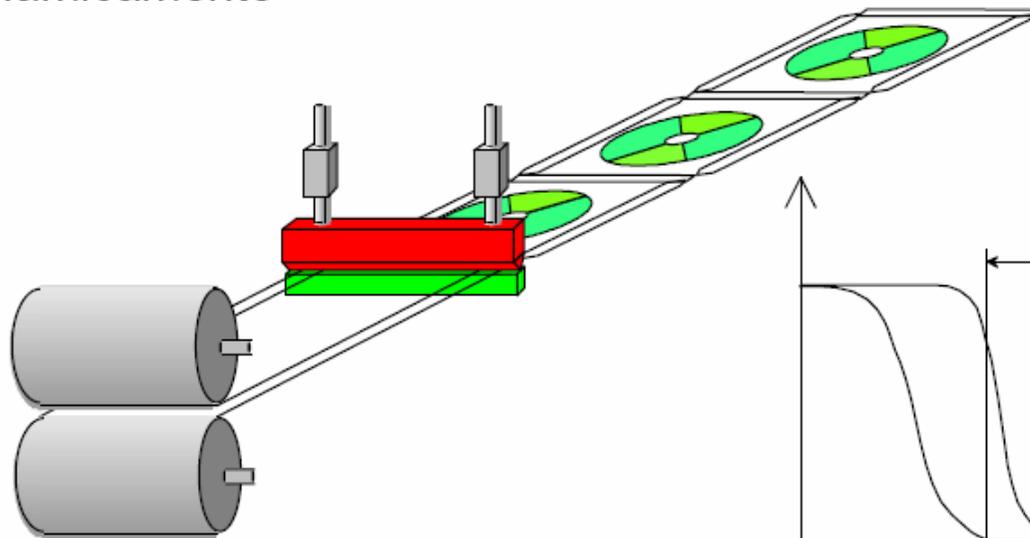
- Inizio della curva attraverso la lettura di un sensore
- Offset in direzione X



## Applicazioni tipiche camma: Stazioni di saldatura

### Funzioni aggiuntive

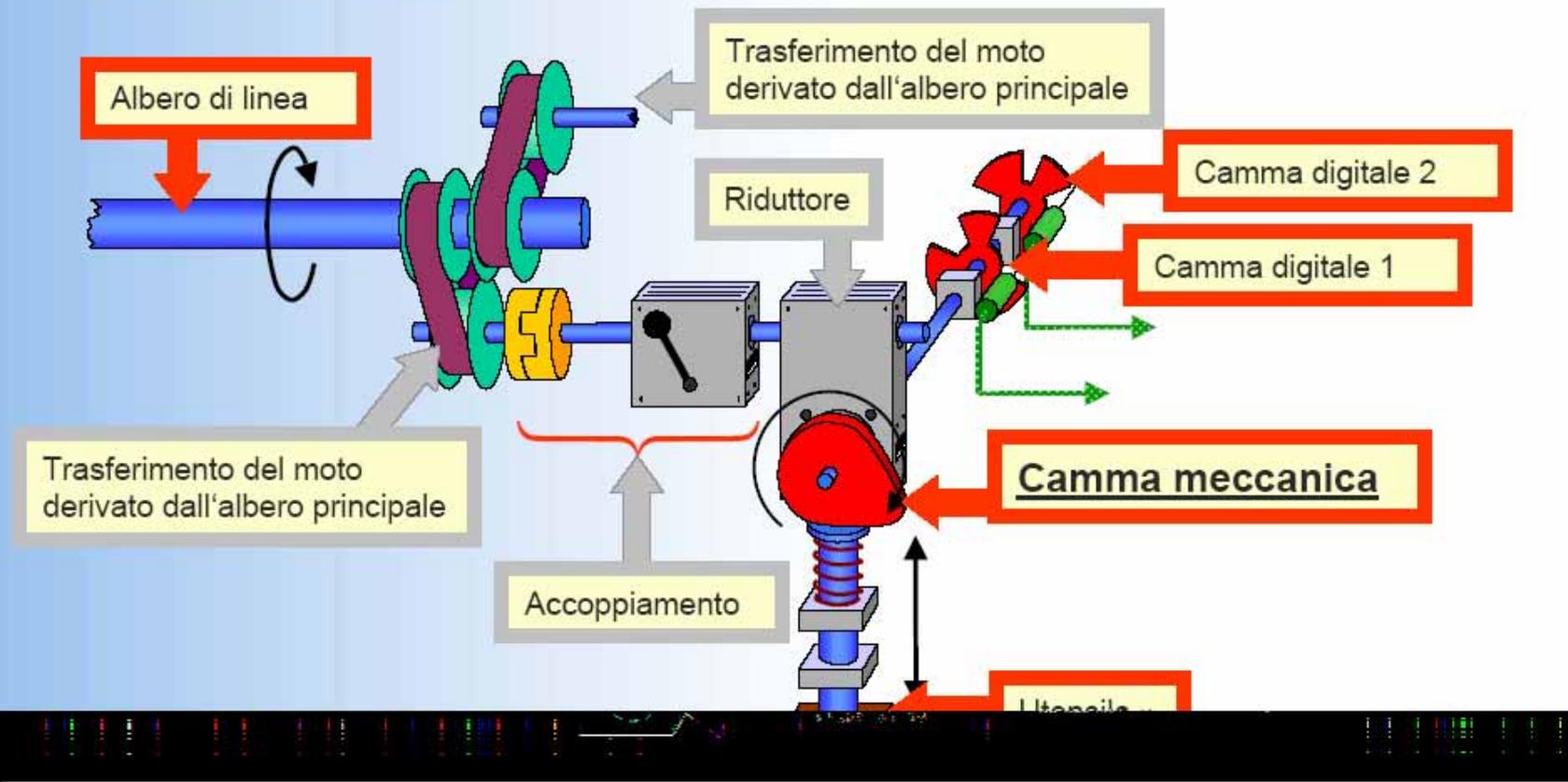
- Il tempo di saldatura prolungato dinamicamente



