

# I MOTORI PASSO PASSO

fonte <http://www.motorepassopasso.com>

Non fa scienza, / senza lo ritenere, avere inteso - Dante (Paradiso, V, 41-42)

## Cosa sono

Il motore passo passo o stepper motor è una particolare tipologia di motore sincrono, i primi modelli di motori passo passo risalgono all'inizio degli 20 e come la maggior parte delle tecnologie, hanno trovato il primo impiego nel campo militare.

Inizialmente furono concepiti con l'obbiettivo di ottenere motori economici pilotabili in posizione anche senza l'utilizzo di controllori complessi e sensori e di retroazione.

La diffusione di questa tipologia di motori è avvenuta negli anni settanta grazie all'introduzione sul mercato dei componenti elettronici dei primi controllori digitali, che hanno consentito di realizzare la sequenza di pilotaggio in modo semplice ed economico.

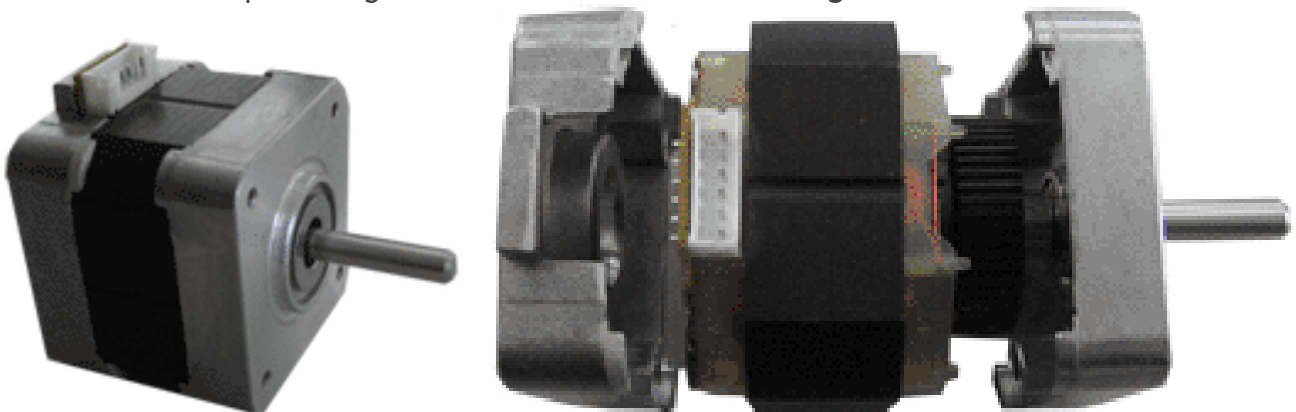
Esistono tre famiglie di motori passo passo:

- a riluttanza variabile
- a magneti permanenti
- ibridi

I motori passo passo ibridi sono in assoluto i più diffusi, mentre le altre famiglie stanno via via scomparendo, perciò in questa trattazione con il termine "motore passo passo " ci si riferirà sempre alla tipologia ibrida.

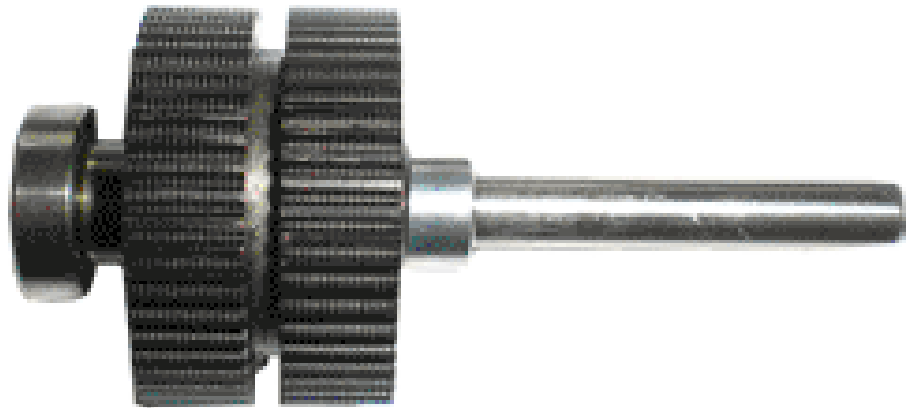
## Come sono fatti

I motori passo passo sono costituiti come ogni macchina elettrica rotante da una parte magnetica esterna detta "statore" ed una parte magnetica interna detta rotore vedi **figura 1**



