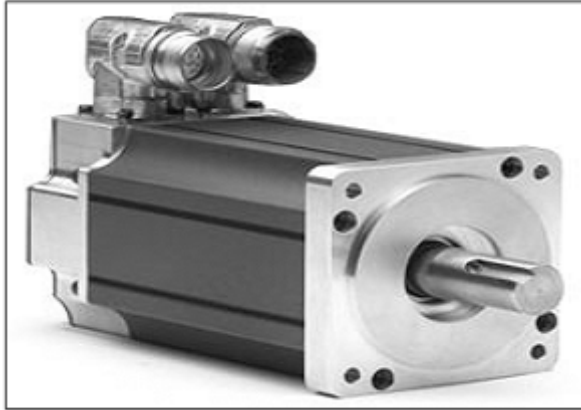


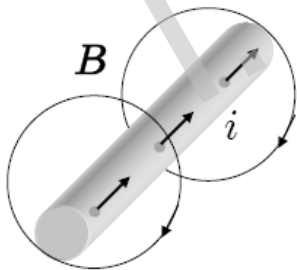
# Motori Elettrici



Legge di Lenz: se in un circuito elettrico il flusso concatenato varia nel tempo si genera una tensione

$$V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Legge di Biot-Savart: un conduttore percorso da corrente di intensità  $i$  genera un campo magnetico di intensità  $B$



$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

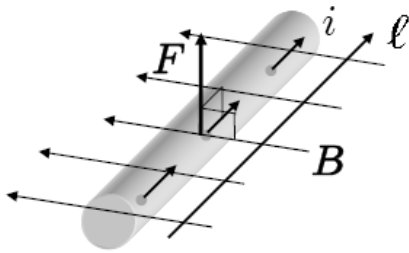
$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$$

permeabilità magnetica nel vuoto

$$\left( \underline{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r^2} \underline{s} \wedge \underline{r} \right)$$

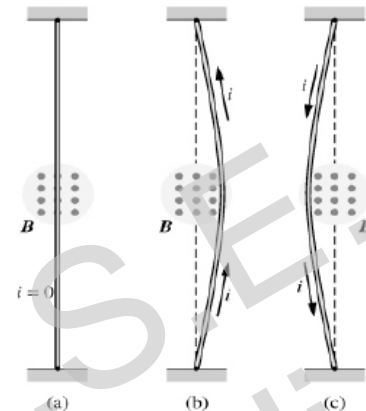
Unità di misura di  $B$  nel sistema SI  
tesla ( $T = N A^{-1} m^{-1}$ )

Legge di Faraday: una carica  $q$  in moto con velocità  $v$  e immersa in un campo magnetico di intensità  $B$  è sottoposta ad una forza  $\underline{F} = q\mathbf{v} \wedge \underline{B}$



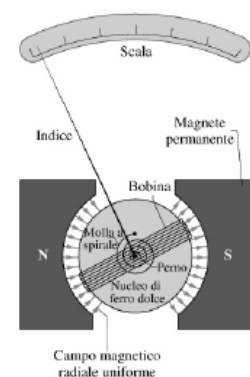
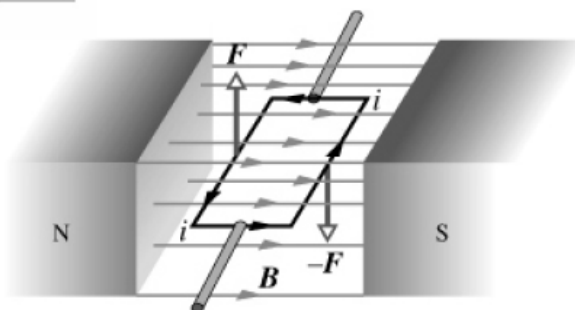
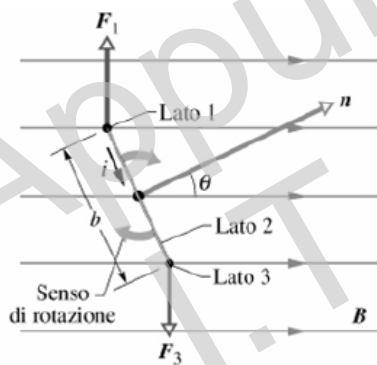
Un conduttore di lunghezza  $l$  percorso da corrente  $i$  e immerso in un campo magnetico di intensità  $B$  è sottoposto ad una forza  $\underline{F} = \underline{l}i \wedge \underline{B}$

Unità di misura di  $B$  nel sistema SI  
tesla ( $T = N A^{-1} m^{-1}$ )



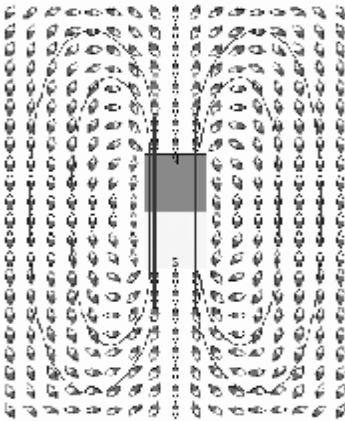
In particolare, una spira conduttrice di area  $A$  percorsa da corrente  $i$  e immersa in un campo magnetico di intensità  $B$  è sottoposto ad una coppia meccanica:

$$T = iAB \sin \theta$$



Il funzionamento dei motori elettrici si basa sempre sui fenomeni dell'elettromagnetismo e sull'interazione tra campi magnetici

## Magnetismo



I poli magnetici di due campi magnetici diversi tendono ad allinearsi N-S.

Poli opposti si attraggono



Poli uguali si respingono



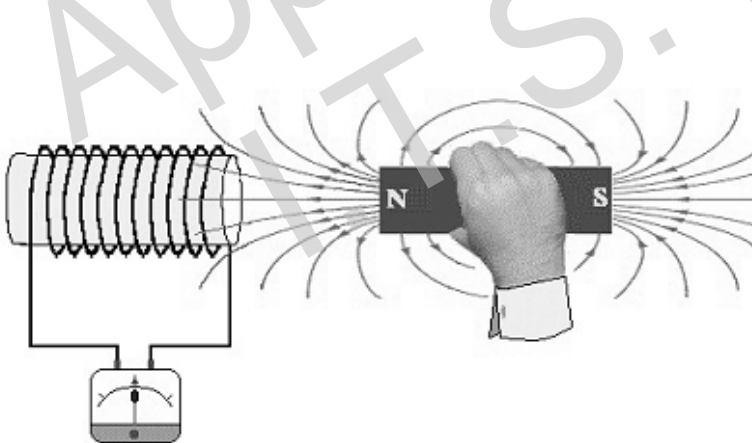
## Elettromagnetismo

Un conduttore elettrico percorso da corrente genera un campo magnetico

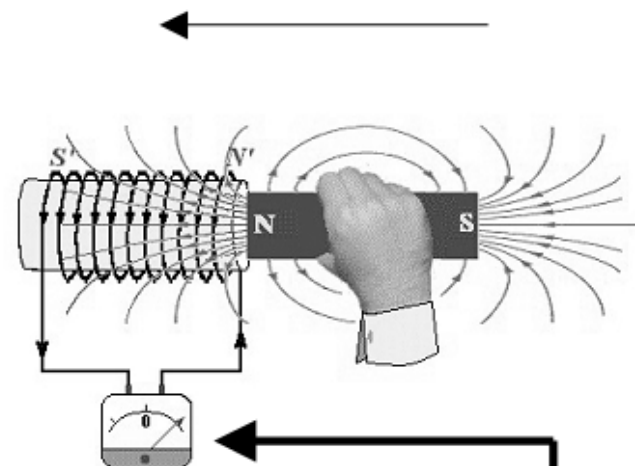
Se le linee di campo magnetico prodotto da un magnete vanno a tagliare dinamicamente un solenoide sul solenoide si genera corrente

- ∅ la corrente è più intensa quando la velocità di taglio è più rapida;
- ∅ il verso della corrente si inverte quando si inverte il senso del moto del magnete;
- ∅ la corrente cessa quando non vi è movimento fra magnete e solenoide

la corrente si manifesta purché ci sia un moto relativo fra magnete e solenoide ovvero quando si verifica, in qualsiasi modo, il taglio delle linee di flusso da parte del conduttore.



Condiz. Statiche:  
niente corrente



Condiz. dinamiche:  
generazione corrente

Facendo muovere un magnete vicino ad un solenoide (= insieme di spire di materiale conduttore), in esso si genera una corrente anche in assenza di un generatore elettrico

La corrente indotta nel solenoide è dovuta ad una *forza elettromotrice indotta* (f.e.m.i.), la cui causa è la variazione del flusso che si concatena col circuito indotto.

Tale variazione avviene comunque si manifestino

- le variazioni del flusso,
- le variazioni di posizione del conduttore, della spira o del solenoide, oppure una variazione di corrente del circuito induttore.

La f.e.m.i. produce a sua volta un passaggio di corrente indotta se il circuito indotto è chiuso, naturalmente (se è aperto vi è la f.e.m., ma non può circolare corrente).

La f.e.m.i. è tanto maggiore quanto maggiore è la variazione di flusso e quanto minore è l'intervallo di tempo in cui avviene la variazione.

Per quanto riguarda il verso della f.e.m.i. si può osservare quanto segue:

il passaggio di corrente indotta genera a sua volta un campo magnetico (polarità N' e S') che, per la legge di conservazione dell'energia, deve opporsi alla causa che l'ha generato, ovvero non potrà favorire lo spostamento, che è la causa del fenomeno in esame.

Quindi, quando il magnete permanente si avvicina, con il proprio NORD, il solenoide non può produrre sul lato affacciato un sud, altrimenti non servirebbe più esercitare lo sforzo di avvicinamento (in quanto il SUD attirerebbe il NORD del magnete, e quindi sarebbe agevolato lo spostamento. Invece si deve produrre un'azione che si opponga alla causa che l'ha generata). Nasce quindi una forza che contrasta il moto del magnete e quindi si manifesta un NORD.

Allo stesso modo, quando si allontana il magnete, la polarità indotta deve contrastare l'allontanamento e si crea un polo SUD.

Variando la posizione del magnete rispetto al solenoide, in sostanza quello che si fa è variare la quantità di flusso generato dal magnete che ha un'azione sul solenoide stesso --> variazione del flusso concatenato.

Per una variazione infinitesima di flusso concatenato  $\Phi$  che avviene in un intervallo di tempo  $dt$ , sul solenoide di  $N$  spire si genera una forza elettromotrice indotta pari a:

$$e_m = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Il segno negativo, introdotto da *Lenz*, sta a significare che *il verso della f.e.m.i. è tale da opporsi alla causa che l'ha prodotta. (per questo a volte è detta contro elettromotrice)*

Quindi la corrente indotta ha verso tale da produrre un campo magnetico indotto che contrasta il campo induttore, cioè che ne contrasta la variazione di flusso.

Nella figura precedente: quando il magnete si avvicina aumentano le linee di flusso che escono dal nord N e investono le spire indotte. L'aumento del flusso induttore (la

causa) deve essere contrastato e quindi il campo indotto dovrà avere verso opposto a quello che aumenta.

Nel caso di allontanamento del magnete, le spire sono interessate da una diminuzione del flusso: per contrastare la diminuzione delle linee che si stanno riducendo man mano di numero, il campo indotto dovrà avere verso tale da contrastarne la diminuzione. Ciò implica la produzione di linee con stesso verso del campo che si sta riducendo.

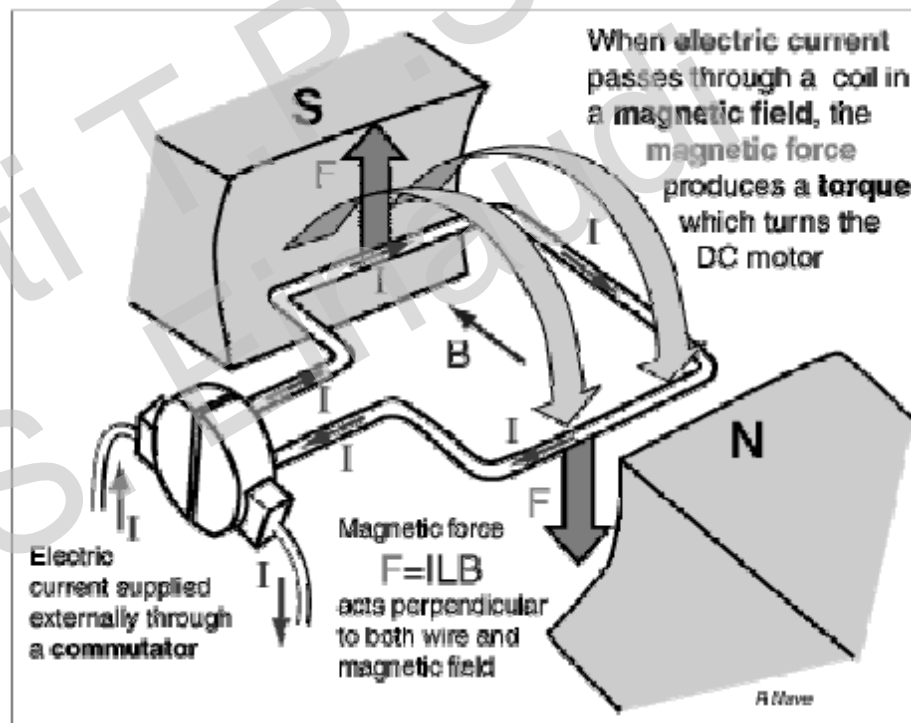
Ecco allora che la corrente indotta circolerà in modo da creare su quel lato un sud S'.

### Perché il motore si muove?

Il principio base del motore elettrico è quello di una spira percorsa da corrente e immersa in un campo magnetico costante: per la legge di Faraday, un conduttore elettrico rettilineo di lunghezza  $L$ , percorso dalla corrente  $i$ , immerso in un campo magnetico uniforme  $B$ , è sottoposto ad una forza  $f$  pari a  $f = L I \times B$  ( $\times$  = prodotto vettoriale)



Il verso della forza si determina con la regola pratica della 'mano sinistra', in cui l'indice è diretto secondo le linee di  $B$ , il medio secondo il verso della corrente  $I$ , il pollice definisce il verso della forza agente  $F$ .



oppure regola mano destra [ indice =  $I$ , medio =  $B$ ]

La stragrande maggioranza dei motori è di tipo ROTATIVO, e dunque è sempre formata da due parti:

- Ø Una fissa STATORE
- Ø Una rotante ROTORE

motore in corrente continua con statore a filo avvolto  
a magneti permanenti

*eccitazione indipendente*  
*eccitazione in parallelo*  
*eccitazione in serie*

brushless  
passo - passo

*magneti permanenti*  
*riluttanza magnetica*  
*ibridi*

motore in corrente alternata asincrono  
sincrono

Il primo motore che vedremo è il motore in corrente continua, detto anche MOTORE CC (Corrente Continua) o, all'inglese, DC MOTOR (Direct Current)

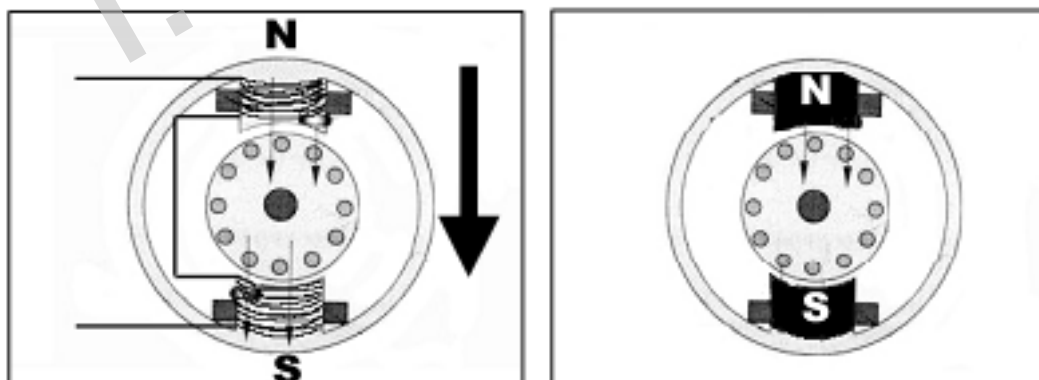
È un motore alimentato da una tensione continua.