*Il tempo di saldatura varia in funzione della lunghezza del prodotto*

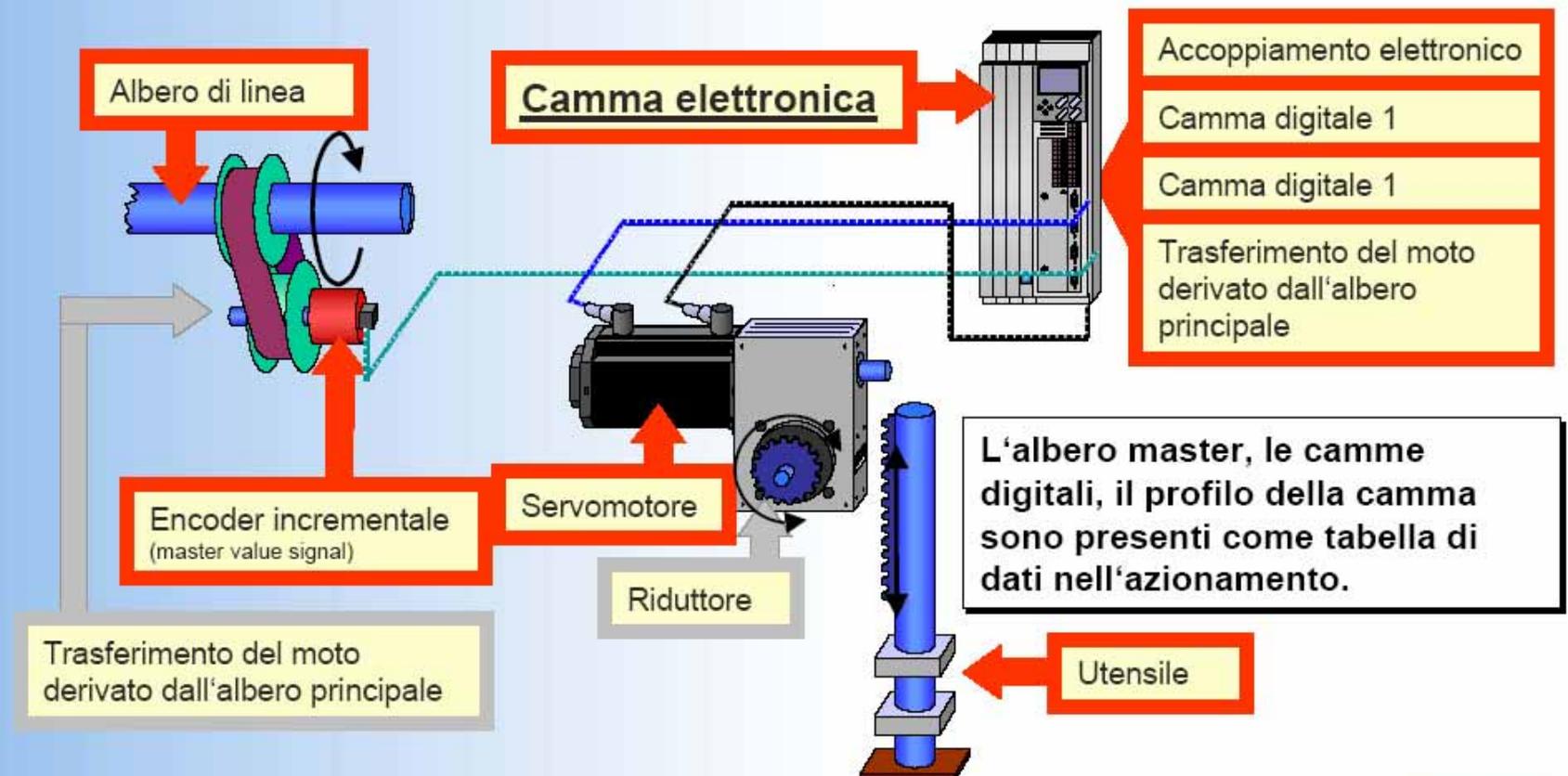
# Elementi base della camma elettronica

Da sistema meccanico...

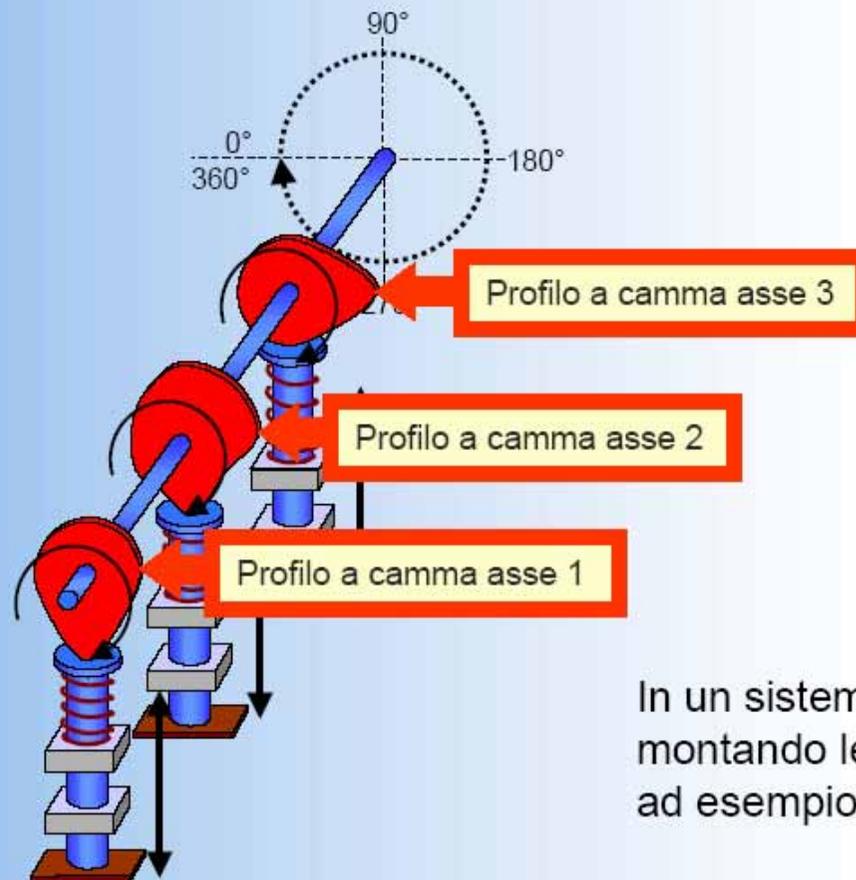


# Elementi base della camma elettronica

... a meccatronico:



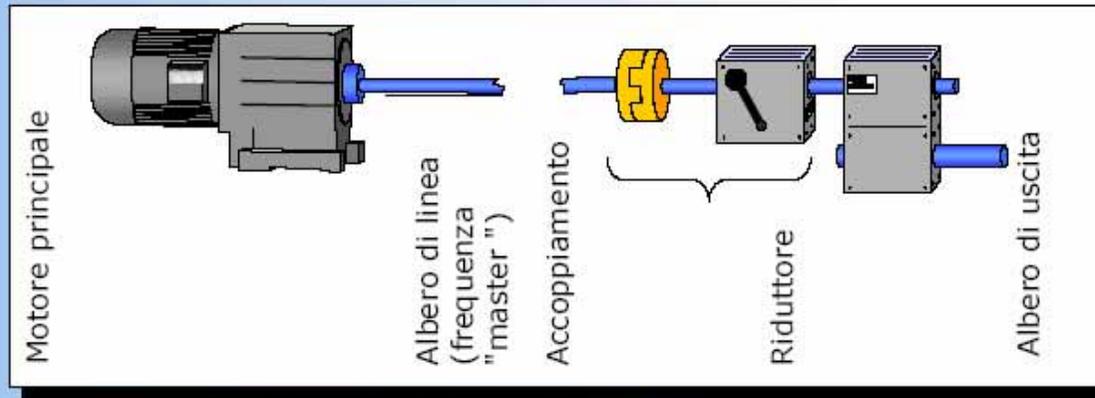
# Elementi base della camma elettronica



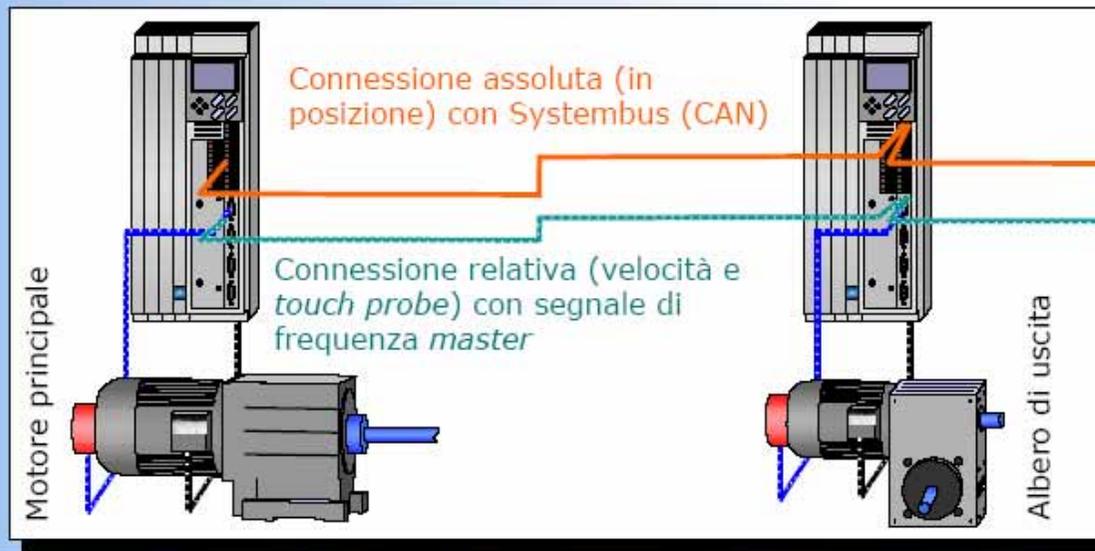
I profili di movimento dei singoli assi con profilo a camma sono sincronizzati con un angolo di riferimento:

In un sistema meccanico ciò è ottenuto montando le camme sull'albero di linea, che ad esempio si muove con cicli da 0° a 360° ...

# Struttura albero elettrico



Sostituzione di albero meccanico, con ...

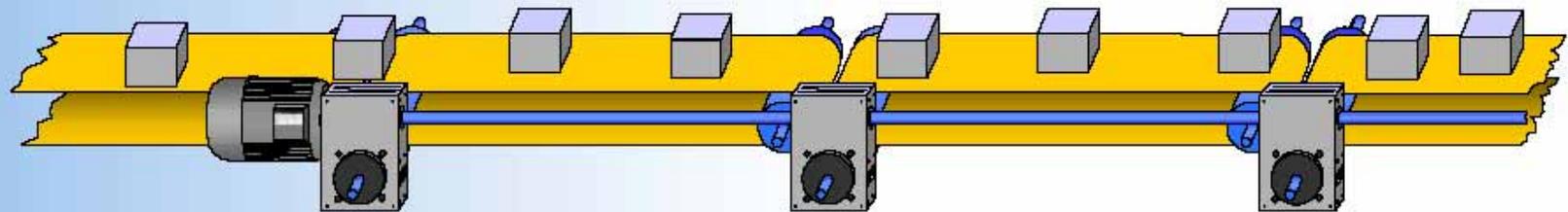


... accoppiamento elettronico di vari motori:

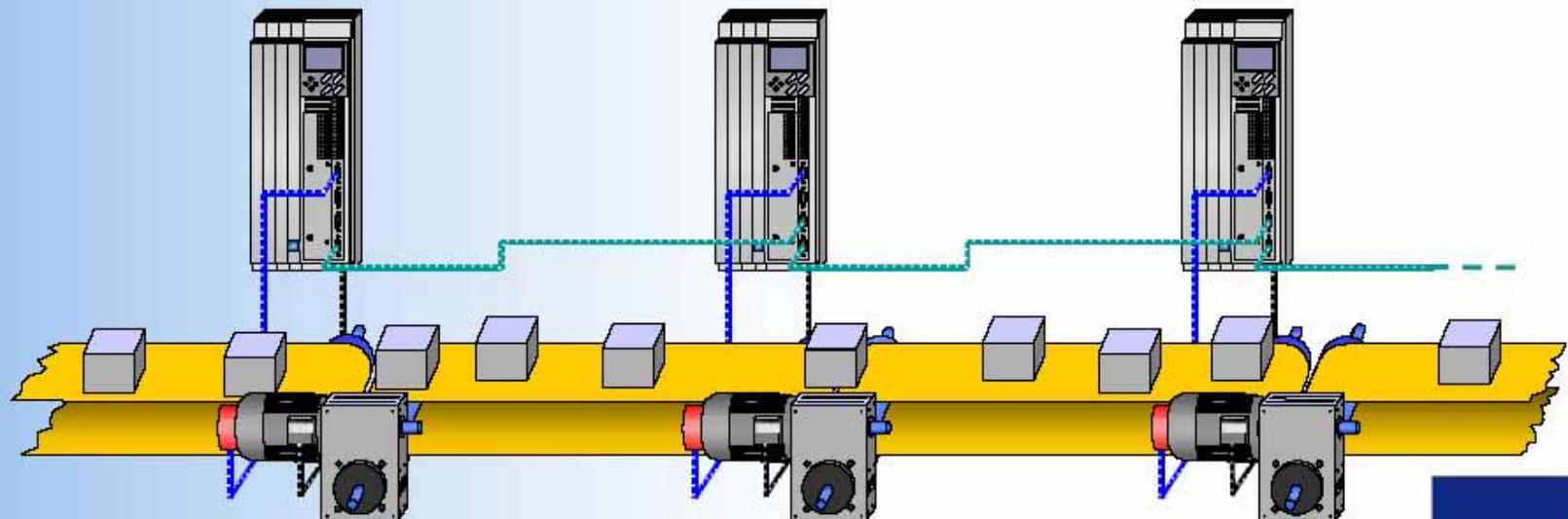


## Proprietà albero elettrico

Connessione meccanica ("albero di linea"):

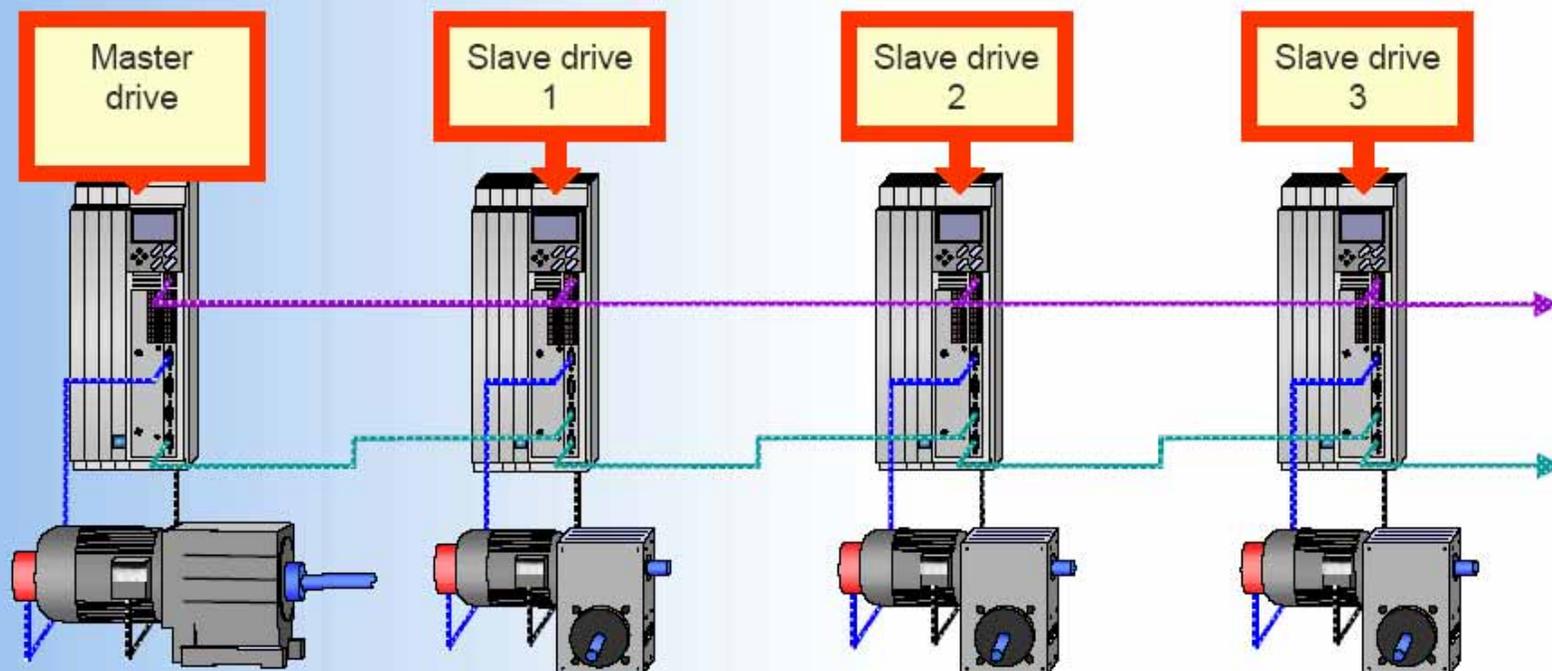


Sostituzione con azionamenti separati ("albero elettrico"):