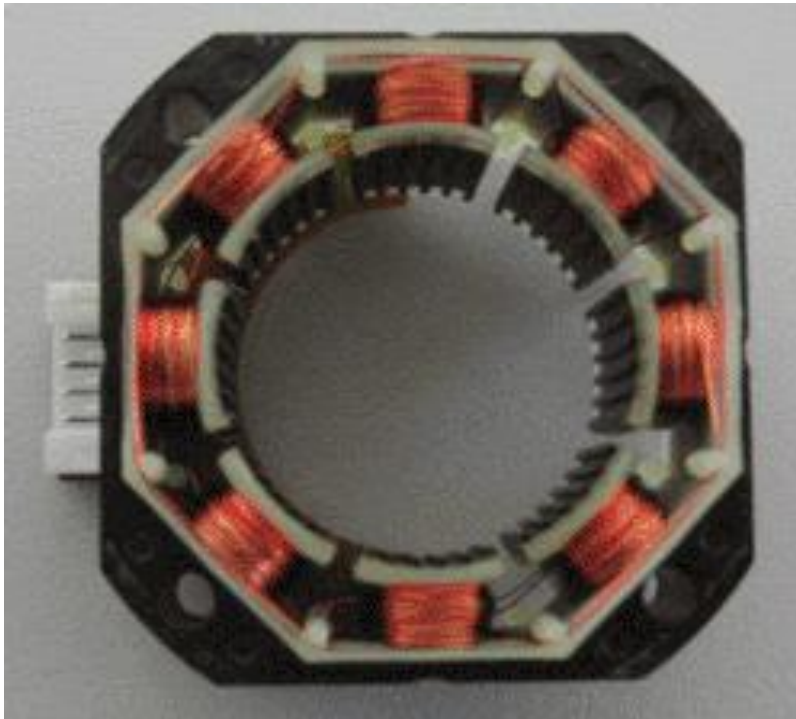
*Figura 1: Rotore e statore di un motore passo passo*

Il rotore è formato da due corone con espansioni polari dentate poste agli estremi di un cilindro contenente magneti permanenti, quindi una corona è polarizzata Nord mentre l'altra Sud.



*Figura 2: rotore di un passo passo nema 17*

Lo statore è una struttura a forma di parallelepipedo con delle cave su cui sono avvolti i fili di rame che formano gli avvolgimenti. Anche sullo statore sono presenti alcune espansioni polari dotate di denti con lo stesso passo di quelle del rotore.



*Figura 3: statore di un motore passo passo*

L'albero in acciaio è impacchettato nella struttura magnetica rotorica, il movimento rotatorio è consentito da due cuscinetti a sfere montati sulla flangia anteriore e posteriore del motore.

# Dove vengono usati

Nel campo consumer si possono trovare motori passo passo di piccole dimensioni su stampanti, scanner o plotter o per la movimentazione di telecamere di videosorveglianza. Vengono utilizzati anche nell'automazione per ufficio ad esempio nei lettori di banconote o assegni.

In ambito industriale si trovano motori passo passo per la movimentazione di guide lineari, per il controllo di macchine etichettatrici, sulle macchine CNC, sui telai tessili, nella stampa flexografica ed anche negli impianti fotovoltaici per l'orientamento dei pannelli solari al fine di ottimizzare la resa dell'impianto.

Il motore passo-passo è l'ideale in quelle applicazioni in cui si deve realizzare un posizionamento preciso oppure in cui si vuole mantenere il carico fermo in posizione senza vibrazioni.

In passato il motore passo passo veniva principalmente scelto per quelle applicazioni in cui le prestazioni richieste in termini di precisione e fluidità di movimento non erano così elevate da giustificare l'utilizzo di un brushless ac con resolver and inverter dai costi decisamente elevati rispetto ad un azionamento stepper.

Oggi grazie all'implementazione di algoritmi di controllo sempre migliori, è possibile ottenere prestazioni di qualità pari ed in alcuni casi superiore ad un brushless ac, tramite un motore passo passo. Lo stato dell'arte è rappresentato dal controllo stepless, realizzato tramite l'utilizzo di un encoder incrementale ed azionamenti digitali che rendono il motore passo passo un vero e proprio servo motore con il controllo di coppia, velocità e posizione. (Maggiori dettagli si trovano nella sezione "Motore passo passo con controllo di coppia" di questo sito)

Per acquistare la soluzione adatta per le vostre esigenze affidatevi alla qualità delle aziende italiane che garantiscono competenza ed assistenza. Le sezioni e-commerce interne al sito aziendale sono la scelta da fare per avere un prodotto performante e garantito.

## Corrente nominale

La corrente nominale rappresenta la massima corrente **costante** che può circolare negli avvolgimenti a motore fermo senza che il motore si riscaldi portando la temperatura degli avvolgimenti oltre il valore massimo indicato dalla classe di isolamento.

Alcune considerazioni pratiche:

1) Nulla vieta di sovralimentare il motore con una corrente superiore alla corrente nominale, salvo restando che il **duty cycle** (ciclo di funzionamento) dovrà essere sufficientemente breve da evitarne l'eccessivo surriscaldamento o la smagnetizzazione dei magneti compromettendone le prestazioni.