Può essere brushed (cioè con le spazzole, in pratica a collettore) o brushless (cioè senza spazzole).

Solitamente è di taglie abbastanza piccole

**MOTORE DC BRUSHED (a collettore)**

- Ø Basa il suo funzionamento sui fenomeni di attrazione e repulsione di due campi magnetici
- Ø È costituito da uno statore che crea un campo magnetico costante (o con due avvolgimenti percorsi da corrente costante o da due magneti permanenti) e da un rotore con sopra degli avvolgimenti (spire)
- Ø Elettricamente è costituito da due circuiti:
  - uno detto di eccitazione, sullo statore
  - uno detto di armatura, sul rotore



Sullo statore ci sono due espansioni polari di ferro con degli avvolgimenti (=bobine) attorno, su cui scorre la corrente di eccitazione e si creano due poli magnetici, uno Nord e uno SUD

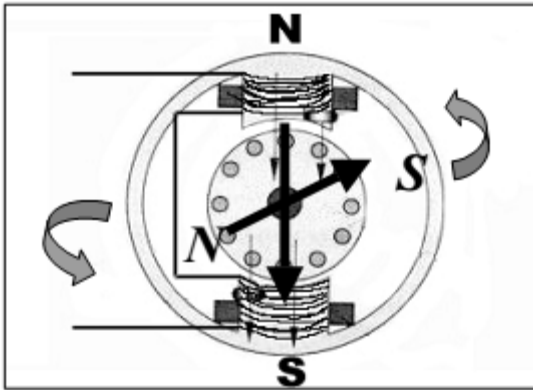


Il rotore è immerso nel campo magnetico creato dallo statore

Il rotore ha su di sé degli avvolgimenti in serie sui quali scorre la corrente di armatura  $\rightarrow$  si crea un altro campo magnetico, che tenta di allinearsi a quello generato dallo statore

Quindi nel motore ci sono:

- ∅ un campo magnetico di statore con direzione costante, creato dalla corrente di eccitazione
- ∅ un campo magnetico di rotore con direzione variabile a seconda dell'angolo di rotazione del rotore, creato dalla corrente di armatura



I due campi tendono ad allinearsi N-S  $\rightarrow$  Il rotore gira fino ad allineare i due campi  
Se fosse tutto qua, dopo la prima rotazione di allineamento, il rotore si fermerebbe  $\rightarrow$  il motore non si muoverebbe più.

In realtà il rotore ha più avvolgimenti, su di sé. Tali avvolgimenti prendono corrente dal collettore, tramite due spazzole. Il compito delle

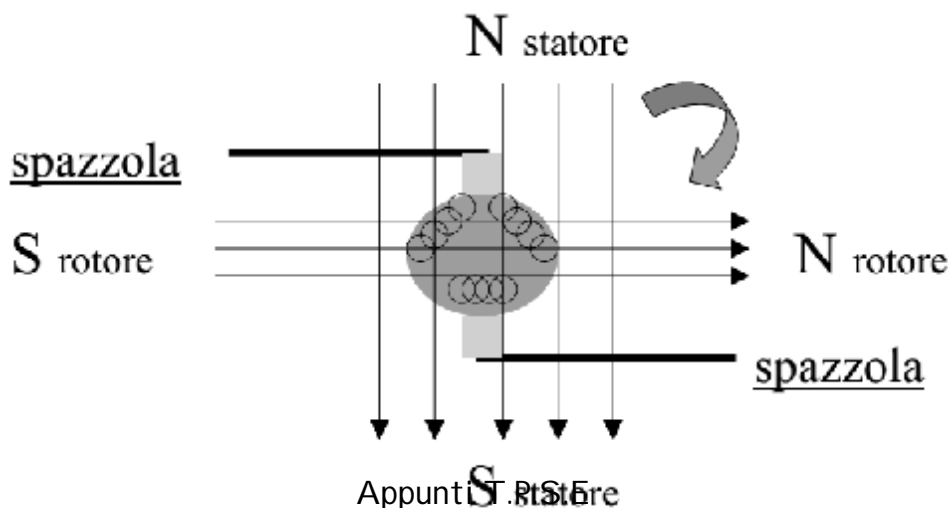
spazzole è di variare il senso della corrente negli avvolgimenti, per variare la polarità dei campi magnetici che si vengono a creare.

Siccome la direzione del campo magnetico è data dal verso della corrente, e ad ogni momento ci sono degli avvolgimenti che cambiano il verso di percorrenza della corrente

- ∅ il campo magnetico del rotore continua a cambiare  $\rightarrow$  è sempre non allineato con quello dello statore
- ∅ la rotazione continua

Il motore gira perché non c'è mai allineamento tra i due campi magnetici

Il sistema spazzole + collettore è quindi una sorta di COMMUTATORE MECCANICO la cui funzione è quella di far sì che il campo magnetico risultante del rotore sia sempre a  $90^\circ$  con quello fisso dello statore, in modo da innescare sempre la rotazione con la maggior forza possibile



La velocità di rotazione di questo motore dipende da:

- ∅ Tensione applicata.
- ∅ Corrente assorbita dal rotore.
- ∅ Carico applicato (coppia di carico)

### Motore DC con statore a filo avvolto

Se il comportamento magnetico dello statore è ottenuto per mezzo di due avvolgimenti percorsi da corrente, tale circuito abbiamo detto che si chiama di eccitazione.

In questo modo, rispetto ai magneti permanenti, si possono avere potenze maggiori (ma si dovrà spendere più energia anche per alimentare questo nuovo circuito).

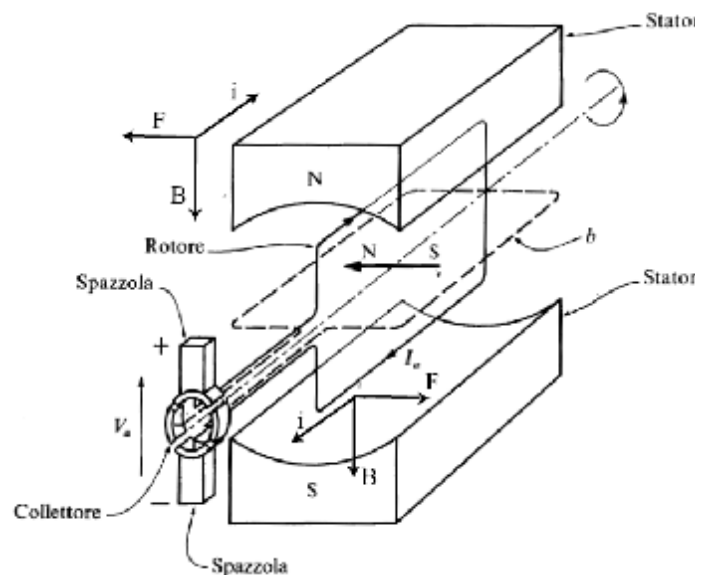
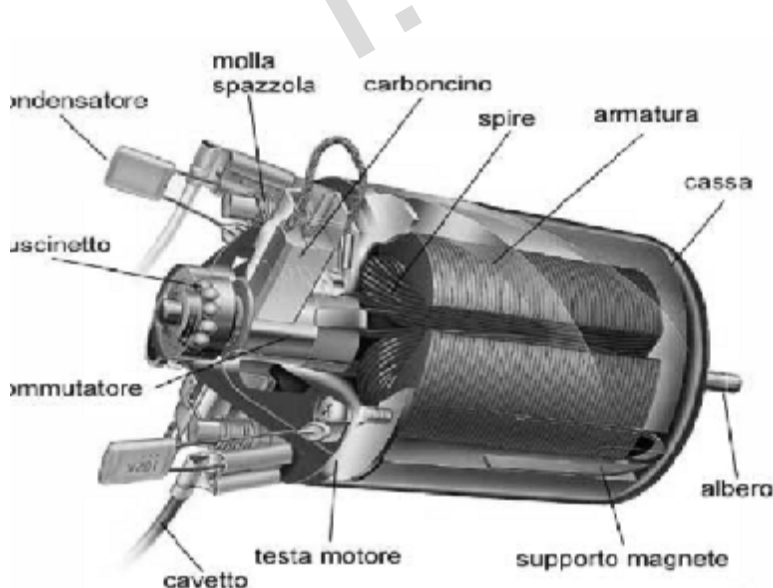
Si possono avere vari casi nell'alimentazione del circuito di statore:

- ∅ motore ad eccitazione indipendente: l'avvolgimento di statore è alimentato in maniera indipendente da quello di rotore. Si ha allora più flessibilità nel controllo dei parametri (coppia e velocità) del motore.
- ∅ motore ad eccitazione in parallelo: statore e rotore sono collegati in parallelo (coppia maggiore, minore velocità)
- ∅ motore ad eccitazione in serie: statore e rotore sono collegati in serie (coppia inferiore, maggiore velocità).

### Motore in corrente continua brushed a magneti permanenti

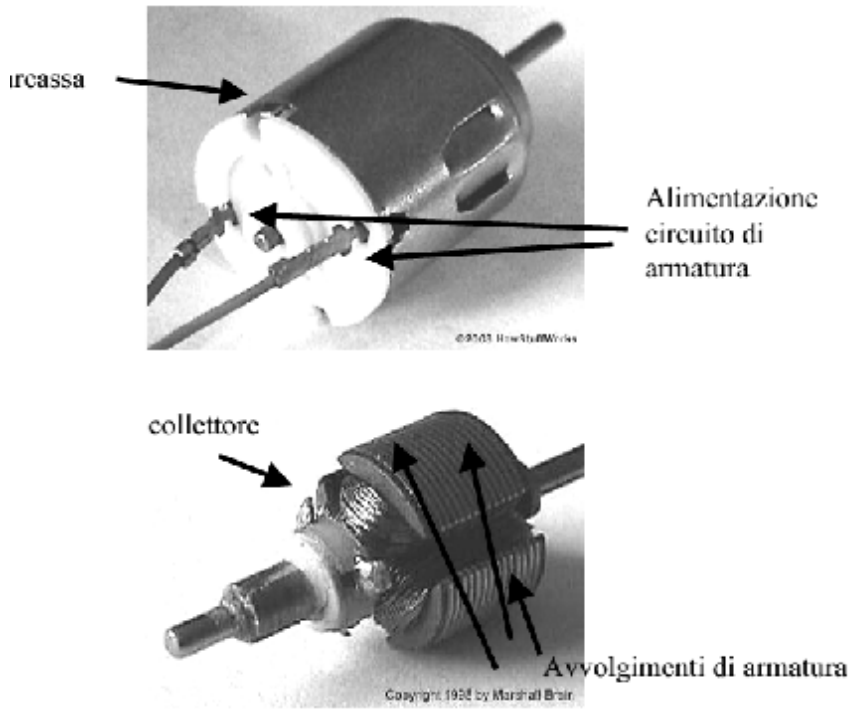
Invece che avere sullo statore due avvolgimenti percorsi da corrente che generano un campo magnetico...

Sullo statore ho due MAGNETI PERMANENTI → Non ho bisogno del circuito elettrico di eccitazione

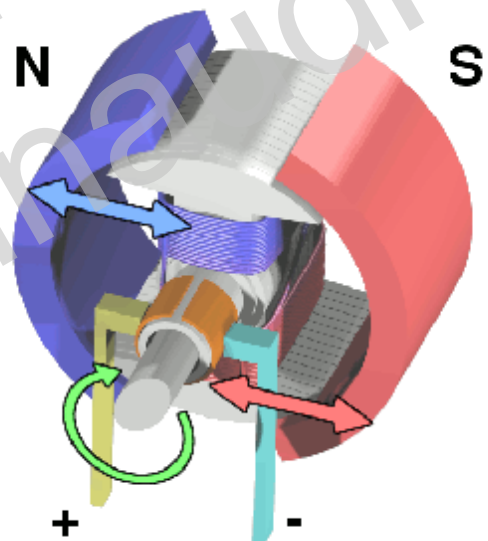
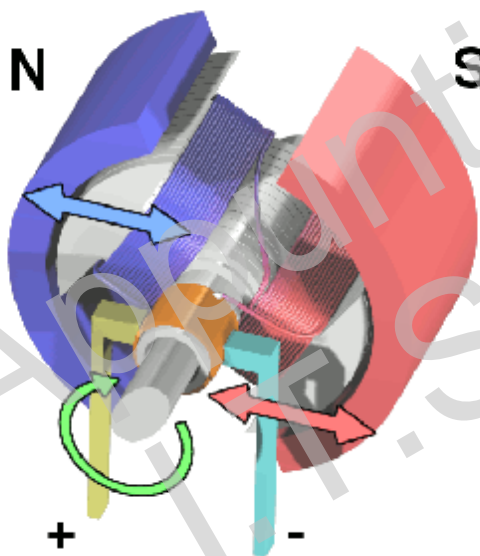
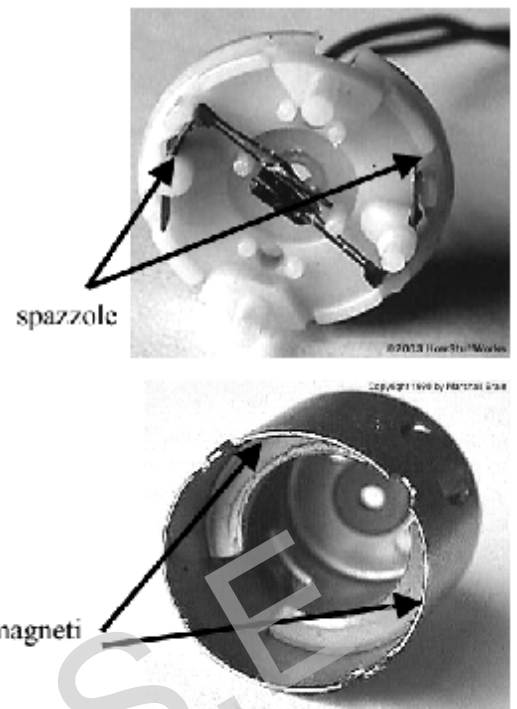




## ITS EINAUDI



## Montebelluna



Dato che questo tipo di motore può sviluppare una forte coppia a basse velocità di rotazione, è stato usato nella trazione elettrica, come, ad esempio, sulle locomotive. Il motore DC a magneti permanenti ha un comportamento reversibile: diventa un generatore di corrente continua (una dinamo) se si collega un altro motore all'albero. Si può allora prelevare l'energia elettrica prodotta collegandosi alle spazzole. (Da questo si può intuire la sua capacità di agire anche da freno: applicando tra le spazzole un resistore l'energia meccanica trasmessa all'albero si dissipa su questo resistore).

Riassumendo si può affermare che il motore DC ha tutte le funzioni necessarie per un mezzo mobile: oltre alla funzione di motore può recuperare l'energia funzionando da dinamo e, quando necessario, può servire da freno.