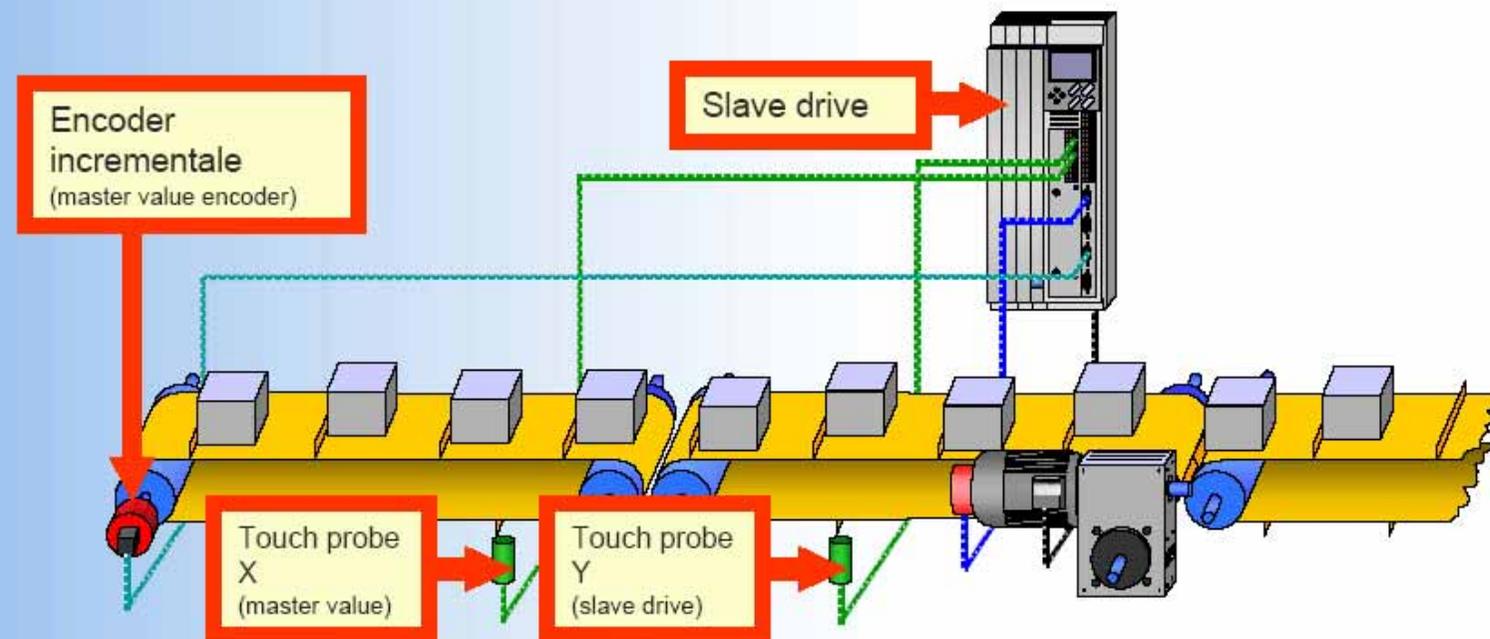
# Struttura albero elettrico

Il controllo della posizione angolare di ciascun motore è la chiave di volta dell'albero elettrico. Ciò consente la connessione tra i segnali di setpoint e la posizione dell'albero motore.



# Selezione del segnale di frequenza master

1. Trasmissione di velocità master da encoder incrementale (o da segnale elettrico equivalente, es. frequenza motore master), in aggiunta correzione su segnale touch probe per i motori master e slave



# Comparazione tra albero elettrico e meccanico

## Albero meccanico

- Connessione rigida => basso rischio di collisione
- Conveniente se non si necessitano modifiche
- Funzionamento semplice (intuitivo)
- Il cambio prodotto/formato è un'operazione onerosa

## Albero elettrico

- Limitati costi di aggiornamento
- Alta flessibilità, sono possibili rapidi cambi di prodotto o formato
- Essendo gli accoppiamenti, le riduzioni e gli alberi tutti virtuali, non sono presenti momenti di inerzia e frizioni aggiuntivi
- Messa in fase iniziale (è richiesto movimento di homing)



# Azionamenti elettrici

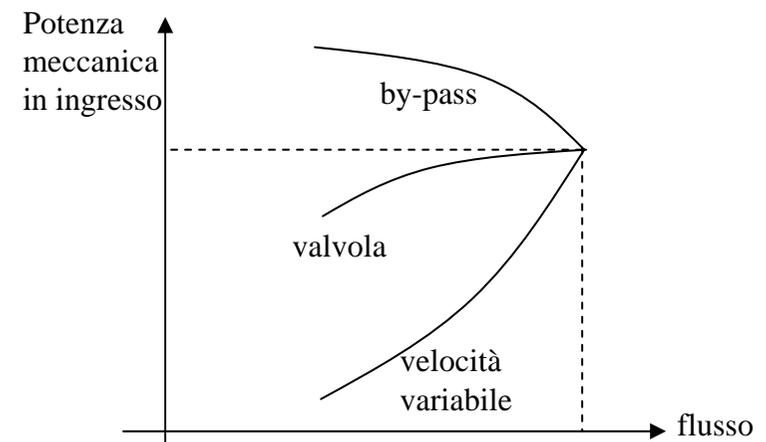
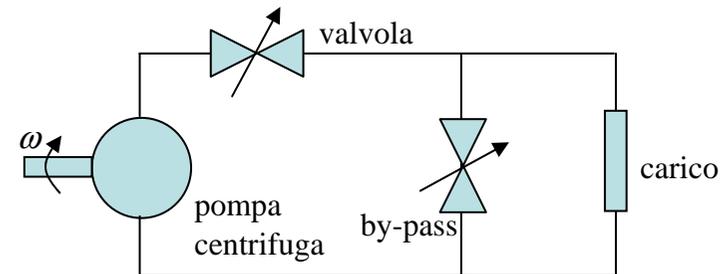
## **Definizione di azionamento elettrico a velocità controllata (V. norma CEI C.642)**

Sistema che converte energia elettrica in meccanica, con l'uso di apparecchiature elettroniche di potenza, in accordo con una funzione di comando (e secondo un programma definito)

### Vantaggi degli azionamenti elettrici:

- sono disponibili in intervalli di potenza che vanno da  $10^{-6}$  W (*orologi elettronici*) a più di  $10^8$  W (*impianti di pompaggio di sistemi di accumulo idro-energetico*);
- coprono un intervallo molto ampio sia in erogazione di coppia ( $>10^7$  Nm -industrie siderurgiche) che di velocità ( $>10^5$  rpm nelle centrifughe);
- possono lavorare anche in condizioni operative critiche;
- emettono basso rumore;
- hanno elevati rendimenti;
- hanno bassi consumi quando lavorano senza carico;
- sono facilmente controllabili;
- .....