1) La maggioranza dei motori passo passo ibridi hanno **classe di isolamento B. (Temperatura massima= 130 °C sugli avvolgimenti)**. Chiaramente il corpo motore avrà sempre una temperatura inferiore rispetto agli avvolgimenti interni, è bene quindi evitare che il corpo motore superi i 70-80 °C, per evitare di comprometterne definitivamente le funzionalità.

# Induttanza di avvolgimento

L'induttanza di fase è espressa in mH (milli-Henry) e dipende dal numero di spire dello statore, dalla geometria dello stesso e dai materiali ferromagnetici impiegati.

L'induttanza di fase si oppone alla variazione di corrente che opera l'azionamento per ottenere la rotazione del motore ed è una delle cause che genera la riduzione della coppia erogata dal motore all'aumentare della velocità.

In tabella sono riportate le regole per il calcolo dell'induttanza di avvolgimento a partire dal valore unipolare solitamente espresso nei cataloghi dei costruttori, in funzione del tipo collegamento delle fasi,

Collegamento	Induttanza
Bipolare serie	Valore_Unipolare x 4
Bipolare Parallelo	Valore_unipolare

Misurazione sperimentale:

tramite l'**eq. 5** è possibile calcolare l'induttanza caratterizzante un motore, conoscendone la Resistenza  $R$ , e misurando con un oscilloscopio il tempo  $t$  che impiega la corrente circolante nel motore a passare da un valore  $I_1$  ad  $I_2$  imposti esternamente

$$L = \frac{R t}{\ln \left( \frac{I_1}{I_2} \right)}$$

**eq.5)**

ln è l'operazione di logaritmo naturale.

# Resistenza di avvolgimento

Il valore della resistenza di avvolgimento dipende dal numero di spire di cui è composto, questo parametro condiziona il riscaldamento del motore durante il funzionamento.

Le perdite di potenza in termini di effetto joule sono date da:

$$eq. 1 ) P_j = R I^2$$

L'ipotesi di progetto dei motori passo passo impone di lavorare a parità di perdite nel rame con le medesime dimensioni del motore, quindi i costruttori, per motori a resistenza maggiore forniscono un dato di corrente nominale minore e viceversa.

Dall'**eq. 1** si capisce perchè il collegamento serie in cui  $R$  è maggiore è utile in quelle applicazioni in cui il duty cycle è elevato ed è quindi importante limitare il riscaldamento del motore a discapito però della coppia massima erogata dal motore che risulta proporzionale alla corrente circolante negli avvolgimenti **eq.2**.

$$eq.3) Coppia = K_t I$$

In cui  $K_t$  è la costante di coppia del motore

In tabella sono riportate le regole per il calcolo della resistenza di avvolgimento a partire dal valore unipolare solitamente espresso nei cataloghi dei costruttori, in funzione del tipo collegamento delle fasi.

Collegamento	Resistenza
Bipolare serie	Valore_Unipolare x 4
Bipolare Parallelo	Valore_unipolare

### Considerazioni pratiche:

All'umentare della temperatura degli avvolgimenti la resistenza aumenta leggermente *eq.3*

$$eq.3) R_{T1} = R \left( \frac{250 + T1}{265} \right)$$

Dove  $R_{T1}$  è la resistenza alla temperatura T1  
mentre  $R$  è la resistenza fornita dal costruttore

Quindi, considerando che la coppia del motore è proporzionale alla corrente che circola negli avvolgimenti *eq.2*, bisogna tenere presente che a pari tensione la corrente circolante sarà minore (a pari tensione di alimentazione) quando il motore si riscalderà.

$$eq.4) I = \frac{V}{R}$$

Per applicazioni in cui il motore è dimensionato senza il giusto margine, può succedere che dopo qualche minuto di funzionamento, scaldandosi, esso non abbia più la coppia necessaria per compiere il movimento richiesto.

## Collegamento Serie/Parallelo

I motori passo passo sono motori sincroni a 2 fasi, tuttavia sul mercato vengono distribuiti motori uscenti a 4 o 8 fili.

Il motivo è spiegato nella figura 1,

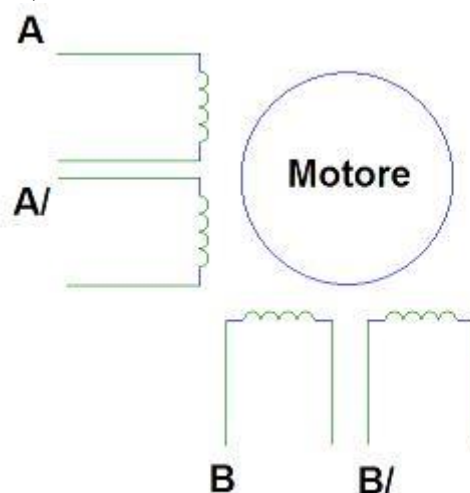
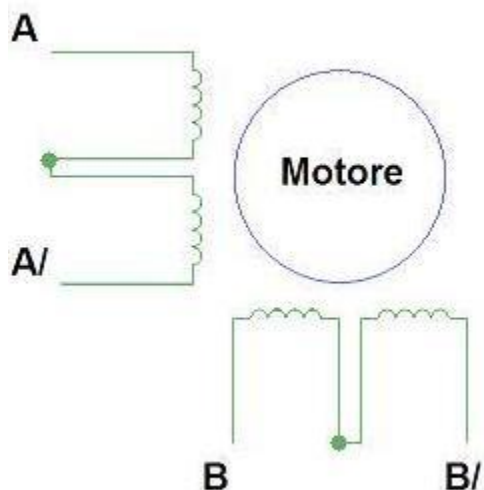