### Punti deboli del motore DC brushed (a collettore)

- Ø *L'esistenza del collettore*
- Ø *Gli avvolgimenti sul rotore*

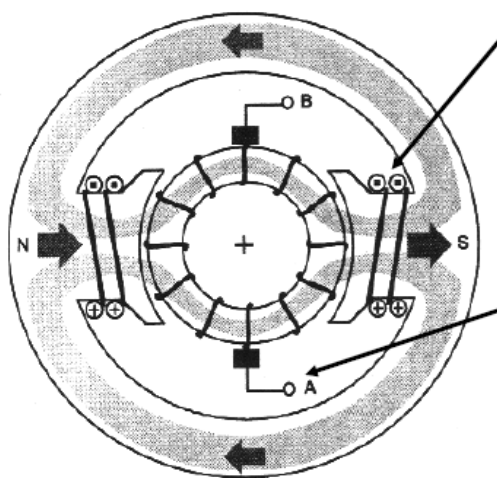
- Le spazzole sono in grafite. Questo consente un buon contatto elettrico minimizzando gli attriti, ma la loro usura richiede periodici interventi di manutenzione (d'altra parte è preferibile dover sostituire le spazzole che non l'intero collettore, operazione ovviamente molto più complessa).
- Le spazzole pongono un limite alla massima velocità di rotazione: maggiore è la velocità e più forte è la pressione che bisogna esercitare su di esse per mantenere un buon contatto. A velocità elevate non si realizza un buon contatto
- Tra spazzole e collettore, nei momenti di commutazione, si hanno transitori di apertura degli avvolgimenti induttivi e quindi scintillio (attenuabile con opportuni sistemi ma non eliminabile).
- Queste scintille comportano disturbi elettrici sia irradiati nell'ambiente circostante che trasmessi al generatore di tensione (che alimenta il motore); questi disturbi, in determinati settori di impiego, possono causare problemi di compatibilità elettromagnetica

La presenza di avvolgimenti elettrici sul rotore ha alcuni aspetti negativi:

- Se il motore è di grossa potenza si hanno dei problemi di smaltimento del calore (gli avvolgimenti si riscaldano per effetto Joule e il campo magnetico alternato nel nucleo del rotore genera altre perdite e quindi altro calore).
- Per avere una buona coppia, il rotore deve avere molti poli, (avvolgimenti/magneti), quindi deve avere un diametro consistente, i magneti che circondano il rotore devono essere grandi e quindi il motore avrà volume e peso considerevoli.
- Gli avvolgimenti appesantiscono il rotore (aumenta il momento d'inerzia): se il motore deve rispondere con rapidità e precisione (come avviene nelle automazioni industriali e nella robotica) il controllo diventa più complesso.

## Motore elettrico a collettore in corrente continua

Il motore elettrico in c.c. (*DC motor*) è costituito da uno **statore** (parte esterna e fissa) e da un **rotore** (posto all'interno e mobile).



Circuito di eccitazione (o di statore): alimentato in continua, genera il campo magnetico sulle espansioni polari, rivolte verso l'interno del motore. Può essere sostituito da un magnete permanente

Circuito di armatura (o di rotore): le spire formano un avvolgimento chiuso che a tratti ha tratti scoperti, che entrano in contatto elettrico con le spazzole attraverso le quali si fornisce potenza elettrica al motore

Il campo magnetico di eccitazione si **concatena** con quello di armatura, producendo una coppia che muove il rotore.

PRO: Facilità di regolazione (controllo in tensione di armatura o in tensione del circuito di eccitazione)

CONTRO:

- Perdite elettriche per cadute di tensione nel contatto spazzola-collettore
- Perdite meccaniche dovute ad attrito durante la commutazione
- Produzione di scintille durante la commutazione (dovuta ad autoinduzione)

## Motori brushless

Una tipologia di motori che risolve alcuni problemi dei motori DC a collettore è la categoria dei motori brushless (senza spazzole). I motori brushless possono essere:

- Brushless DC
- Brushless AC
- 

I motori brushless sono, rispetto ai motori a spazzole:

- più leggeri (oltre il 30 % di peso in meno)
- più efficienti (80-90% rispetto al 60-75% dei motori con spazzole)

Le ragioni dipendono dalla diversa concezione del motore

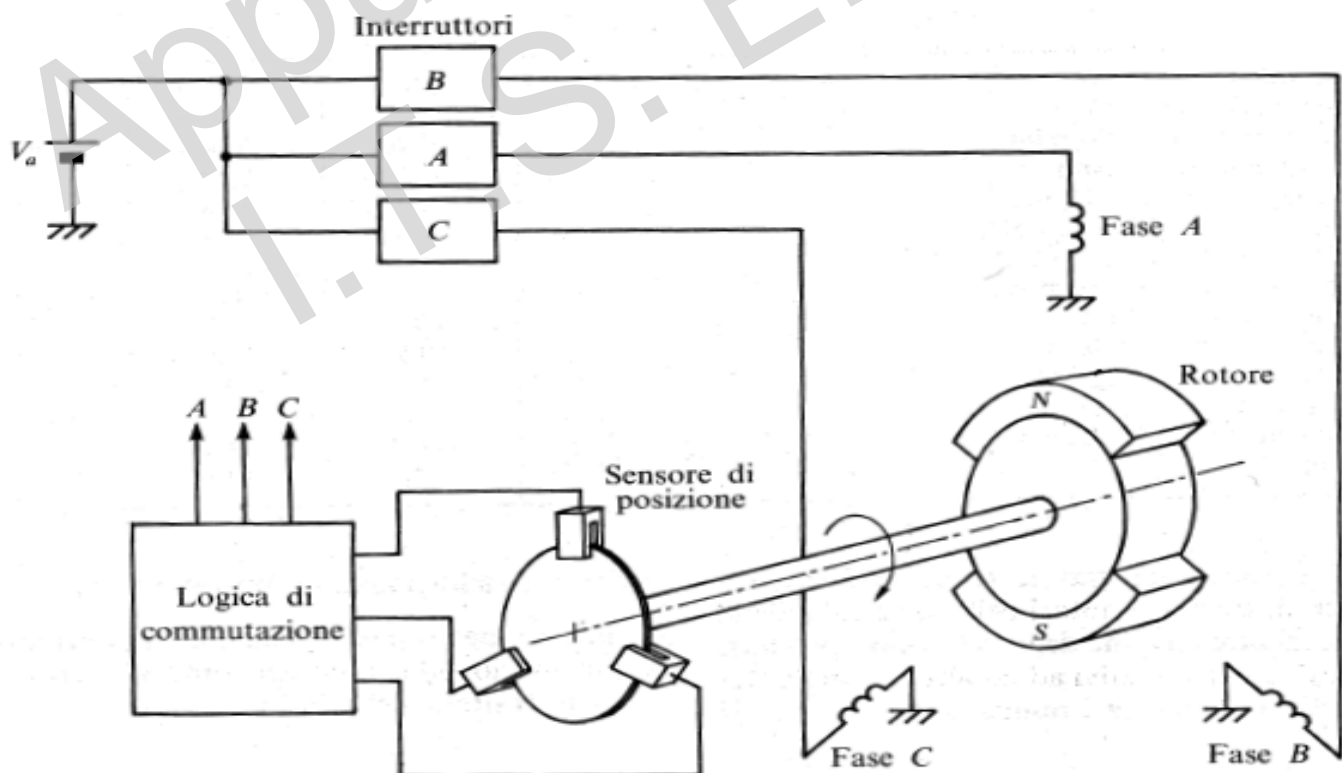
avvolgimenti fissi sullo statore  
magneti sul rotore

∅ scomparsa del commutatore meccanico

∅ la commutazione dei poli viene gestita elettronicamente, il rotore è più compatto e leggero

Il problema di questi nuovi motori è un'elettronica di controllo più complessa e quindi costosa. Infatti, per dare la sequenza corretta delle commutazioni, un microprocessore sovrintende le operazioni. Uno stadio di potenza per motori brushless corrisponde a tre regolatori in parallelo per motori tradizionali.

E' costituito da uno statore in cui trovano alloggio le tre fasi (A,B,C), da un rotore a magneti permanenti, da un commutatore elettronico e da una logica di commutazione

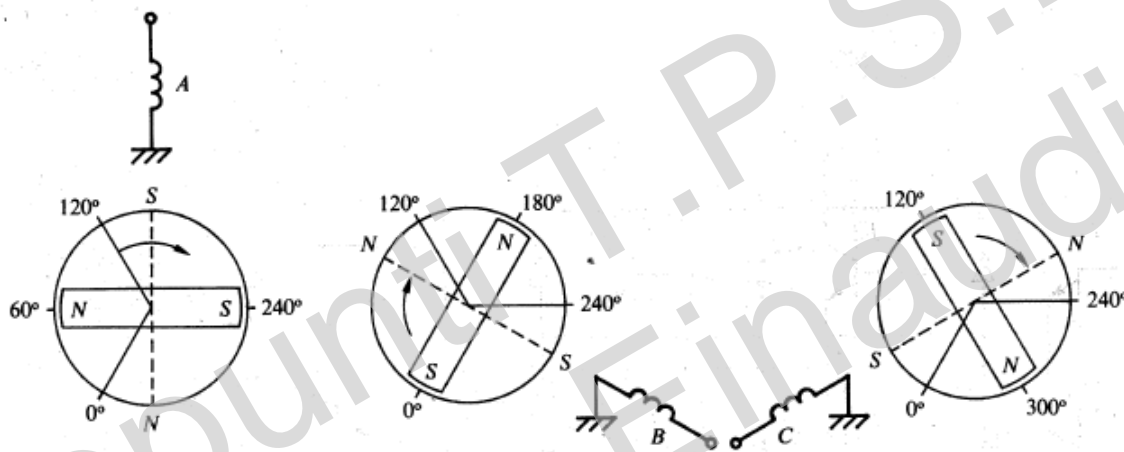


Nel motore brushless, solitamente lo statore ha tre avvolgimenti (fasi), disposti a  $120^\circ$  uno dall'altro.

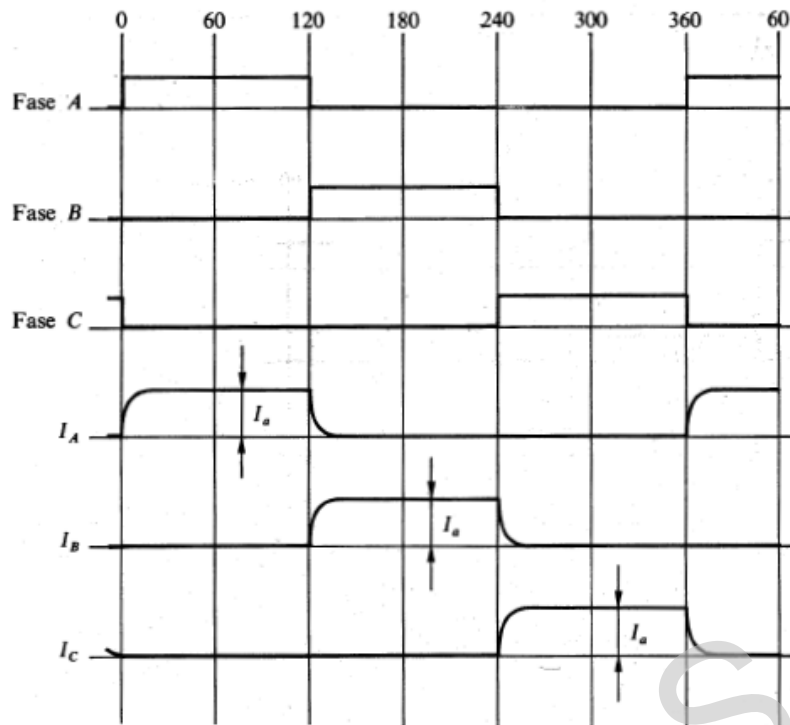
Ogni fase, se alimentata, viene percorsa da corrente e quindi genera un campo magnetico che interagisce col campo magnetico dei magneti sul rotore.

Per far girare il rotore basta alimentare in sequenza le fasi, in modo da far "ruotare" il campo magnetico di statore. Per sapere, istante per istante, quale fase alimentare, c'è un sensore che rileva la posizione del rotore. In questo modo alimenta sempre la fase dello statore che in quel momento è in grado di generare un campo perpendicolare a quello del rotore.

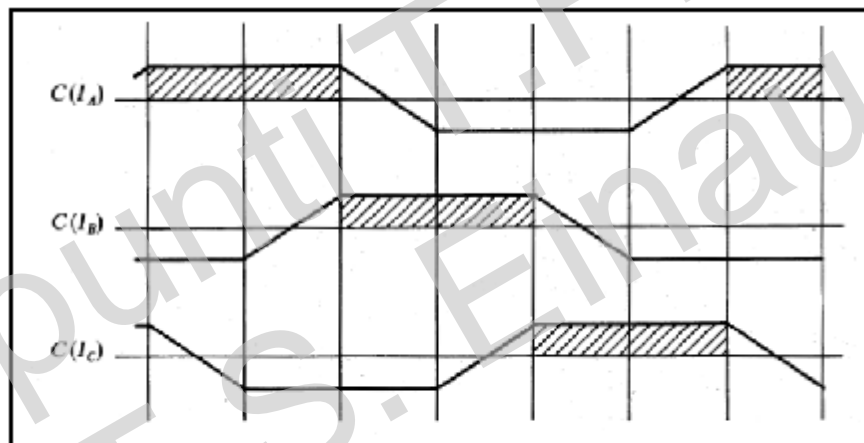
In altre parole, mentre nel motore DC era il commutatore meccanico (il sistema spazzole+collettore) a decidere quale fase del rotore alimentare per variare la polarità del campo magnetico generato, nel brushless è l'elettronica di controllo ad "accendere" una alla volta, ciclicamente, le fasi che sono sullo statore



Quando la fase A è alimentata, crea un campo magnetico con le polarità indicate all'esterno del cerchio (Nord in basso, Sud in alto) e rimane attiva finché il rotore, con le polarità indicate, non ha ruotato in senso orario dell'angolo da  $0^\circ$  a  $120^\circ$ . Successivamente viene attivata la fase B, per una rotazione del magnete da  $120^\circ$  a  $240^\circ$ , poi ancora la fase C per una rotazione da  $240^\circ$  a  $360^\circ$ . Il rotore sottoposto all'azione dei tre campi magnetici che si attivano in sequenza viene portato in rotazione; in un certo senso il motore brushless è una macchina sincrona, in quanto i campi di rotore e di statore sono sempre mantenuti sincroni e sfasati tra loro per creare una coppia motrice



Diagrammi di attivazione e corrente in un *brushless*



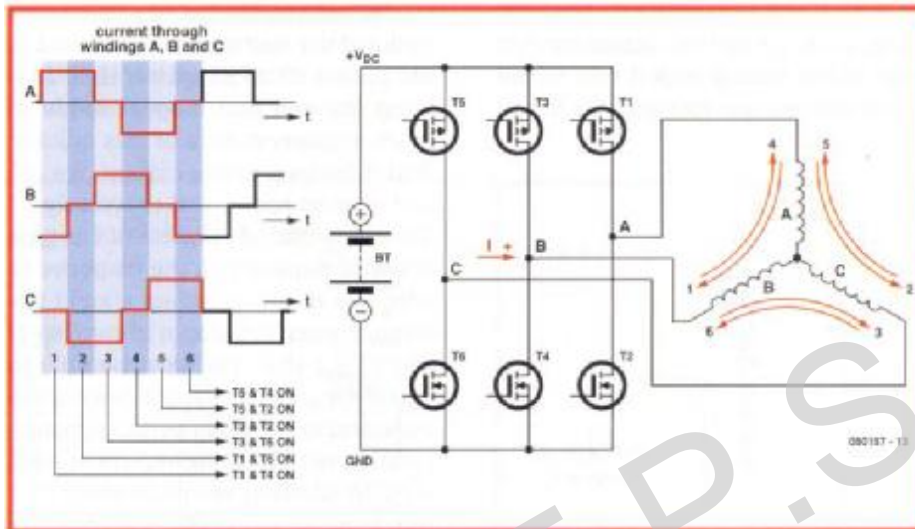
Andamento della coppia di rotore in un *brushless*

- Non ci sono spazzole, quindi non ci sono perdite elettriche, meccaniche per attrito, scintille
- Il circuito di alimentazione è nello statore, quindi la dissipazione termica è più facile. Inoltre è facile inserire sensori termici per tenere la temperatura sotto controllo
- Riduzione del momento di inerzia del rotore e quindi dimensioni più piccole
- Coppie di spunto e velocità maggiori che nei motori a collettore
- A differenza dei motori a collettore, però, il numero di avvolgimenti è molto minore quindi risulta più difficile avere una coppia costante
- Essendo i magneti sul rotore, vi è un'inerzia rotorica molto bassa, cosa che permette di avere un controllo estremamente preciso sia in velocità che in coppia, con accelerazioni e decelerazioni brusche e precise. Queste caratteristiche li rendono adatti all'utilizzo nei lettori CD e DVD ma anche, nelle versioni più grandi (fino a 100kW), nell'aeromodellismo e nei veicoli elettrici.

