

# Motori in corrente continua



figura 1.1

Il motore in corrente continua è un attuatore (macchina elettrica rotante) che trasforma energia elettrica in energia meccanica. L'energia elettrica applicata agli avvolgimenti (circuito elettrico) genera l'energia meccanica associata alla rotazione dell'albero motore dovuta all'interazione tra un campo magnetico e una corrente. La **figura 1.1** mostra un motore in corrente continua con encoder e riduttore.

## 1.1 Motore in corrente continua con spazzole

Il **motore in C.C. a magnete permanente**, utilizzato nei sistemi di controllo della posizione e della velocità angolare, è costituito da un magnete permanente che genera l'induzione magnetica e da un rotore sul quale sono posti gli avvolgimenti alimentati da una tensione continua, detta *tensione d'armatura*. Se il rotore è costituito da una sola spira alimentata da una tensione continua  $V_a$  (**figura 1.2**), i lati **a** e **b** sono sottoposti a forze  $F = B \cdot l \cdot I_a$  dove  $l$  è la lunghezza del lato **a** aventi uguale intensità e versi opposti (**figura 1.2**). Queste due forze generano una coppia motrice:  $C_m(t) = F \cdot d \cdot \cos \varphi$  dove:

- ▶  $d$  è il braccio della coppia;
- ▶  $\varphi$  è l'angolo (**figura 1.5**).

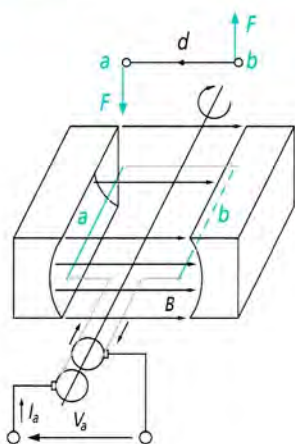
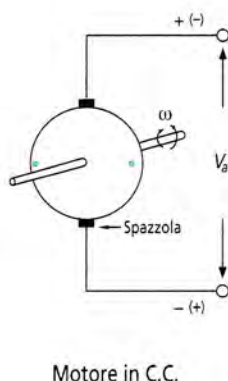


figura 1.2



Motore in C.C.

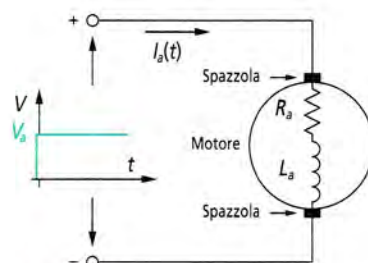


figura 1.3

La **figura 1.3** mostra la struttura elettrica del motore in corrente continua. La coppia motrice mette in rotazione la spira, la quale, a sua volta si oppone al movimento generando una forza controelettromotrice  $E_c(t)$  proporzionale alla velocità di rotazione. Si ha:

$$C_m(t) = K_T \cdot I_a(t) \quad [1.1]$$

$$E_c(t) = K_E \cdot \omega(t) \quad [1.2]$$

dove:

- $K_T$  e  $K_E$  sono rispettivamente la costante di coppia e di tensione;
- $I_a(t)$  è l'intensità di corrente di armatura;
- $\omega(t)$  è la velocità angolare.

La **figura 1.4** mostra lo schema elettrico del motore in corrente continua alimentato con una tensione continua  $V_a(t)$  rappresentata da una sollecitazione a gradino.

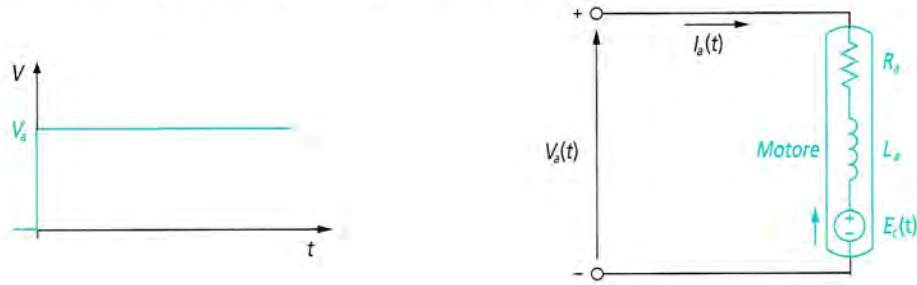


figura 1.4

Applicando il principio di Kirchhoff al circuito di **figura 1.4** e utilizzando la [1.2] si ricava l'equilibrio elettrico:

$$V_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + K_E \cdot \omega(t) \quad [1.3]$$