Esempio  
regolazione del flusso di un liquido mediante pompa centrifuga

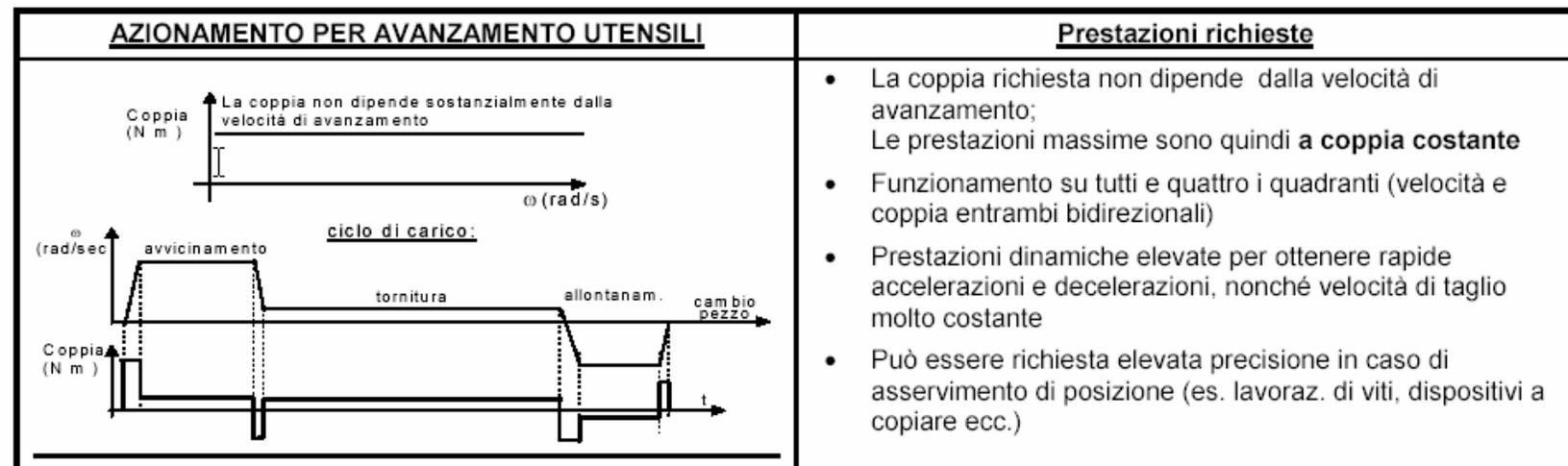
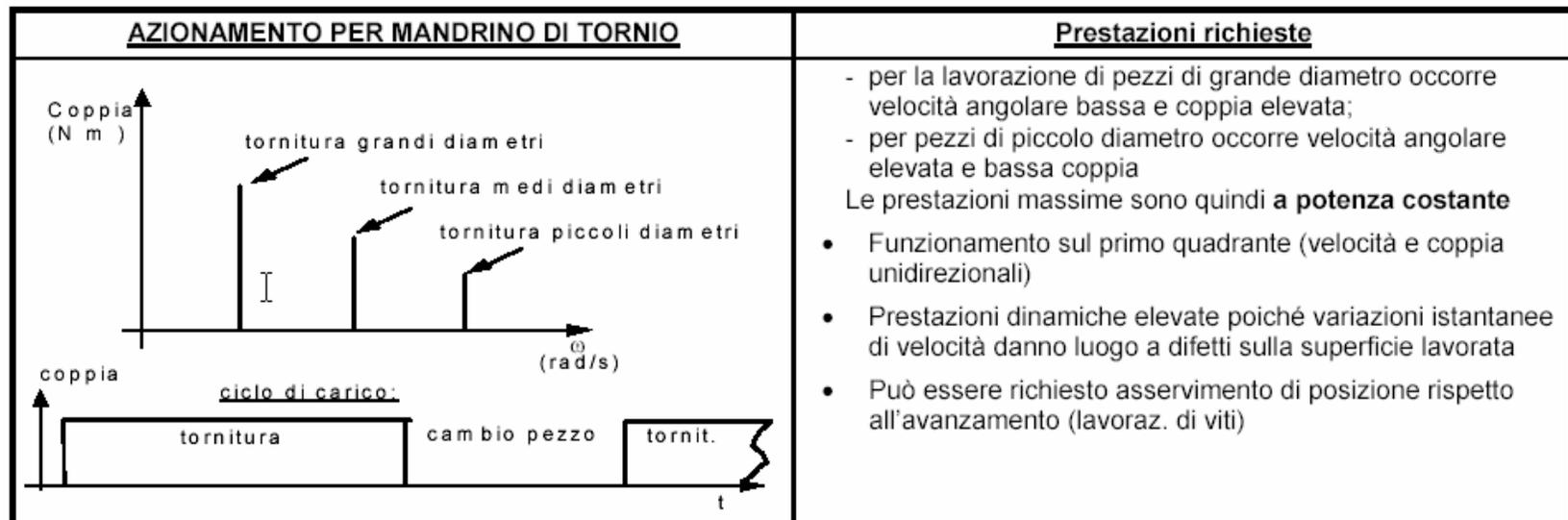


Applicazione	potenza (kW) (valori tipici)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veicoli a trazione elettrica (ferroviari, metropolitani, tramviari, funicolari, auto elettrica); funivie, seggiovie ecc..</li> </ul>	20 - 4000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manipolazione materiali: Sollevamento (gru, montacarichi, ascensori); Convogliatori, nastri trasportatori, ecc.</li> </ul>	5 - 100
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentazione fluidi: pompe, ventilatori.</li> </ul>	2 - 20 - 1000 e oltre
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macchine utensili: azionamento mandrini, azionamento avanzamenti.</li> </ul>	3 - 200 0.5 - 5
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Siderurgia: laminatoi reversibili, laminatoi continui, linee di trattamento, ecc.</li> </ul>	300 - 10.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macchine operatrici in genere: macchine per la lavorazione del legno, del vetro, del cemento, ecc. ecc.</li> </ul>	5 - 200
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Servomeccanismi (robotica, brandeggio di armi, puntamento radar ecc.</li> </ul>	0.5 - 100