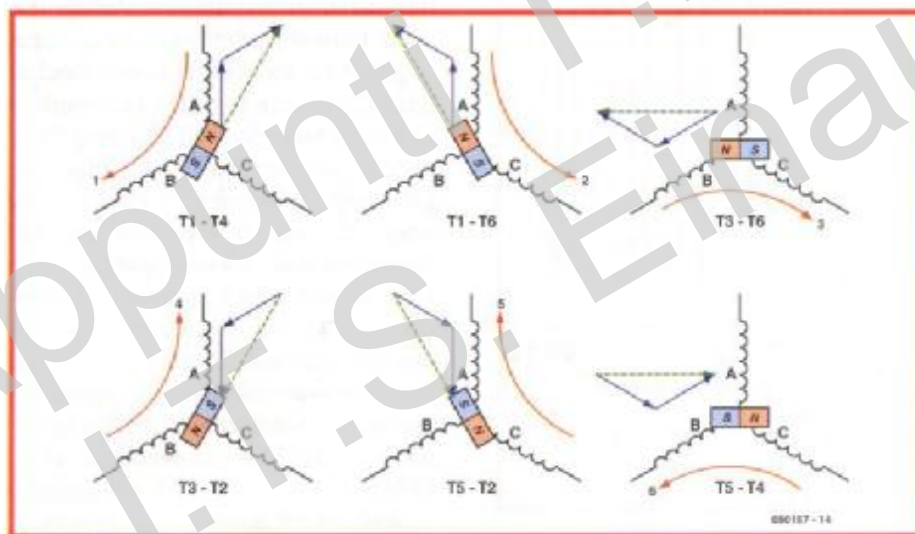


Il principale *svantaggio* di questo tipo di motore sta nel maggiore costo. Al contrario dei motori a spazzole, infatti, il controllo viene effettuato elettronicamente con un circuito integrato venduto assieme al motore

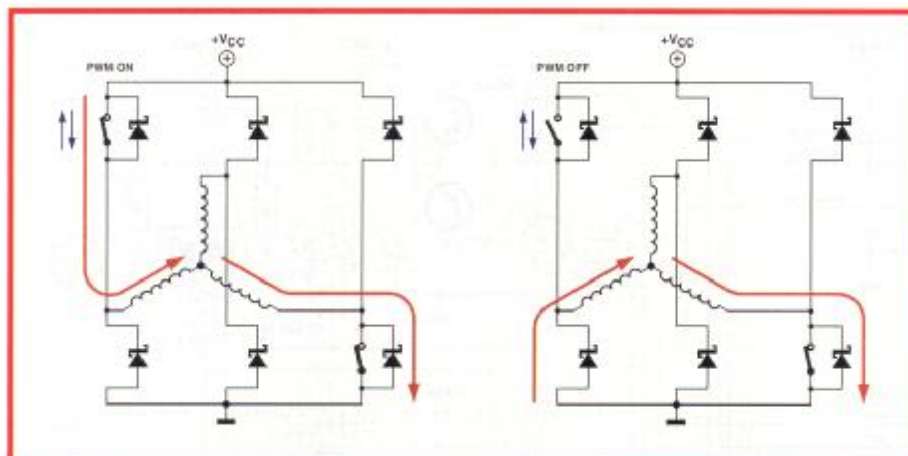
Pilotaggio con fasi multiple



Six successive steps for one complete rotation of the induced magnetic field.



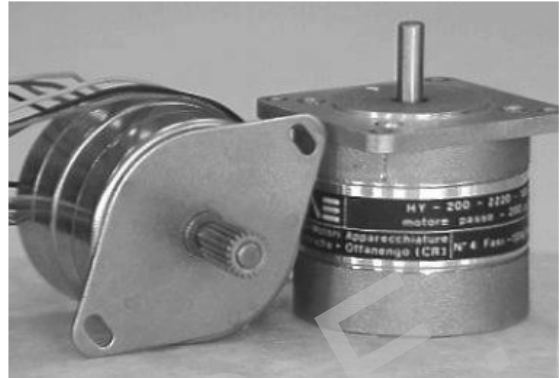
Alignment of the induced magnetic field for each of the six steps.



## Motori passo-passo

---

- Convertono impulsi digitali elettronici in spostamenti meccanici programmati di elevata precisione.
- Hanno un'elevata robustezza meccanica ed elettrica (no contatti elettrici striscianti)
- E' facile far compiere all'albero piccole rotazioni angolari arbitrarie in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione.
- La velocità di rotazione può essere molto bassa anche senza l'uso di riduttori meccanici.



Per ottenere una rotazione occorre inviare al motore una serie di impulsi di corrente, secondo un'opportuna sequenza, in modo tale da far spostare, per scatti successivi, la posizione di equilibrio.

I motori passo-passo si dividono in tre grandi gruppi:

- motori a magnete permanente
- motori a riluttanza variabile
- motori ibridi

**A riluttanza magnetica:**

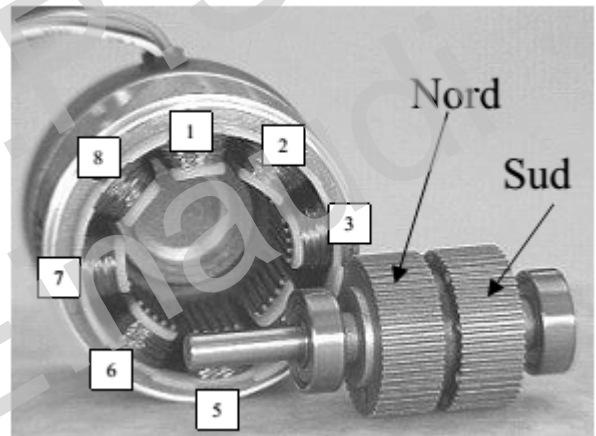
- Ø Lo statore ha  $n_s$  espansioni polari
- Ø Il rotore ha  $n_r$  denti
- Ø Lo squilibrio magnetico si crea creando un circuito magnetico tra le espansioni polari dello statore (che, se alimentate, generano un campo magnetico) e i denti in materiale ferromagnetico del rotore

**A magneti permanenti:**

- Ø Lo statore ha due avvolgimenti
- Ø Sul rotore sono presenti magneti, alternati a passo costante (passo polare)
- Ø Lo squilibrio magnetico si crea perché c'è disequilibrio tra il campo magnetico dei magneti permanenti del rotore e il campo magnetico creato dagli avvolgimenti di statore

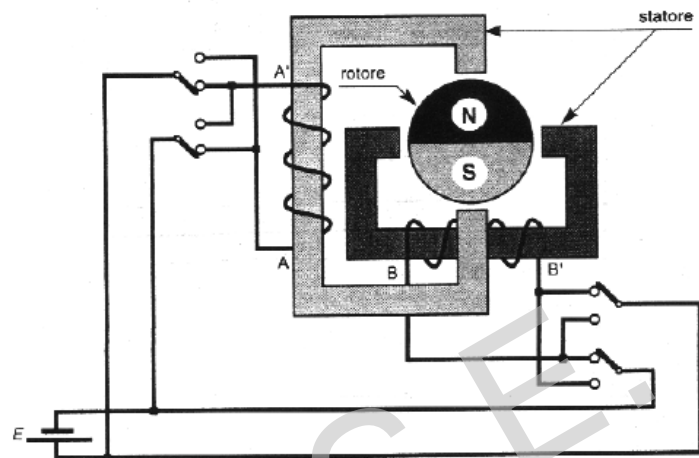
**Ibridi (i più usati):**

- Ø Lo statore appare come il classico insieme di avvolgimenti ed il circuito magnetico è costituito da 4 o, più frequentemente, 8 "espansioni polari"
- Ø Il rotore è costituito da una coppia di ruote dentate affiancate e solidali all'albero, permanentemente magnetizzate, una come NORD e l'altra come SUD. Tra le due ruote è presente uno sfasamento esattamente pari ad  $1/2$  del passo dei denti: il dente di una delle due sezioni corrisponde quindi alla valle dell'altra. Il numero più diffuso di denti di rotore è 50

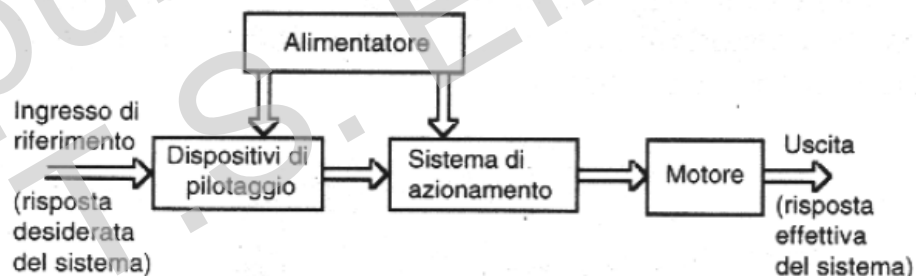


## Motori passo-passo - principi di funzionamento

- Statore. Ha diverse coppie di espansioni polari, attorno alle quali si dispongono gli avvolgimenti del circuito di armatura
- Rotore. Fornisce il flusso magnetico di eccitazione
- Circuito di pilotaggio e sistema di azionamento, che alimentano i circuiti di armatura in successione



- Ad ogni commutazione il rotore si porta pressoché istantaneamente in posizione di coppia nulla, ruotando di un certo angolo (passo angolare)
- Non hanno bisogno di **feedback**, e quindi di sensori di posizione e velocità



- I motori passo-passo (a magneti permanenti e ibridi), a differenza degli altri motori, sono in grado di mantenere il carico sviluppando da fermi una coppia di tenuta anche in assenza di alimentazione

## Difetti:

- Richiedono sempre circuiti elettronici per il pilotaggio, di tipo digitale
- Hanno un funzionamento a scatti con forti vibrazioni, soprattutto ai bassi regimi e se si adottano le tecniche di pilotaggio più semplici
- Il loro rendimento energetico è basso e, in genere, la potenza meccanica è piccola
- Difficilmente raggiungono velocità di rotazione elevate

- I motori passo-passo vengono utilizzati per applicazioni che richiedono:

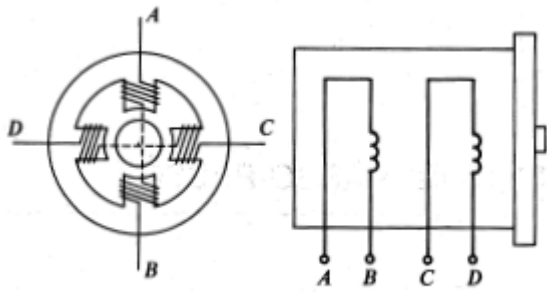
–controlli di posizione di basso costo dove sono richieste piccole potenze

–moti incrementali

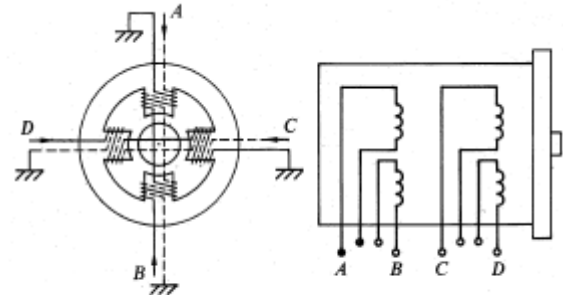
–applicazioni che richiedano rotazioni di valore angolare prestabilito con alta velocità di esecuzione, arresti bruschi con posizionamenti precisi e coppie di mantenimento della posizione di arresto relativamente alte.

- Essendo a ingresso direttamente numerico, non richiede convertitori analogico/digitali nei sistemi di controllo digitale