Figura 1: Avvolgimento di un motore passo passo a 8 Fili

Ogni fase è composta da due avvolgimenti A-A/ e B-B/, questi avvolgimenti possono essere collegati in serie o parallelo a seconda dell'applicazione.

## Collegamento serie



## Collegamento parallelo

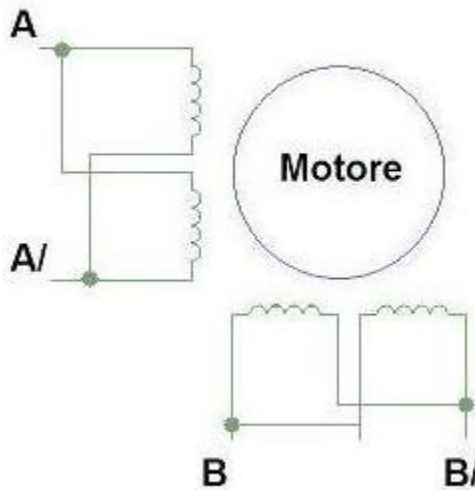


Figura 2: Avvolgimento serie e parallelo di un motore passo passo 8 fili

I motori a 4 fili hanno semplicemente le fasi collegate internamente dal costruttore mentre quelli a 8 fili lasciano la libertà all'utilizzatore.

Ecco come cambiano le grandezze elettriche in funzione del collegamento delle fasi:

	Unipolare	Serie	Parallelo
Corrente	$I$	$I/1,41$	$I \times 1,41$
Resistenza	$R$	$2 \times R$	$R/2$
Induttanza	$L$	$4 \times L$	$L$

La scelta del tipo di collegamento come detto dipende dall'applicazione:

Volendo controllare il motore a basse velocità fino a 400/500 RPM con un elevato duty cycle è preferibile un collegamento serie, il quale ha lo svantaggio di far decrescere più velocemente la coppia del motore all'aumentare della velocità ma allo stesso tempo riduce il riscaldamento facendo circolare una corrente minore negli avvolgimenti.

Il collegamento in parallelo permette maggiori prestazioni in termini di coppia erogata al crescere della velocità ma ne fa aumentare notevolmente il riscaldamento.

## Coppia statica (Holding torque)

La coppia statica (Holding torque) è la coppia che il motore eroga quando è alimentato con la sua corrente nominale a velocità nulla (motore fermo).

Per chi è abituato a trattare i motori brushless può considerare l'holding torque come l'analogo della coppia di spunto per BLAC, infatti considerato che per via della back emf la coppia decresce

all'aumentare della velocità, l'holding torque rappresenta anche la massima coppia di un motore passo passo.

l'holding torque è anche il parametro con cui tipicamente si inizia ad effettuare la selezione di un motore piuttosto che un altro.

## Coppia di tenuta (Detent torque)

Anche se non alimentato, il motore è in grado di erogare una coppia all'albero per via della sua struttura elettromagnetica. Il valore massimo della coppia applicabile all'albero senza che esso cambi posizione a motore non alimentato è definito come coppia di tenuta.

Il valore della detent torque è molto inferiore rispetto all'holding torque tipicamente meno di 1/20.

## Inerzia rotorica

L'inerzia è un parametro che quantifica la tendenza dell'albero motore a mantenere la sua velocità. In altre parole maggiore sarà l'inerzia del motore e più difficile sarà accelerare o decelerare velocemente in motore.

Il valore dell'inerzia gioca un ruolo chiave anche nel dimensionamento del motore, esso infatti condiziona le frequenze di risonanza meccaniche del sistema carico+ motore e se il rapporto:

$$\frac{\text{Inerzia\_Carico}}{\text{Inerzia\_Motore}} \leq 10$$

Il sistema può diventare instabile impedendo al motore di muovere il carico anche se la sua coppia sarebbe sufficiente.

Qualora non si trovasse un motore con la sufficiente inerzia da garantire il rapporto inerziale minimo, è possibile utilizzare un riduttore di giri tra il motore e il carico.