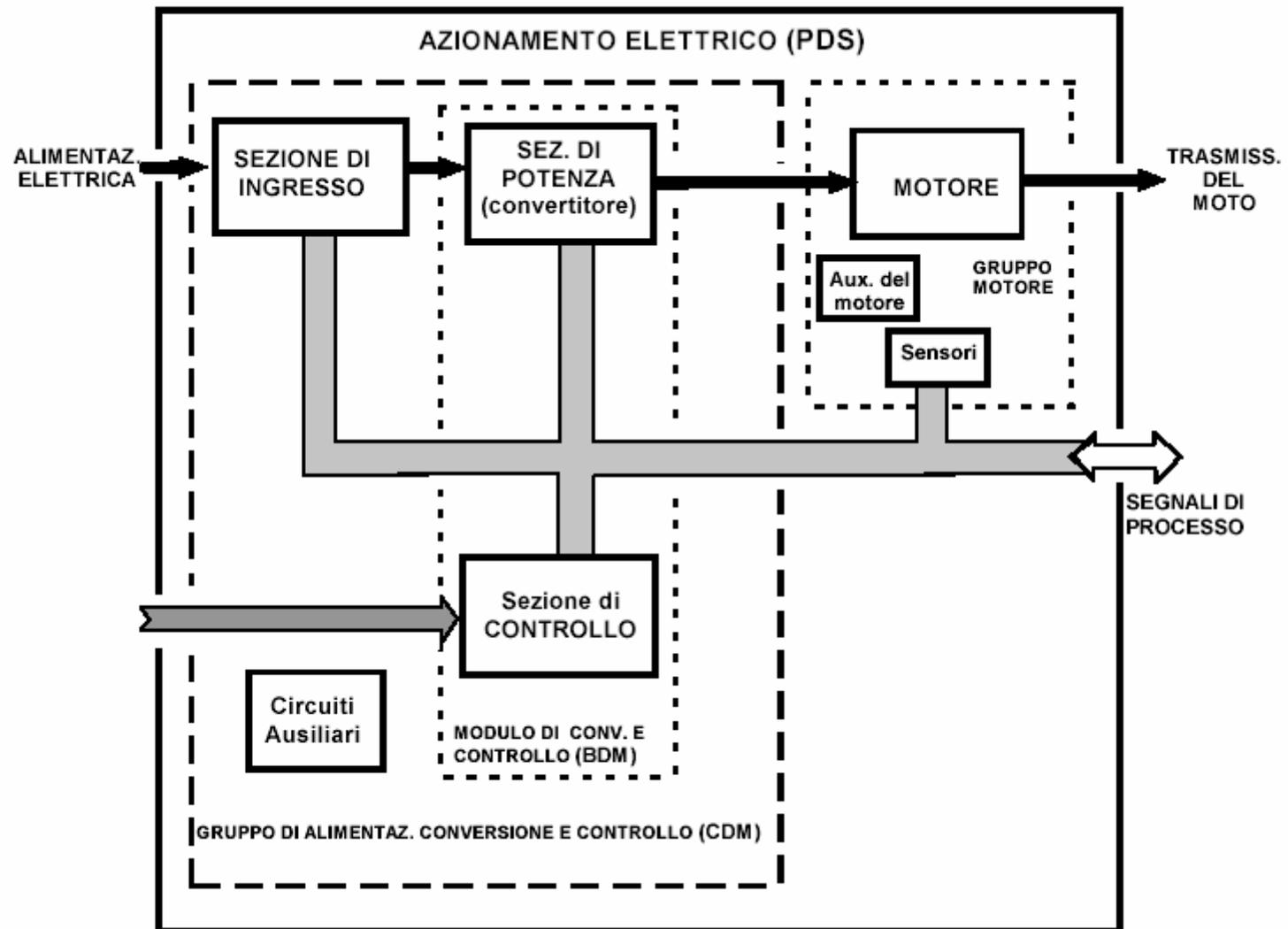
## Le caratteristiche del carico

L'azionamento deve essere dimensionato in rapporto alle caratteristiche del carico. Oltre alla potenza e alla velocità massima, è necessario conoscere:

- La caratteristica meccanica del carico (relazione tra velocità e coppia assorbita)
- La esigenza di reversibilità (velocità unidirezionale o bidirezionale; coppia motrice o frenante (ovvero funzionamento su uno, due tre o quattro quadranti)
- Il ciclo di carico (carico costante, elevata coppia di spunto, carico soggetto a punte intervallate da periodi di basso carico ecc.)
- Le prestazioni statiche (precisione) e dinamiche (rapidità di risposta)



AZIONAMENTO PER GRU	Prestazioni richieste
<p>The diagram illustrates the torque and speed profiles for a crane drive. The top graph shows torque (Coppia) in N·m versus speed (<math>\omega</math>) in rad/s. It features a step function where torque is negative during descent (Discesa) and positive during ascent (Salita). The bottom graph shows a complete cycle: Salita (constant speed), arresto (stop), discesa (constant speed), accostam. (deceleration), and arresto (stop). The speed profile (<math>\omega</math> in rad/sec) shows a trapezoidal shape with constant speed segments and linear acceleration/deceleration segments.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La coppia richiesta dipende poco dalla velocità di sollevamento, ma dal peso sollevato; Le prestazioni massime sono quindi <b>a potenza costante</b></li> <li>• Funzionamento sul primo e quarto quadrante (velocità bidirezionale, coppia unidirezionale)</li> <li>• Prestazioni dinamiche elevate per ottenere posizionamento preciso in fase di accostamento</li> </ul>
AZIONAMENTO PER POMPA	Prestazioni richieste
<p>The diagram shows the torque and speed profiles for a pump drive. The graph plots torque (Coppia) in N·m against speed (<math>\omega</math>) in rad/s, showing a curve that increases quadratically with speed. Below the graph, the cycle is labeled 'CARICO CONTINUO'.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la coppia richiesta è approssimativamente proporzionale al quadrato della velocità; Le prestazioni massime sono quindi <b>a coppia crescente</b></li> <li>• Funzionamento unidirezionale</li> <li>• Prestazioni dinamiche limitate (non occorre né precisione spinta, né rapida risposta)</li> <li>• E' richiesto alto rendimento (funzionam. per 24 h/24)</li> </ul>
VEICOLO ELETTRICO (diagramma di marcia)	Prestazioni richieste
<p>The diagram illustrates the torque and speed profiles for an electric vehicle drive. The top graph shows speed (<math>\omega</math>) in rad/sec versus time (t). It is divided into three phases: Acceleraz. (acceleration), Marcia (cruise), and Frenatura (braking). The speed profile shows a trapezoidal shape with constant speed in the cruise phase. The bottom graph shows torque (Coppia) in N·m versus time (t). It shows a step function where torque is positive during acceleration and braking, and negative during braking. Labels 'potenza cost' and 'Coppia cost' are present in the acceleration and cruise phases.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevata inerzia del carico. E' opportuno disporre della massima coppia possibile ad ogni velocità.</li> <li>• La coppia deve invertirsi in frenatura (funzionamento sul primo e quarto quadrante)</li> <li>• Prestazioni dinamiche limitate in velocità (non occorre alta precisione spinta, né rapida risposta), prestazioni spinte in coppia per controllo accelerazione</li> <li>• E' richiesto alto rendimento (nei veicoli a batteria)</li> </ul>