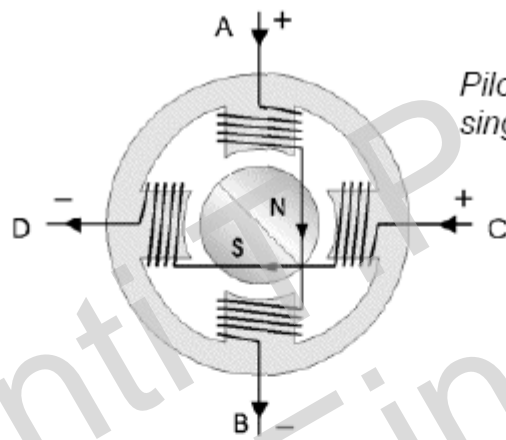




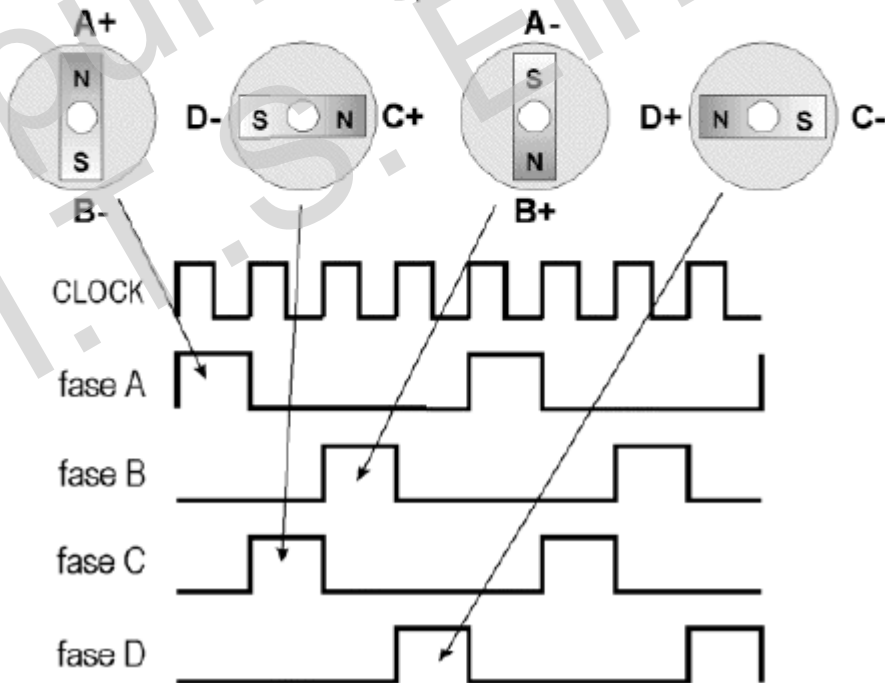
Motore passo passo bipolare



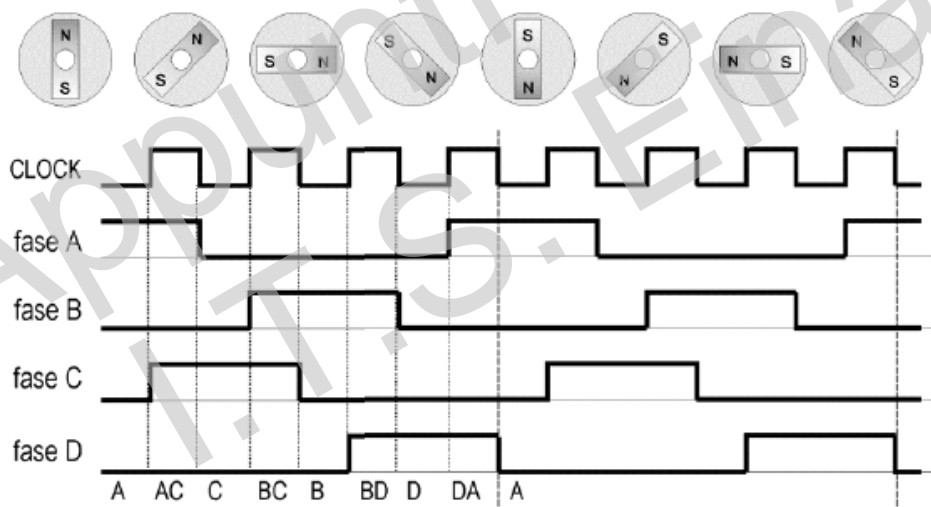
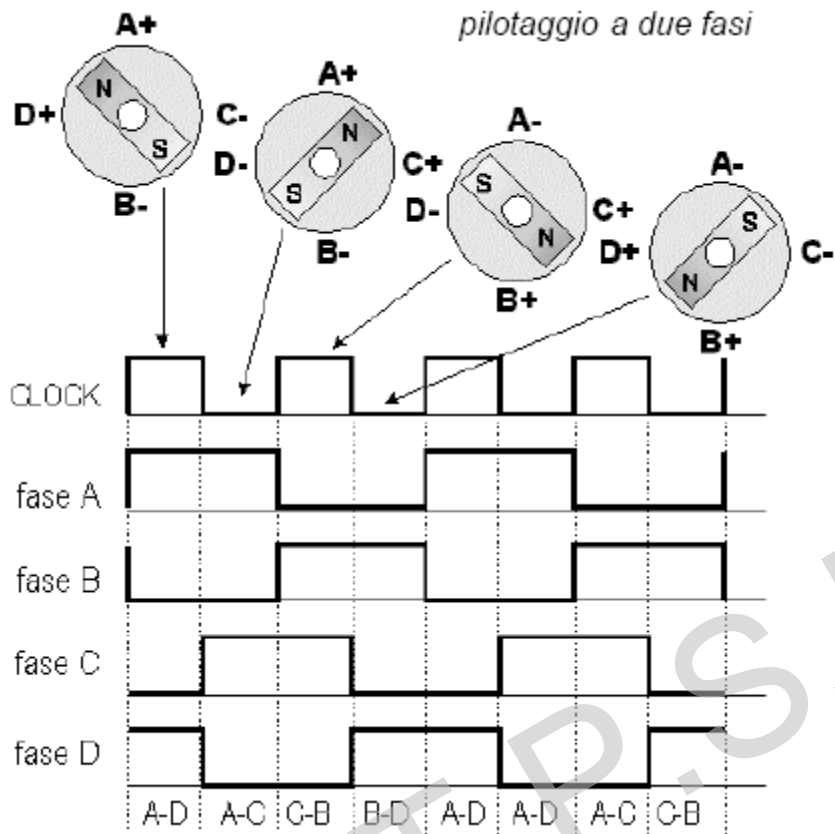
Motore unipolare



*Pilotaggio a fase singola o "a onda"*

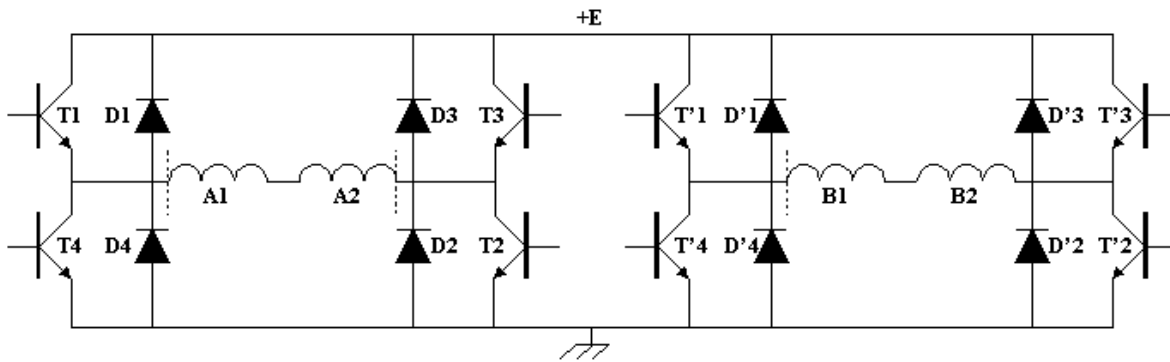






*Il pilotaggio a mezzo passo alterna le due sequenze tipiche del pilotaggio a onda e a due fasi*

- Pilotaggio passo intero singola fase      8 - 1 - 4 - 2
- Pilotaggio passo intero doppia fase      A - 9 - 5 - 6
- Pilotaggio 1/2 passo                              A - 8 - 9 - 1 - 5 - 4 - 6 - 2

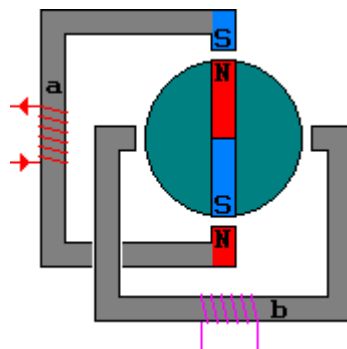


Pilotaggio passo intero doppia fase A - 6 - 5 - 9

Position	T1	T2	T3	T4	T'1	T'2	T'3	T'4
1	1	1	0	0	1	1	0	0
2	0	0	1	1	1	1	0	0
3	0	0	1	1	0	0	1	1
4	1	1	0	0	0	0	1	1

Pilotaggio 1/2 passo A - 2 - 6 - 4 - 5 - 1 - 9 - 8

Position	T1	T2	T3	T4	T'1	T'2	T'3	T'4
1	1	1	0	0	1	1	0	0
2	0	0	0	0	1	1	0	0
3	0	0	1	1	1	1	0	0
4	0	0	1	1	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	1	1
7	1	1	0	0	0	0	1	1
8	1	1	0	0	0	0	0	0

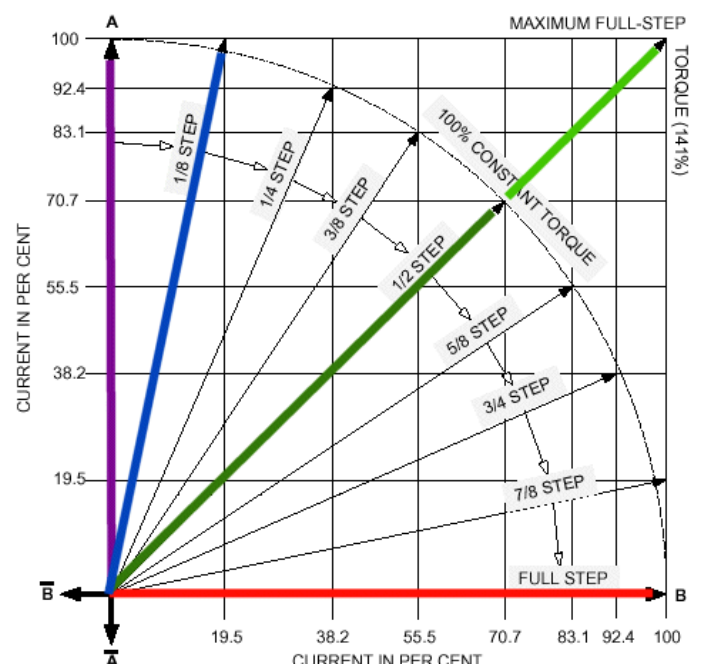


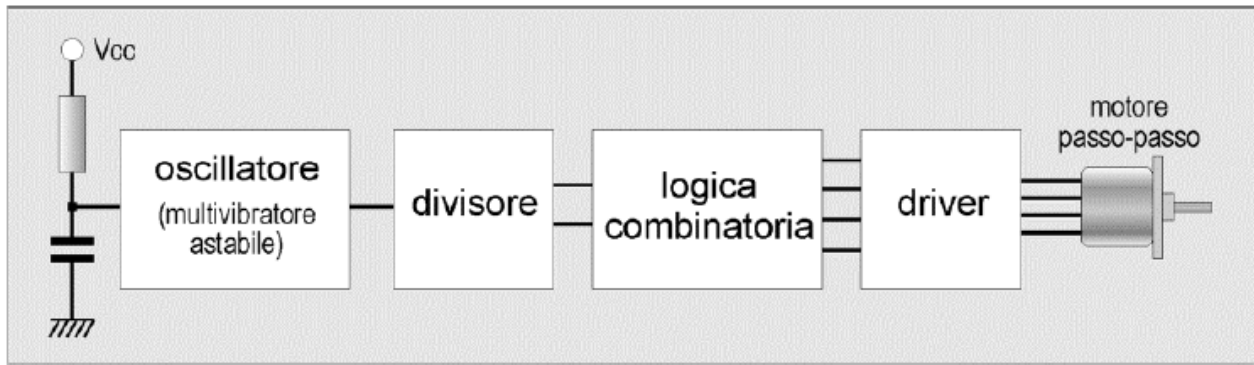
Sequence	Polarity	Name	Description
0001 0010 0100 1000	---+ --+- -+-- +---	Wave Drive, One-Phase	Consumes the least power. Only one phase is energized at a time. Assures positional accuracy regardless of any winding imbalance in the motor.
0011 0110 1100 1001	--++ -+-+ ++-- +--+	Hi-Torque, Two-Phase	Hi Torque - This sequence energizes two adjacent phases, which offers an improved torque-speed product and greater holding torque.
0001 0011 0010 0110 0100 1100 1000 1001	---+ --++ --+- -+-+ -+-- ++-- +--- +--+	Half-Step	Half Step - Effectively doubles the stepping resolution of the motor, but the torque is not uniform for each step. (Since we are effectively switching between Wave Drive and Hi-Torque with each step, torque alternates each step.) This sequence reduces motor resonance which can sometimes cause a motor to stall at a particular resonant frequency. Note that this sequence is 8 steps.

**Microstepping:** un'evoluzione del metodo di pilotaggio half-step. Si possono ottenere posizioni intermedie, tra due step adiacenti, dipendenti dal modulo delle correnti che attraversano gli avvolgimenti delle fasi adiacenti.

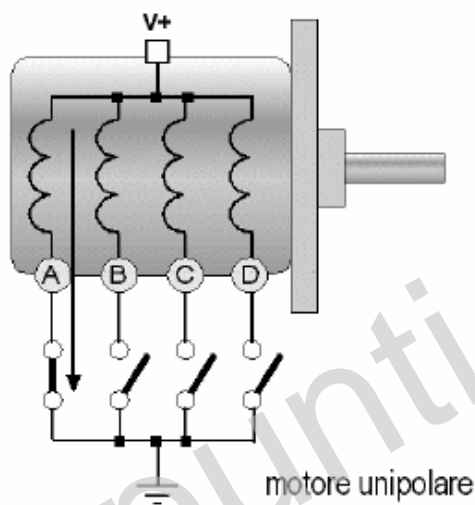
1/8th-Step subdivision current ratios

Step Series	Current Phase A	Current Phase B	Step Position
0	100.0%	0.0%	full step
1	98.1%	19.5%	1/8 step
2	92.4%	38.2%	1/4 step
3	83.1%	55.5%	3/8 step
4	70.7%	70.7%	1/2 step
5	55.5%	83.1%	5/8 step
6	38.2%	92.4%	3/4 step
7	19.5%	98.1%	7/8 step
8	0.0%	100.0%	full step
x†	100.0%	100.0%	1/2 step

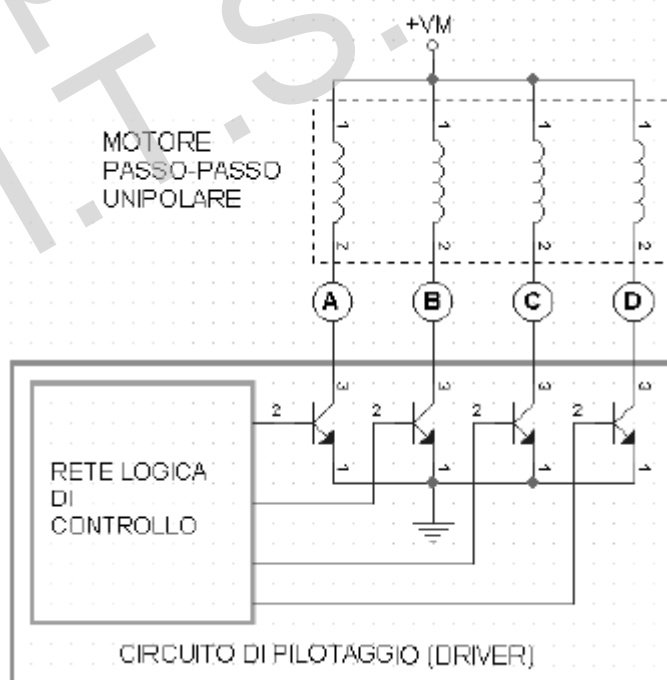




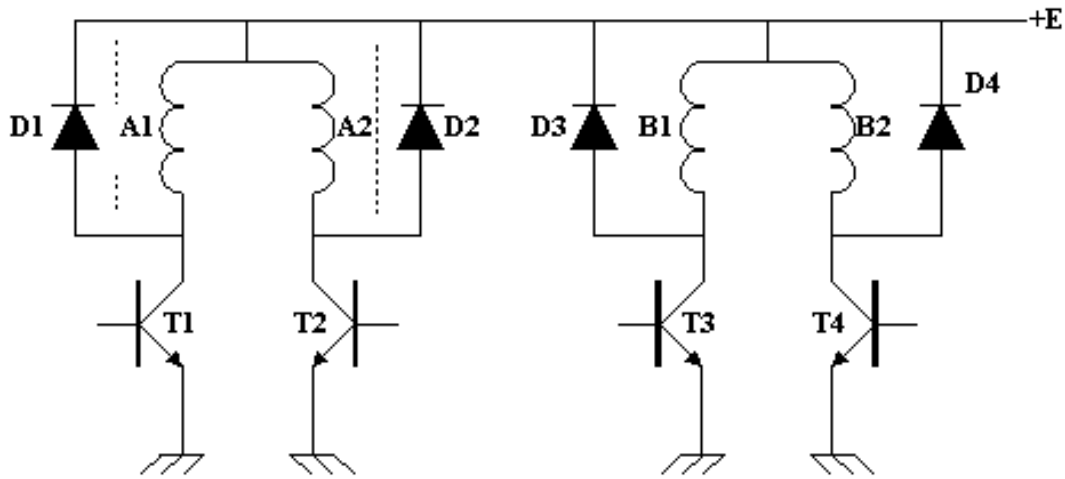
Schema a blocchi del circuito di pilotaggio di un motore passo-passo



*Nel caso del motore unipolare i transistor (indicati come interruttori e deviatori) polarizzano una fase alla volta, mentre per il motore bipolare commutano simultaneamente in modo da invertire il verso della corrente*