Infatti il rapporto d'inerzia tra motore e carico con il quadrato del rapporto di riduzione N interposto tra albero motore e carico.

$$\frac{\text{Inerzia\_Carico}}{\text{Inerzia\_Motore} \times N^2} \leq 10$$

## Micropasso

Con il termine "micropasso(microstep)" si identifica una tecnica diffusa di pilotaggio dei motori passo passo che consente di posizionare il rotore in una posizione intermedia rispetto al passo intero. I motori ibridi a 50 poli hanno una risoluzione a passo pieno di 200 steps/giro quindi una risoluzione 1.8°; attraverso il micropasso è possibile ottenere risoluzioni fino a 1/256 di passo pieno quindi una risoluzione massima fino a 0,007°. Questo dato indica la risoluzione del posizionamento e non la sua precisione che

invece dipende dalla precisione elettromeccanica con cui un motore è costruito e rimane quella indicata nelle specifiche del motore (5% per motori ibridi di buona qualità).

Oltre ad aumentarne la risoluzione il pilotaggio con micropasso migliora le prestazioni del motore in termini di vibrazioni e rumorosità del motore.

## Taglie Nema

Un vantaggio importante dei motori passo passo che semplifica il lavoro dei progettisti meccanici, è lo standard di riferimento Nema seguito da tutti i principali produttori di motori.

Lo standard Nema identifica la dimensione della flangia anteriore del motore espresso in pollici, ad esempio un motore Nema 17 avrà una flangia di 1.7 " ( 42 mm).

Le principali taglie di motori in commercio sono taglia Nema 10 , Nema 14 , Nema 17, Nema 23, Nema 34, Nema 42.



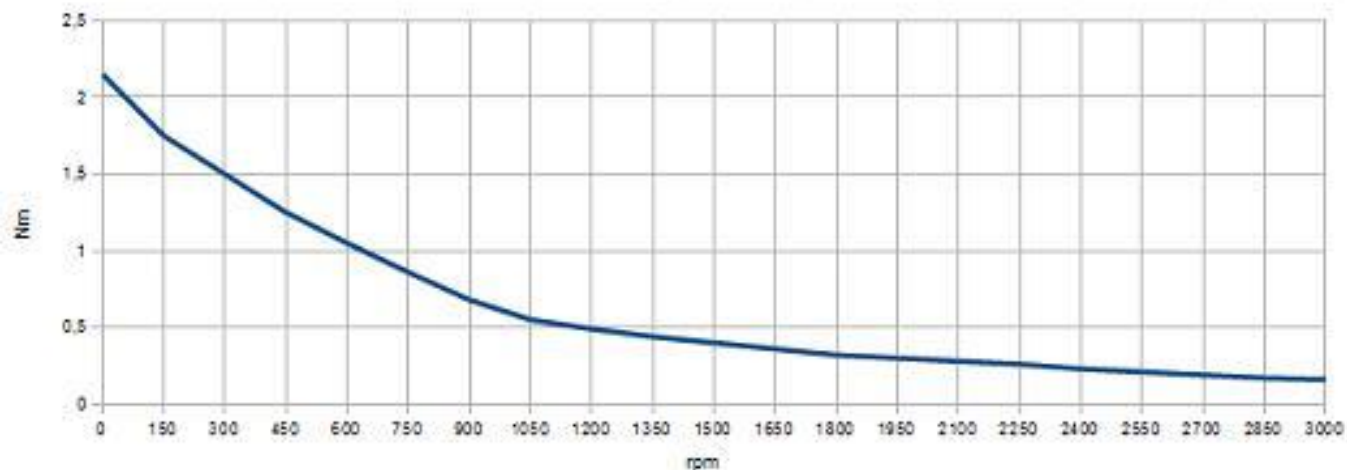
La lunghezza del motore (da cui dipende dalla massima coppia erogata) invece non segue uno standard ben definito, tuttavia essendo legata al numero di "stack" presenti sul rotore le variazioni da costruttore a costruttore sono minime.

## Scelta del motore

Il dimensionamento è la una parte fondamentale per qualunque progettista di macchine automatiche. Esistono diversi metodi il calcolo del dimensionamento di un motore passo passo, l'esperienza gioca comunque un ruolo importante e se si è alle prime armi è meglio consultarsi con chi ha maggiore domestichezza (alcune società offrono un servizio gratuito di dimensionamento; a titolo di esempio ne segnalo una sicuramente valida tramite questo [link](#))