## L'Azionamento Elettrico Completo (Power Drive System -PDS) comprende:

a) un gruppo di alimentazione, conversione e controllo (Complete Drive Module - CDM), che a sua volta è costituito da:

a1 - la sezione di ingresso (interruttore, trasformatore (eventuali))

a2 - il modulo di conversione e controllo (Basic Drive Module - BDM), a sua volta costituito da:

a2.1 - la "Sezione di potenza" costituita dal convertitore elettronico di potenza vero e proprio,

a2.2 - la "sezione di controllo", costituita dall'insieme dei dispositivi che svolgono tutte le funzioni di controllo dell'azionamento (pilotaggio valvole, regolazione statica e dinamica, diagnostica, protezione, interfaccia con il processo)

a2.3 - i circuiti ausiliari necessari per il corretto funzionamento dell'insieme (ventilazione, interblocchi di sicurezza ecc.)

b) un gruppo motore, che comprende:

b1 - il motore

b2 - i sensori (velocità, posizione)

b3 - le protezioni e gli ausiliari del motore

## Classificazione degli azionamenti

### In funzione del moto:

- azionamenti a moto rotatorio (o circolare)
- azionamenti a moto lineare (o rettilineo)
- azionamenti a moto composto (rotatorio+lineare)

Oppure:

- azionamenti a moto continuo (asincroni, sincroni, corrente continua)
- azionamenti a moto incrementale (motori passo-passo)

Oppure:

- azionamenti unidirezionali
- azionamenti bidirezionali

### Con riferimento al tipo di controllo:

- azionamenti a catena aperta
- azionamenti a catena chiusa

### Con riferimento al tipo di alimentazione:

- azionamenti in corrente continua
- azionamenti in corrente alternata

## Motori impiegabili negli azionamenti a velocità controllata

Tipo di motore	• Tipo di convertitore	Pro e contro
Motore in corrente continua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raddrizzatore a commutazione naturale (se alimentato da rete c.a.)</li> <li>• Chopper (se alimentato da rete c.c.)</li> </ul>	<p><u>Vantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lunga esperienza operativa; funzionamento intuitivo</li> <li>• Convertitore semplice; recupero energia in rete</li> </ul> <p><u>Svantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevato costo e peso del motore</li> <li>• Limiti alle prestazioni dovute alla presenza del collettore a lamelle (limiti sulla velocità massima, sulla sovraccaricabilità transitoria e sulla estensione del funzionamento a campo indebolito)</li> <li>• Necessità di manutenzione al collettore</li> <li>• Basso fattore di potenza (se alimentato da raddrizzatore a commutaz. naturale)</li> </ul>
Motore a induzione	<p>Se alimentato da rete in corrente continua:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convertitore c.c.-c.a. a tensione impressa</li> </ul> <p>Se alimentato da rete in c.a.:</p>	<p><u>Vantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande semplicità e basso costo del motore.</li> <li>• controlli digitali a microprocessori, consentono oggi una grande versatilità di impiego</li> </ul> <p><u>Svantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Funzionamento poco intuitivo</li> </ul>
Motori sincroni a Magneti Permanenti (detti anche "Brushless a campo rotante")	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Raddrizzatore senza parzializzazione + convertitore c.c.-c.a. a tensione impressa</li> </ol> <p>oppure</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Cicloconvertitore</li> </ol>	<p><u>Vantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• controlli digitali a microprocessori, con grande versatilità di impiego</li> <li>• Assenza di perdite nell'indotto</li> <li>• Basso momento di inerzia</li> </ul> <p><u>Svantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motore più costoso (rispetto al motore asincrono)</li> </ul>
Motori a Riluttanza Variabile (a campo rotante)	<p>oppure</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3. Convertitore c.c.-c.a. alimentato da raddrizzatore reversibile a fattore di potenza unitario</li> </ol>	<p><u>Vantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• controlli digitali a microprocessori, con grande versatilità di impiego</li> <li>• Assenza di perdite nell'indotto</li> </ul> <p><u>Svantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sovradimensionamento dell'alimentatore</li> </ul>
Motori a Riluttanza variabile a commutazione di poli (detti anche "switched reluctance")	Alimentatore a transistor, commutante in funzione dell'angolo di rotazione del motore	<p><u>Vantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Assenza di perdite nell'indotto</li> <li>• funzionamento più intuitivo</li> </ul> <p><u>Svantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rumore e vibrazioni</li> <li>• Motore speciale</li> </ul>
Motori a c.c. a magneti permanenti con commutatore elettronico (detti anche "Brushless ad avvolgimento trapezio")	Alimentatore a transistor, commutante in funzione dell'angolo di rotazione del motore	<p><u>Vantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ha sostituito con vantaggio i motori in corrente continua per circa un decennio</li> <li>• Semplice ed intuitivo</li> </ul> <p><u>Svantaggi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non si presta a indebolimento di campo.</li> <li>• Attualmente è stato soppiantato dai brushless a campo rotante</li> </ul>