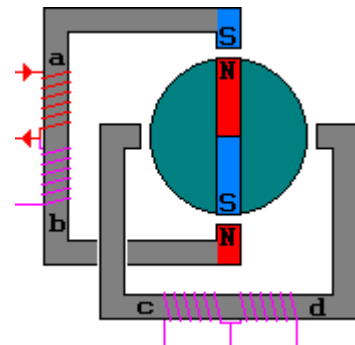
Comando motore unipolare



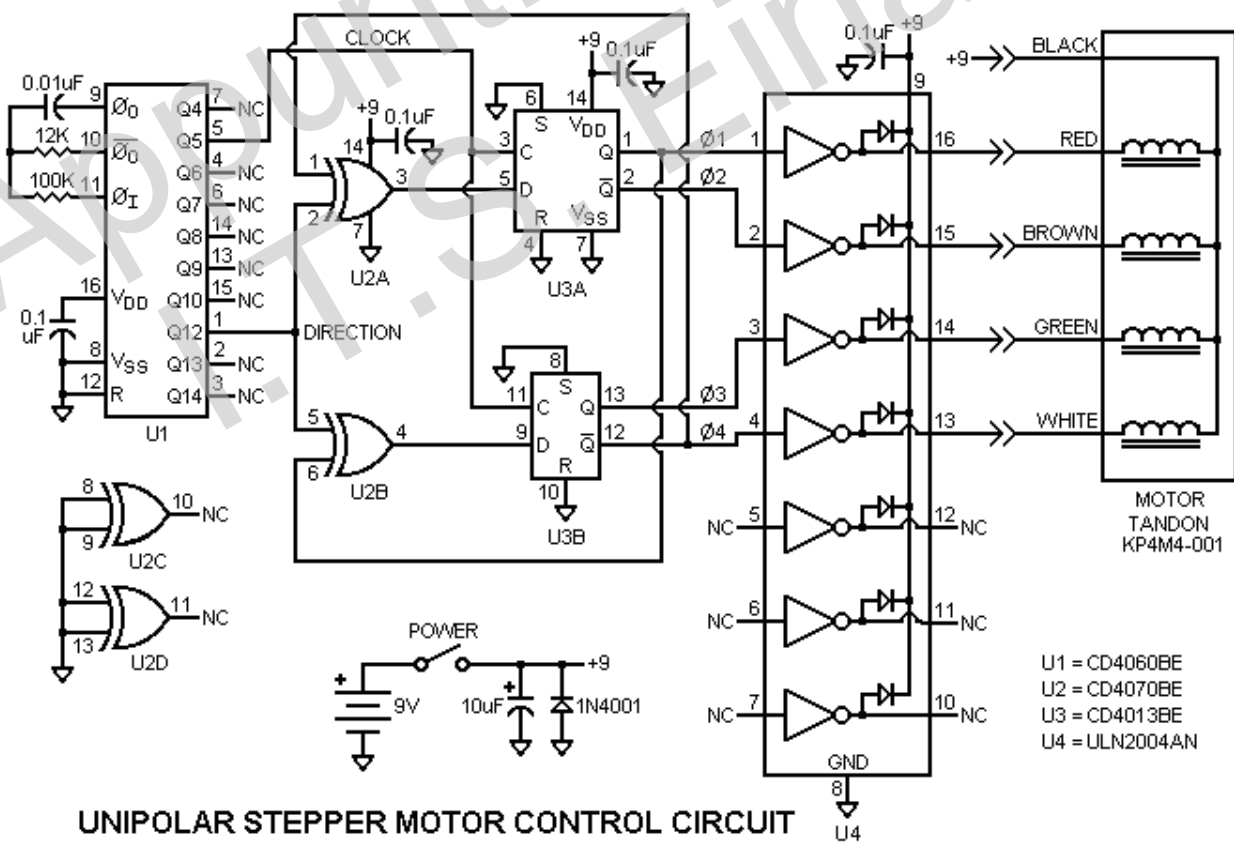
Position	T1	T2	T3	T4
1	1	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	0	0	1

Position	T1	T2	T3	T4
1	1	0	1	0
2	0	1	1	0
3	0	1	0	1
4	1	0	0	1

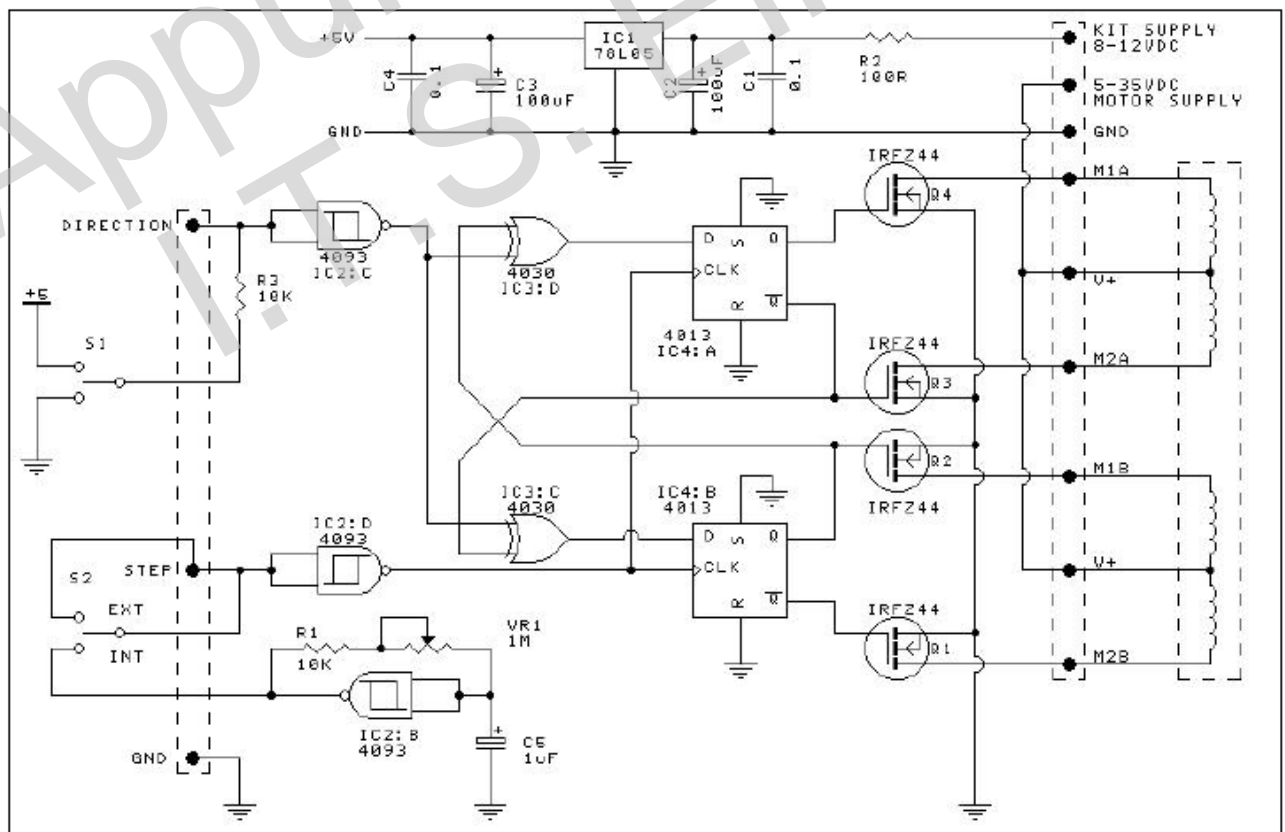
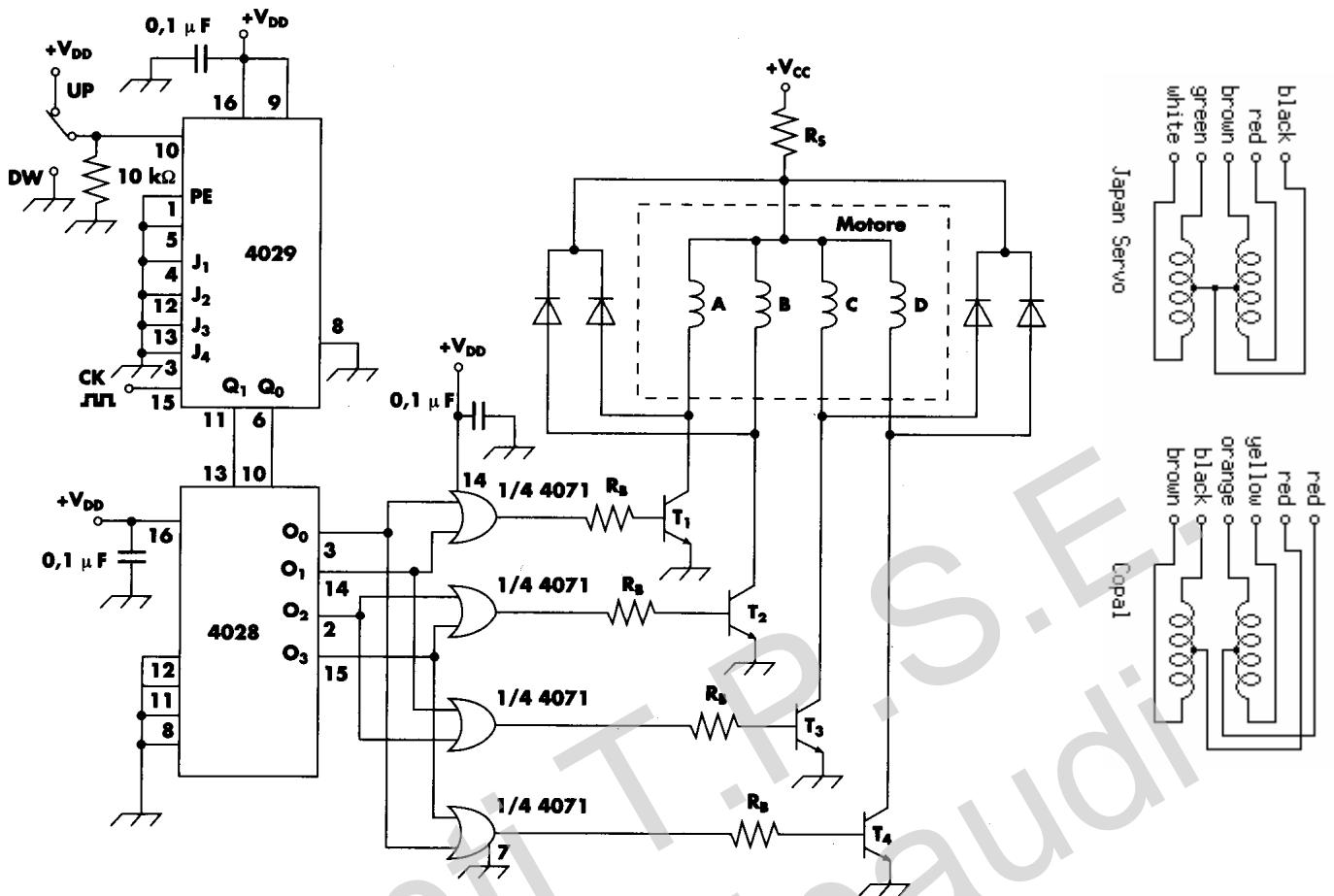
Position	T1	T2	T3	T4
1	1	0	0	0
2	1	0	1	0
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	0	0
6	0	1	0	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

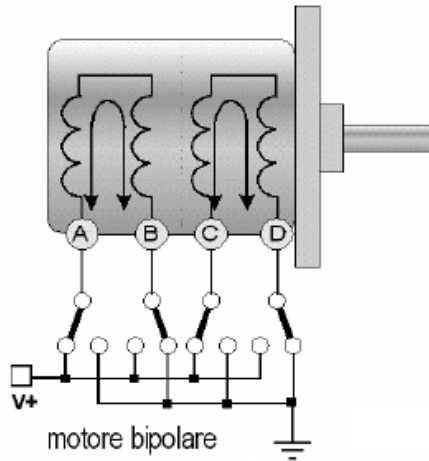


Sequence	Name	Description
0001 0010 0100 1000	Wave Drive, One-Phase	Consumes the least power. Only one phase is energized at a time. Assures positional accuracy regardless of any winding imbalance in the motor.
0011 0110 1100 1001	Hi-Torque, Two-Phase	Hi Torque - This sequence energizes two adjacent phases, which offers an improved torque-speed product and greater holding torque.
0001 0011 0010 0110 0100 1100 1000 1001	Half-Step	Half Step - Effectively doubles the stepping resolution of the motor, but the torque is not uniform for each step. (Since we are effectively switching between Wave Drive and Hi-Torque with each step, torque alternates each step.) This sequence reduces motor resonance which can sometimes cause a motor to stall at a particular resonant frequency. Note that this sequence is 8 steps



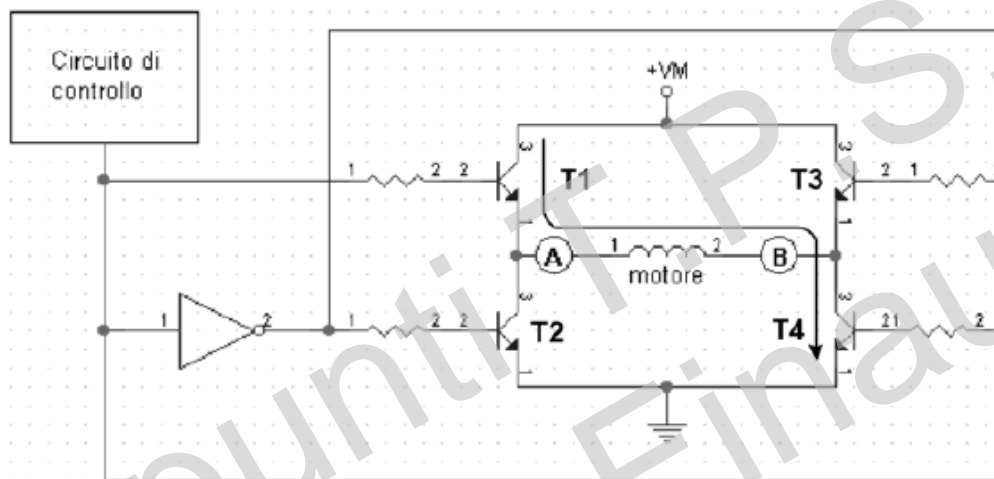






*Nel caso del motore unipolare i transistor (indicati come interruttori e deviatori) polarizzano una fase alla volta, mentre per il motore bipolare commutano simultaneamente in modo da invertire il verso della corrente*

### Pilotaggio a ponte



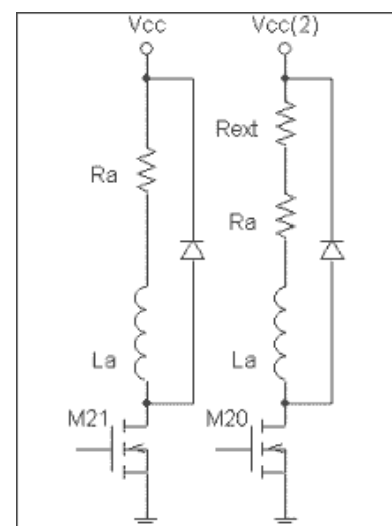
Un inconveniente che si incontra nell'uso di questi circuiti consiste nel fatto che la costante di tempo elettrica del singolo avvolgimento  $\tau_e = L_a/R_a$  determina un tempo pari a circa  $5\tau$  da quando entra in conduzione il corrispondente transistor, per portare nell'avvolgimento la corrente di piena conduzione, limitando quindi la velocità di funzionamento del motore.