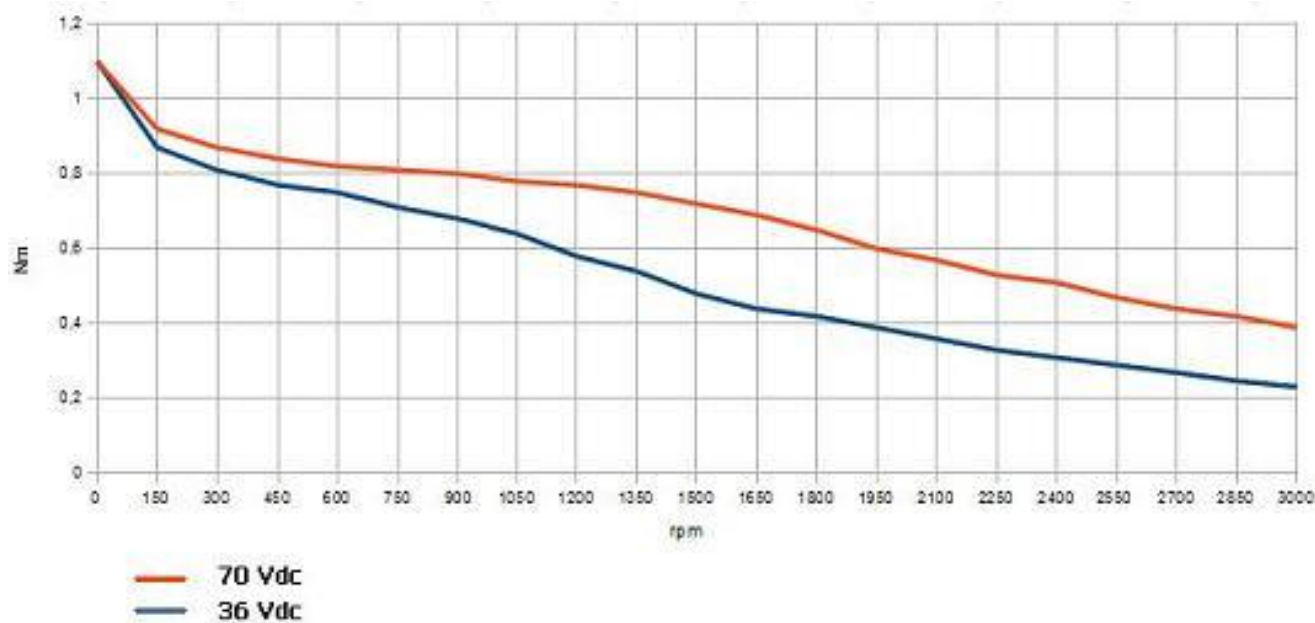


I motori passo passo sono in grado di funzionare fino a velocità di 3000 rpm, la coppia erogata dal motore decresce all'aumentare della velocità con andamento tipicamente simile a quello riportato in **figura**



La tensione con cui si alimenta il drive che controlla il motore condiziona la pendenza con cui la coppia erogata dal motore decresce in funzione della velocità

In figura vengono riportate le differenti curve di coppia dello stesso motore Nema 23 a due diverse tensioni di alimentazione.



Il punto di partenza per il dimensionamento è il calcolo della coppia resistente che motore dovrà superare, è buona regola porsi nel caso peggiore e considerare un 30% di margine. Individuata in prima battuta la taglia Nema in base alla coppia che il motore deve erogare bisogna verificare che il rapporto di inerzia tra il motore e il carico non superi 1:10. Questo evita problemi di risonanza meccanica che potrebbero impedire al motore la gestione del carico.

In ultimo è importante considerare il duty cycle dell'applicazione per evitare problemi di eccessivo riscaldamento che comprometterebbero la durata massima della vita del motore.

# Perdita del passo

Il motore passo passo fa parte della famiglia di motori elettrici sincroni senza spazzole, quindi la rotazione dell'albero richiede che il campo magnetico del rotore e quello generato dalla corrente circolante negli avvolgimenti dello statore siano sempre sincroni.

La "perdita del passo" è un termine che comunemente descrive lo stallo del motore comandato in anello aperto senza cioè il controllo di coppia dovuto alla perdita di sincronizzazione tra il campo elettromagnetico di statore e il rotore.

E' importante marcare il fatto che la possibile "perdita del passo" non è una caratteristica intrinseca del motore passo passo, ma legata alla possibilità di comandare questo tipo di motore anche senza retroazione, cioè senza un sensore di posizione dell'albero motore e un'elettronica che ne controlli la coppia vettorialmente.

Negli ultimi 10 anni il motore passo passo è stato riscoperto come motore sincrono cioè con la possibilità di essere comandato in anello chiuso analogamente ai servo motori brushless, utilizzando un encoder incrementale per la chiusura dell'anello di posizione, velocità e coppia.

## Controllo di coppia

Come ogni motore sincrono anche il motore passo passo può essere comandato in anello chiuso (servo azionamenti), regolando la corrente in maniera opportuna e conoscendo la reale posizione dell'albero motore tramite un encoder calettato all'albero posteriore del motore.