### Pilotaggio Ohmico-Resistivo

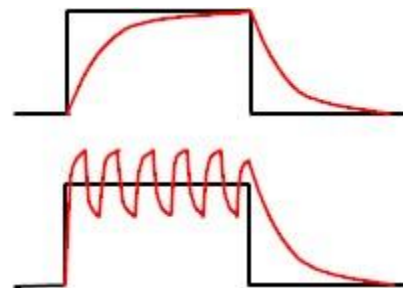
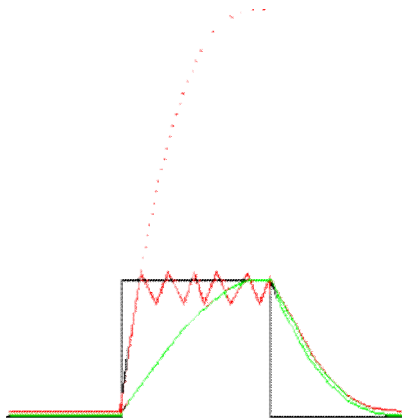
Una semplice soluzione consiste nel inserire in serie alla singola fase una resistenza di alcuni  $\Omega$  e di alimentare il tutto ad una tensione più elevata. La resistenza va dimensionata in modo che a regime la corrente assuma il valore corretto;  $L/R$  risulta diminuita. Peggiora il rendimento a causa della potenza dissipata da  $R_{ext}$ .

$$R_{ext} = \frac{V_{cc} - V_{cesat}}{I_{nom}} - R_a$$

$$t = \frac{L_a}{(R_a + R_{ext})}$$

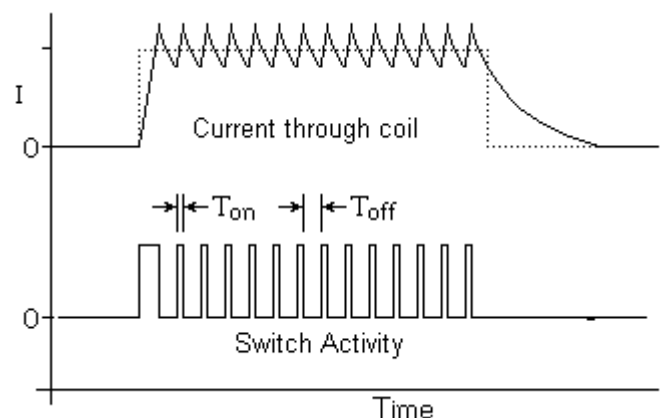
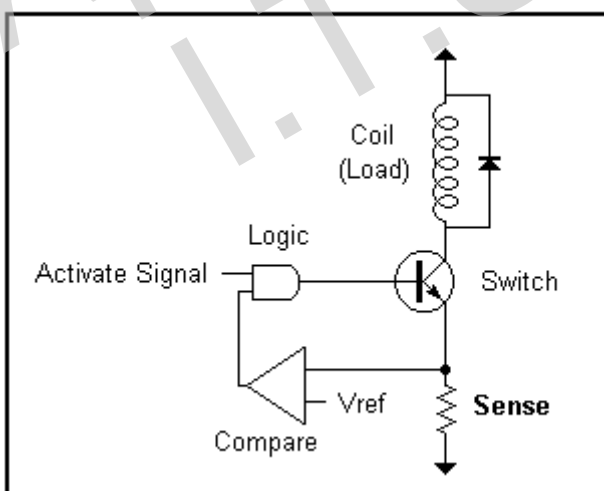
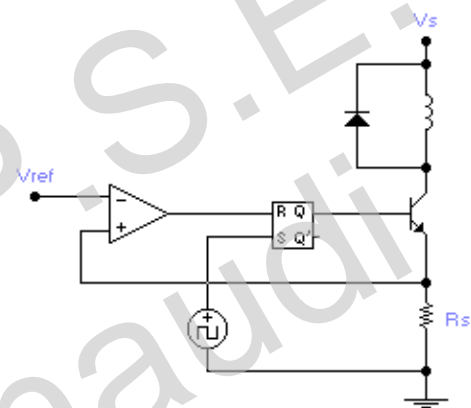


## Pilotaggio a corrente costante

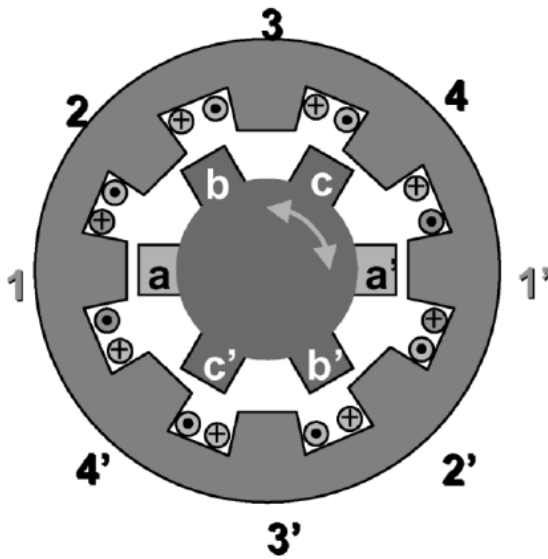


Usato negli stepper bipolari, si attua mediante IC specializzati. L'idea su cui si basa è quella di utilizzare un'alimentazione molto più elevata di quella richiesta dal motore; quando la corrente raggiunge il valore nominale, il transistor viene aperto e quindi la corrente comincia a diminuire, passando attraverso il diodo di ricircolo; dopo un piccolo tempo il transistor viene di nuovo chiuso, la corrente comincia di nuovo ad aumentare ancora fino al raggiungimento della corrente nominale, e così via. Se l'alternarsi delle fasi di apertura/chiusura del transistor sono molto più veloci della velocità con cui le fasi sono eccitate, il valor medio della corrente è praticamente uguale alla corrente nominale.

Il pilotaggio PWM ha due vantaggi: il tempo di salita della corrente è molto breve (visto che è elevata la tensione di alimentazione) e durante le fasi di spegnimento del transistor non si ha consumo di corrente.



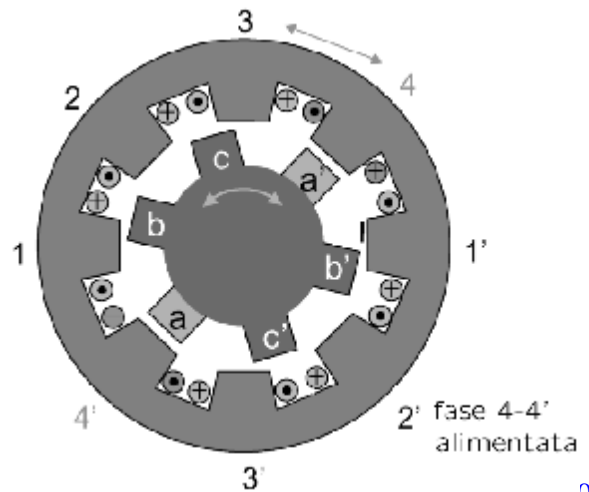
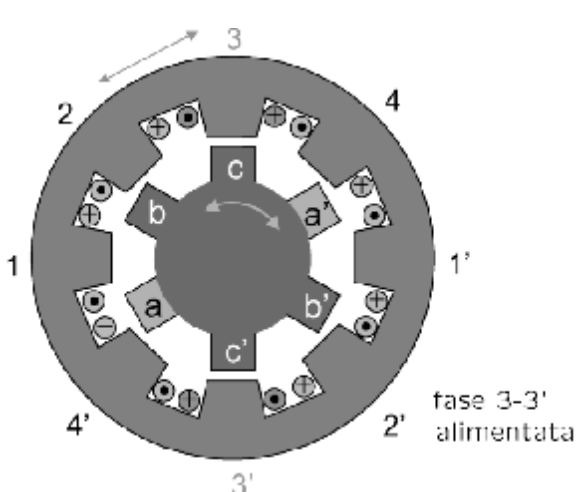
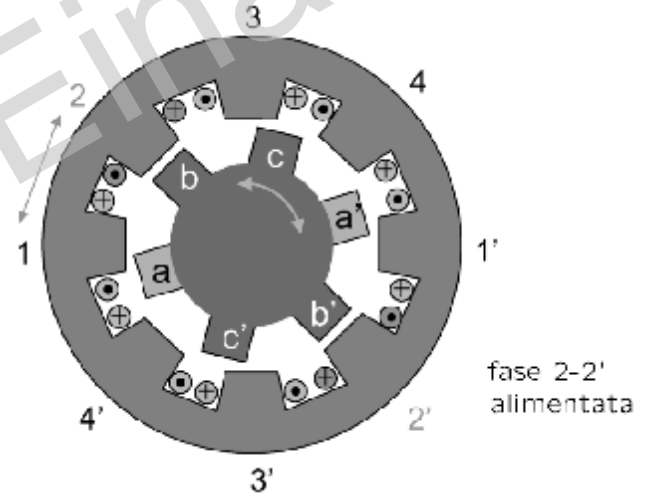
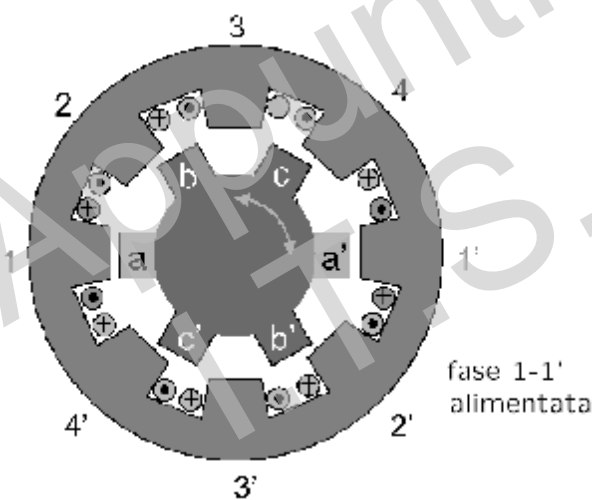
## Motori passo-passo a riluttanza variabile

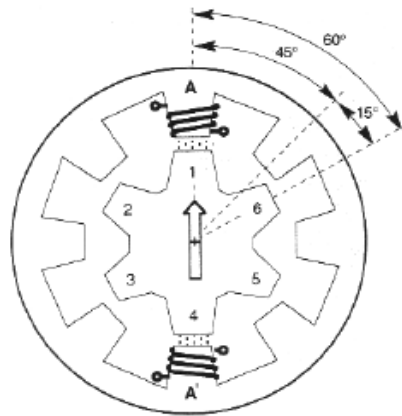


Motore a 4 fasi  
del tipo 6-8

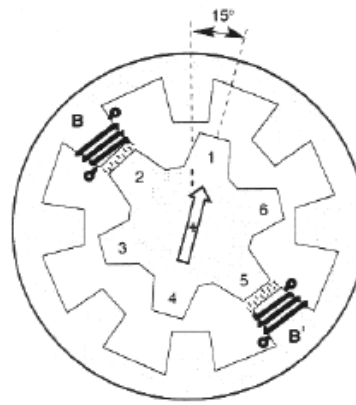
- Il rotore è costituito da materiale magnetico
- Alimentando una fase con una corrente costante il rotore si porta nella posizione per la quale il circuito magnetico assume la minima riluttanza e cioè con una coppia di denti (a-a') allineati con la fase alimentata (1-1').
- La coppia dalla posizione.
- Motore fortemente nonlineare, moti incrementali

Espansioni del rotore in numero minore del numero delle espansioni dello statore (es. 6-8). Vantaggi rispetto al tipo a magnete permanente :passo inferiore, velocità maggiori; Svantaggi: minore coppia sull'asse

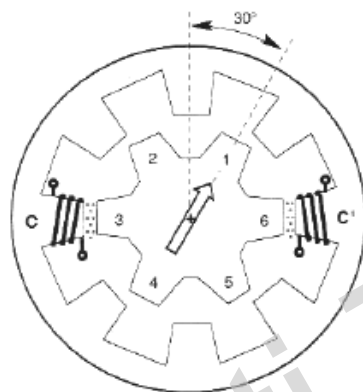




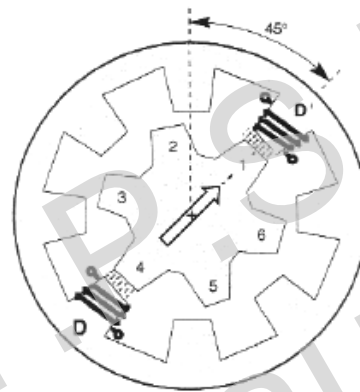
Fase A eccitata



Fase B eccitata



Fase C eccitata

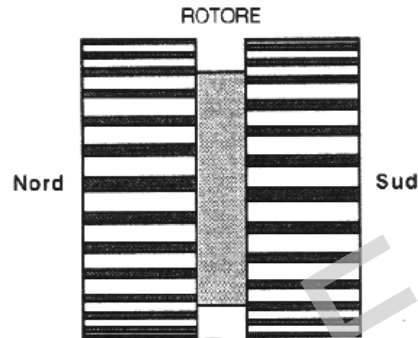
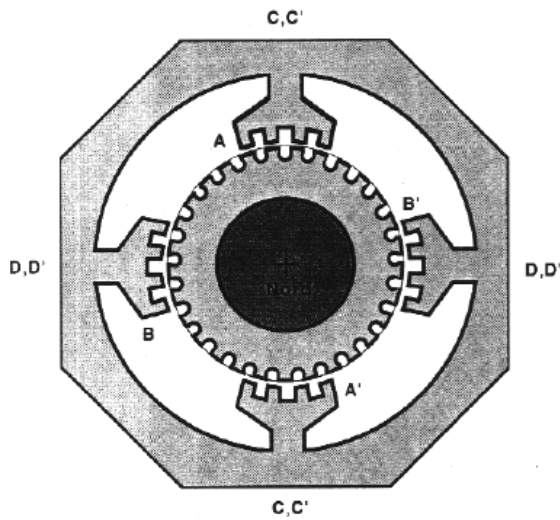


Fase D eccitata

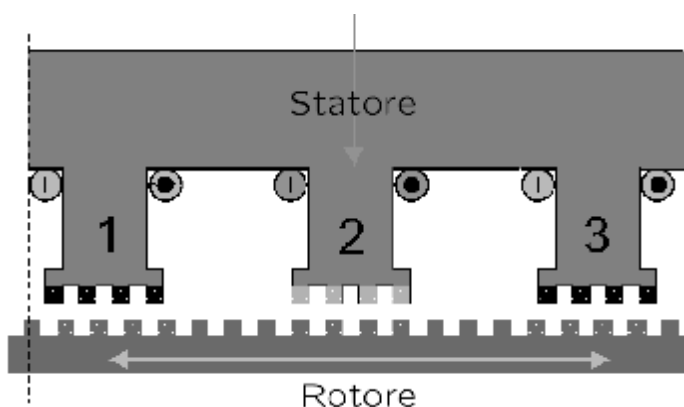
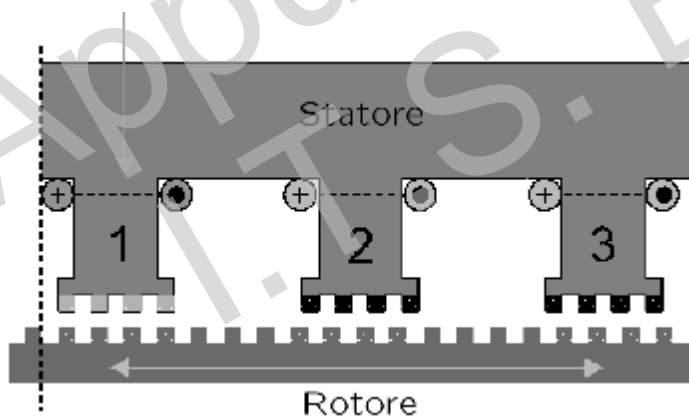
Appunti T.P.S.E.  
I.T.S. Einaudi

## Motori passo-passo ibridi

Il rotore è a magnete permanente, ma la sua forma ricorda quella dei motori a riluttanza variabile



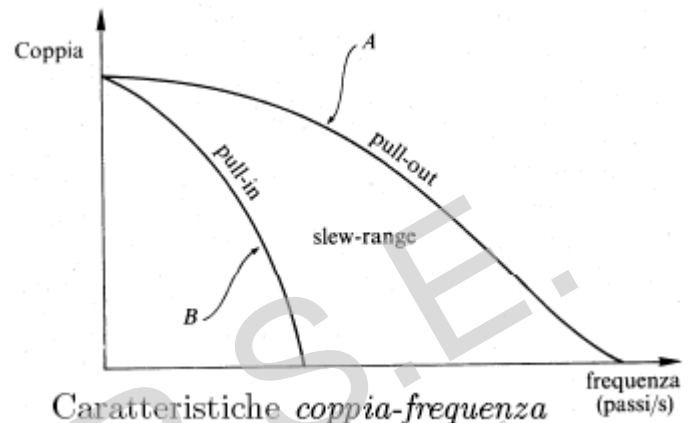
Sono caratterizzati da un rotore costituito da un magnete permanente con diverse espansioni polari in ferro dolce e da uno statore con diversi avvolgimenti; rotore e statore hanno un numero di espansioni diverse, essendo quelle di rotore in numero inferiore. Motore che presenta un costo più elevato dei tipi precedenti. Vantaggi: velocità elevate, coppie alte, piccoli angoli di rotazione con buona precisione.