**Azionamento e motore passo passo con controllo di coppia**



**Motore passo passo con controllo di coppia e elettronica integrata**

*Figura 1 : azionamenti in anello chiuso di velocità , posizione e coppia*

Bisogna innanzitutto distinguere tra i veri azionamenti in grado di comandare il motore in **anello chiuso di coppia** consistente nella regolazione della corrente con **cicli di poche decine di millisecondi**, rispetto a molti dispositivi presenti sul mercato che si limitano a chiudere il **loop di posizione** pilotando il motore in anello aperto e verificando **solo alla fine del movimento** la reale posizione dell'albero motore apportando eventuali correzioni.

In pratica il controllo in anello chiuso di base sullo schema riportato in figura 2 e permette all'azionamento di erogare solo la **minima corrente** necessaria al motore per eseguire il profilo di velocità richiesto con un minore riscaldamento del motore, minori vibrazioni, minor rumore meccanico e senza la possibilità di perdere il passo. Grazie a questa modalità di controllo l'eventuale aumento della coppia resistente del carico durante il movimento viene compensato da un aumento della corrente nel motore recuperando così istantaneamente l'errore di posizione accumulato.

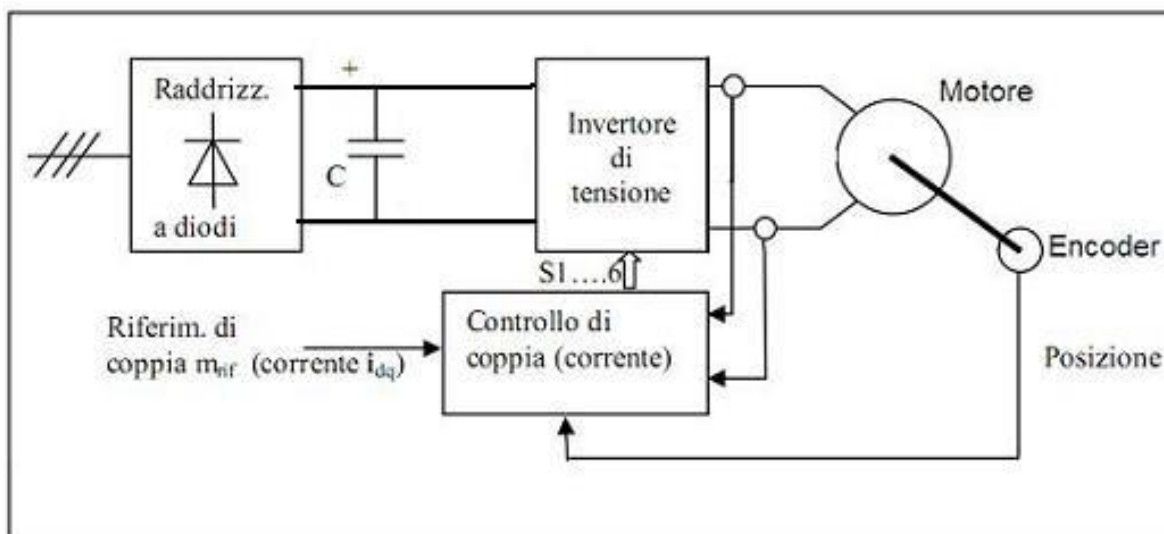


Figura 2: Schema di principio di un azionamento ad anello chiuso

Alcune considerazioni importanti:

- 1) La curva di coppia del motore passo passo non cambia con il pilotaggio in anello chiuso e mantiene un andamento decrescente con l'aumentare della velocità.
- 2) Limitando il riscaldamento del motore, il pilotaggio in anello chiuso permette al motore passo passo di eseguire movimenti con un duty cycle molto elevato rendendo possibile l'utilizzo del motore passo passo anche in applicazioni a ciclo continuo.
- 3) Il controllo di coppia consente dei movimenti in albero elettrico o camma elettronica molto precisi anche in presenza di carichi ad inerzia variabile.

## Motore passo passo vs Brushless

Come spiegato nelle precedenti sezioni del sito, sia il motore passo passo che il brushless sono due motori sincroni, le cui differenze principali risiedono nel numero di poli e nel numero di fasi. Tuttavia a causa della possibilità di essere pilotati anche in maniera "semplice" si è diffusa storicamente l'idea del passo passo come motore di serie B utilizzabile solo in applicazioni in cui non sono richieste alte prestazioni in termini di precisione; al contrario i brushless sono divenuti nel tempo la soluzione di riferimento tra i progettisti di macchine automatiche grazie alle elevate prestazioni date da convertitori

sempre più sofisticati e a riduttori epicicloidali sempre più precisi, con l'unico svantaggio dell'elevato costo.



Oggi soprattutto per ragioni economiche si sta riscoprendo il motore passo passo e il rivalutando il utilizzo anche con controllo di coppia in applicazioni che erano prerogativa dei servo azionamenti brushless.

Fatta questa premessa mettiamo a confronto le caratteristiche delle due tipologie di motori:

Motore passo passo: potenza massima 1 kW ,holding torque massima 30 Nm (per motori ibridi standard) velocità massima 3000 rpm, precisione senza riduttore 5%(sulla risoluzione a microstep), dimensioni comuni tra tutti i costruttori secondo standard Nema, costo per un motore + elettronica da 1kW circa 350\* euro

Motore brushless ac: potenza massima maggiore di 10 kW, velocità fino a 10000 rpm, precisione elevata alla velocità nominale ma necessita di un riduttore per mantenere la precisione a velocità inferiori da quella nominale, dimensioni diverse tra i vari costruttori, costo per un sistema da 1 kW circa 550\* euro. (\* i prezzi sono solo indicativi della media di prodotti sul mercato)

In definitiva è consigliabile valutare l'utilizzo del passo passo in quelle applicazioni in cui le velocità in gioco non sono elevate(<3000 rpm), eventualmente abbinati ad azionamenti in anello chiuso laddove siano necessarie prestazioni elevate in termini di duty cycle, riscaldamento massimo e dinamica del movimento, oppure con l'utilizzo di un riduttore se si vogliono realizzare posizionamenti con una precisione < 0,05° .

## Scelta dell'azionamento

Dal punto di vista elettrico la scelta dell'azionamento va attuata basandosi sulla corrente nominale e sulle prestazioni riferite alla curva di coppia che si vogliono ottenere dal motore. La curva di coppia di un passo passo infatti, oltre a essere misurata sperimentalmente a corrente nominale, deve specificare a

quale tensione sono state eseguite le misure; maggiore sarà la tensione minore sarà il decadimento della coppia all'aumentare della velocità.

Una volta scelto il range di potenza dell'azionamento è importante sapere che sul mercato esistono le seguenti tipologie di azionamenti, differenti per metodologie di controllo e prestazioni:

TIPOLOGIA	PRESTAZIONI
<p><b>Clock e direzione</b></p>	<p>Sono ancora oggi la tipologia di drive più diffusa. Il loro funzionamento avviene tramite un plc in grado di generare tramite due uscite digitali un segnale a sequenza di impulsi la cui frequenza definisce la velocità di rotazione, oltre al numero di step di avanzamento ed un segnale alto o basso che fornisce al drive la direzione in cui eseguire il movimento. Il limite di questa tipologia di azionamenti è per lo più dato dalla capacità del plc di generare una sequenza di impulsi precisa. Con questa tipologia di controllo risulta complesso sincronizzare in modo preciso il movimento di due o più motori.</p>
<p><b>Riferimento analogico</b></p>	<p>Questi azionamenti vengono controllati tramite l'ingresso analogico di cui sono dotati. Il segnale analogico di riferimento può essere generato da un plc oppure più semplicemente da un potenziometro; la velocità di rotazione è proporzionale al valore della tensione di ingresso. Quasi sempre in aggiunta viene utilizzato anche un ingresso digitale per definire la direzione di rotazione del motore. Il limite di questa tipologia dipende dalla risoluzione dell'ingresso analogico che definisce il numero di livelli di velocità, motivo per cui il loro utilizzo è indicato in applicazioni in cui non è richiesta una precisione elevatissima.</p>
<p><b>Bus di campo</b></p>	<p>Questi azionamenti vengono controllati tramite <b>bus di campo</b>; i più diffusi sono: <i>MODBUS, CANBUS, PROFIBUS ed ETHERCAT</i>. Un master (PLC, PC, HMI ecc) invia tramite bus di campo il comando da eseguire verso l'azionamento. Questa tipologia di azionamenti è ben indicata per l'integrazione in reti multiasse o complesse. Una soluzione a bus di campo presenta una maggiore robustezza ai disturbi e può ottenere prestazioni più elevate rispetto ad una realizzata mediante azionamenti clock e direzione. Inoltre il costo maggiore sostenuto inizialmente viene spesso giustificato da una riduzione dei cablaggi e del tempo di assemblaggio/manutenzione della macchina.</p>
<p><b>Programmabili</b></p>	<p>Sono azionamenti intelligenti e programmabili da pc tramite porta seriale o usb ed un Editor di software specifico. Questi azionamenti sono dotati di ingressi e uscite digitali/analogiche e bus di campo a disposizione dell'utente, e possono funzionare anche senza un plc esterno controllando tutte le funzionalità di macchina. Spesso vengono utilizzati in aggiunta ad un plc con il compito di semplificare la funzione del master, il quale può ad esempio limitarsi a fornire istruzioni, via I/O digitali o bus di campo, per l'avvio di un ciclo predefinito nell'azionamento.</p>

Sono azionamenti consigliabili per applicazioni di medio/bassa complessità in modalità stand alone (senza controllore esterno) consentendo un risparmio in termini di riduzione dei cablaggi e risparmio di componenti. Possono essere molto utili in macchine complesse per semplificare il lavoro dei programmatori rendendo facile l'eventuale sostituzione di un modello di Plc con un altro.