Il tipo di motore passo-passo più usato è quello a magnete permanente, mentre quello ibrido viene generalmente preferito a quello a riluttanza variabile e viene usato quando si richiedono elevate prestazioni. I valori più comuni del passo di rotazione sono 1:80, 3:60, 7:50, 90, 150 gradi. La frequenza dei passi, normalmente qualche centinaio per secondo, può raggiungere valori elevati, anche oltre gli 800 passi/sec, ed arrivare in certi motori per applicazioni specialistiche fino a 2000 passi/sec.

In Fig. sono riportate le caratteristiche di coppia del motore passo-passo in funzione della frequenza di passo. La curva A indica l'andamento della massima coppia di carico che può essere applicata al motore senza che questo perda il passo. La curva B, analoga alla precedente, è valida in fase di avviamento del motore. Ovviamente, a parità di coppia di carico la velocità che il motore può sopportare senza perdere passi è minore in fase di avviamento, a causa dell'inerzia, che non a regime.



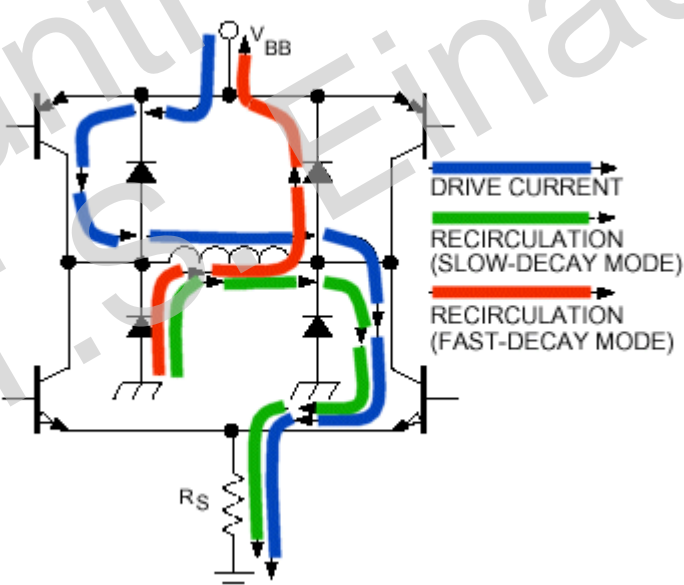
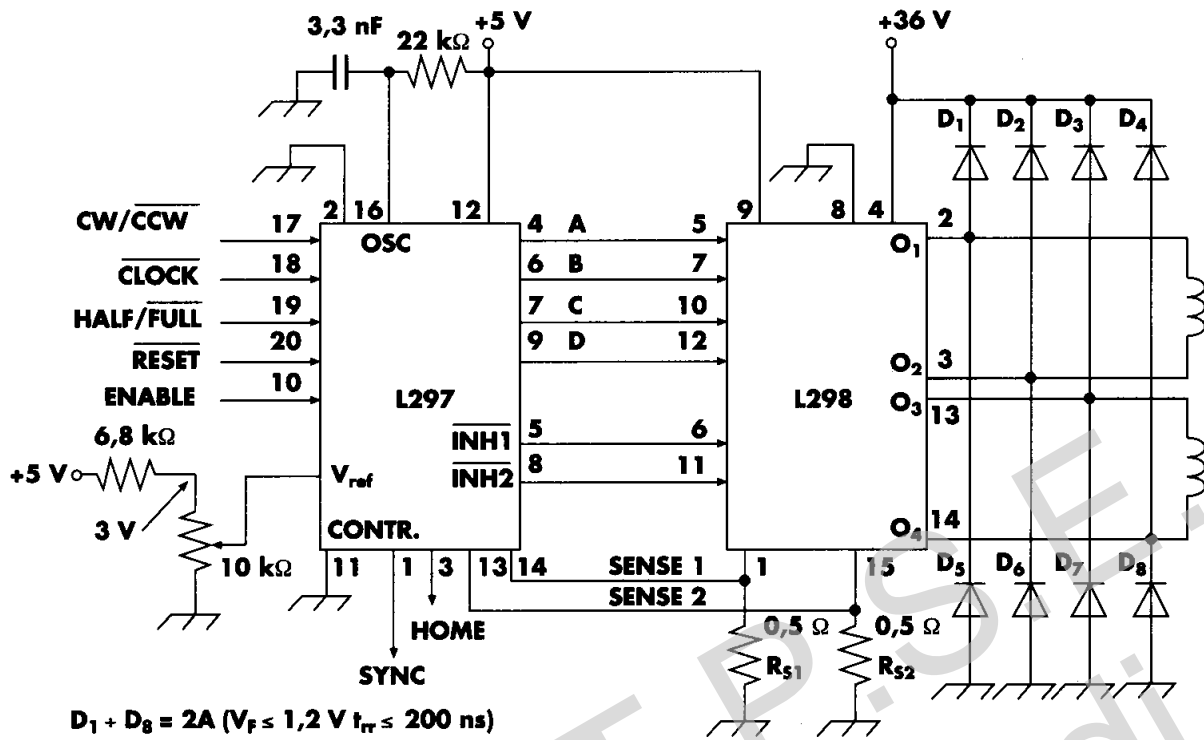
Nella zona del grafico compresa tra le due curve, detta *slew-range*, il motore non perde il passo a patto che la velocità non vari bruscamente.

Di seguito sono elencate brevemente le caratteristiche e la terminologia dei motori passo-passo.

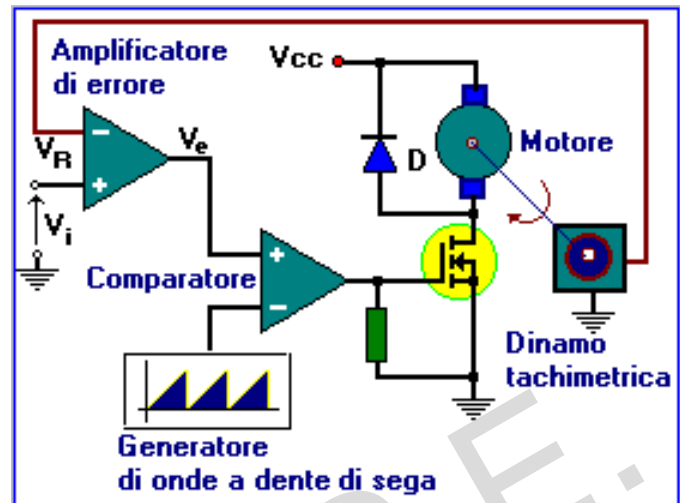
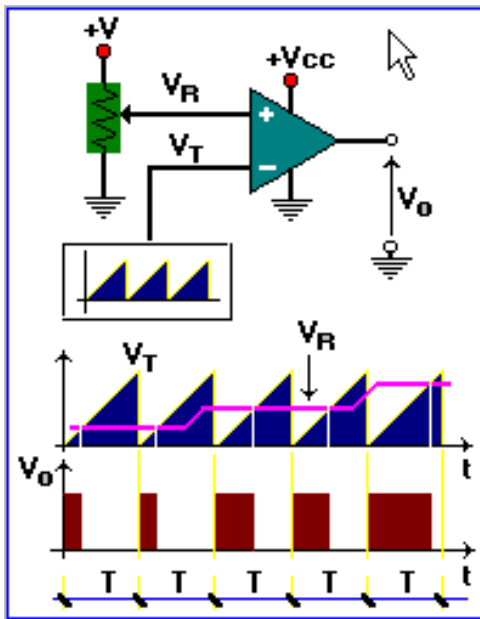
- **Step angle (angolo di passo):** distanza angolare tra due passi vicini. Valori normali sono 1.8° e 3.6°.
- **Step per revolution (passi per giro):** il numero di passi necessari per una completa rivoluzione, valore ovviamente strettamente dipendente all'angolo di passo. Valori normali sono 100 passi/giro (equivalenti ad un angolo di 3.6°) e 200 passi/giro (1.8°). Questo valore è in genere stampigliato in chiaro sul motore (o in alternativa troverete l'angolo di passo). Nel caso non ci sia, potete provare a contare gli scatti che si sentono ruotando a mano il motore non alimentato. Da notare che tale valore si riferisce al pilotaggio a passo intero.
- **Corrente nominale:** è la corrente che attraversa ciascuna fase nelle condizioni normali di funzionamento. In genere è stampigliata sul contenitore del motore, in alternativa alla tensione nominale. Occorre evitare correnti maggiori in quanto è facile arrivare alla saturazione dei materiali magnetici oppure al surriscaldamento degli avvolgimenti. Valori normali, relativi ai motori che normalmente si trovano nelle vecchie stampanti, vanno da 0.5A a 2A o poco più.
- **Tensione nominale:** è la tensione che, collegata direttamente ad una delle fasi, produce la corrente nominale. Questa non è necessariamente la tensione di alimentazione in quanto questa dipende dal metodo di pilotaggio. Valori normali: da meno di 5V a 24V.
- **Resistenza della bobina:** è il legame tra tensione e corrente, in situazioni stazionarie. A volte è stampata ma è comunque semplicemente misurabile con un multimetro.
- **Induttanza della bobina:** raramente si conosce questo valore. Inoltre non è molto significativo in quanto dipende fortemente dalla posizione angolare del rotore. Per

questo stesso motivo è pressoché inutile misurarla con elevata precisione usando un ponte RLC o tecniche analoghe.

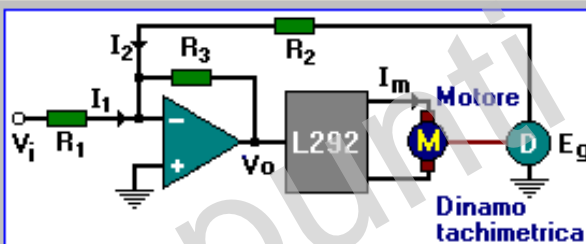
- Residual torque (coppia residua o anche detent torque): la coppia che si oppone alla rotazione dell'albero di un motore non alimentato. E' questa che permette di contare i passi ruotando a mano l'albero.
- Holding torque (coppia di tenuta): la coppia che, con motore alimentato, si oppone alla rotazione. In genere è piuttosto elevata e, anche per motori di piccole dimensioni, è praticamente impossibile ruotare l'albero senza utilizzare una qualche leva. Da notare che la massima coppia di tenuta la si ottiene ruotando l'albero di 1/2 di passo: superato tale angolo, la posizione dell'albero scatta al passo successivo. A volte è disponibile un grafico che, in condizioni statiche, mostra il legame tra coppia applicata e spostamento angolare (a volte indicato come deviation).
- Pull-in torque: è la coppia massima che, applicata al motore, ne permette la partenza ad una data velocità.
- Pull-out torque: è la coppia massima che, con il motore in moto ad una data velocità, può essere applicata senza far perdere il passo.
- Pull-in rate (o anche pull-in speed): è la massima velocità a cui il motore può partire, applicando una data coppia.
- Pull-out rate (o anche pull-out speed): è la massima velocità a cui il motore può arrivare data una certa coppia resistente. Tale velocità deve essere raggiunta con piccoli incrementi di velocità.
- Overshot: è l'oscillazione meccanica che il motore compie intorno alla sua posizione di equilibrio subito dopo uno spostamento. Dipende dal motore, dal pilotaggio e dal carico. Qualche volta, se eccessivo, crea problemi alla meccanica, in particolare l'usura degli ingranaggi.
- Response range (campo di risposta): è la gamma di frequenze entro cui un motore può partire, fermarsi, invertire la rotazione, senza perdere passi.
- Positional accuracy: indica la precisione meccanica di posizionamento angolare, misurata in percentuale rispetto all'angolo di passo. Valori normali sono intorno al 5% (cioè 0.09° per un motore da 200 passi/giro). Tale errore non è cumulativo, cioè dopo un numero arbitrario di passi, rimane in valore assoluto invariato.
- Frequenza di risonanza: è la velocità di rotazione, o meglio le velocità, dato che sono più di una, in cui il motore eroga una coppia molto bassa, arrivando addirittura a fermarsi spontaneamente.



## PWM



## Azionamento di un motore in corrente continua



Per controllare la velocità di un motore in corrente continua sono state sviluppate varie tecniche (vedi lezione sulla modulazione PWM) e realizzati alcuni circuiti integrati dedicati a questo scopo.

Qui viene presentato l'integrato di potenza L292 (SGS), che è stato realizzato proprio per i motori in c.c. Esso ha uno stadio di potenza che è in grado di erogare fino a 2 A con una tensione di alimentazione fino a 36 V.

In figura è rappresentato lo schema di principio del funzionamento dell'integrato. Essenzialmente l'L292 è un amplificatore di transconduttanza, ossia fornisce una corrente  $I_m$  proporzionale alla tensione di ingresso  $V_o$ .

$$I_m = g_m \cdot V_o \quad \text{dove} \quad g_m = 220 \text{ mA/V}$$

**Funzionamento.** Poiché a regime e senza carico il motore assorbe una corrente  $I_m$  trascurabile (rispetto a quella di spunto o a quella di pieno carico), risulterà  $V_o \approx 0$ . In  $R_3$  quindi non circola corrente, per cui la corrente  $I_1$  (fornita dalla tensione di comando  $V_i$ ) e la corrente  $I_2$  (fornita dalla dinamo tachimetrica) sono uguali ed opposte.

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1} ; I_2 = \frac{E_g}{R_2} \quad \text{con} \quad E_g = K \cdot n \quad (\text{tensione della dinamo tachimetrica})$$

dove  $n$  = numero di giri dell'albero motore, dato dalla relazione:  $n = -\frac{R_2 \cdot V_i}{R_1 \cdot K}$

La costante  $K$  e la resistenza  $R_2$  dipendono dal tipo di dinamo tachimetrica e sono fornite dal costruttore. L'equazione sopra scritta è importante per ricavare la resistenza  $R_1$  in base al numero di giri desiderato. Quando al motore viene applicato un carico (il numero di giri tende a diminuire), la corrente  $I_m$  passa da un valore trascurabile ad uno più elevato.

Questo comporta un aumento della corrente nella resistenza  $R_3$  e quindi un aumento della tensione di uscita  $V_o$  dell'operazionale. Aumentando la tensione  $V_o$  aumenta anche la corrente  $I_m$  dell'L292 con conseguente aumento del numero di giri del motore. La variazione  $\Delta n$  del numero di giri del motore (provocata dal carico) è data dalla relazione:

$$\Delta n = -\frac{R_2 \cdot \Delta I_m}{R_3 \cdot g_m \cdot K}$$

In conclusione l'aumento di carico produce una diminuzione  $\Delta n$  della velocità del motore, che risulta tanto minore quanto più elevata è la resistenza  $R_3$ . Nella simulazione si è adottato il parametro della dinamo tachimetrica  $K = 1,2 \text{ (mV / giri} \cdot \text{min}^{-1})$ .