Attenzione: vedi Scheda integrativa F.d.T. motore in C.C. su [www.auladigitale.rcs.it](http://www.auladigitale.rcs.it)

## 1.2 Collettore-spazzole motore in corrente continua

Lo schema di **figura 1.2** mostra il rotore con una sola spira. Quando questa, per effetto della rotazione, si posiziona in verticale le due forze  $F$  si allineano (**figura 1.5a**) e il movimento si arresta essendo:  $d = 0$ ,  $\cos \varphi = 0$  e  $C_m(t) = 0$ .

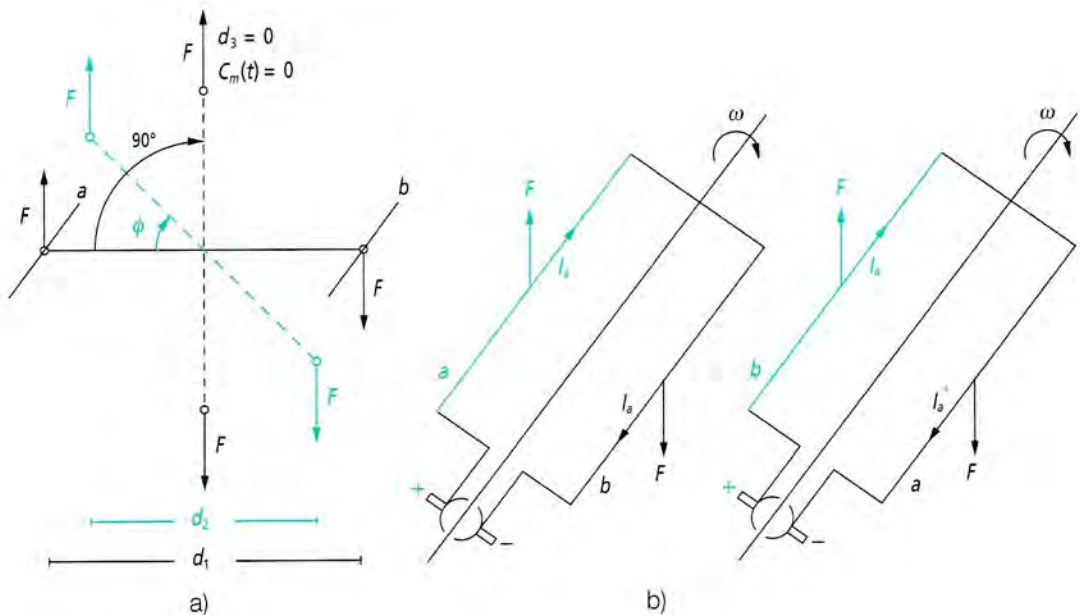


figura 1.5



Se per inerzia la spira supera la condizione critica, occorre invertire il verso della corrente che circola nella spira per mantenere, nei rami attivi, la stessa direzione delle forze e lo stesso verso di rotazione  $\omega$ . Ciò si ottiene con un anello per l'alimentazione suddiviso in due semicerchi (**figura 1.5b**). Il lato  $b$  della spira assume la posizione del lato  $a$ , il verso della corrente  $I_a$  in  $b$  non cambia come la direzione delle due forze  $F$  che generano la coppia  $C_m(t)$  e lo stesso verso di rotazione.

Con due spire disposte a  $90^\circ$  (**figura 1.6**) la fase critica di arresto momentaneo si elimina. Infatti quando la spira 1 raggiunge la posizione verticale, la spira 2 assume quella orizzontale generando le due forze  $F$  e la coppia motrice. Risulta evidente che tale soluzione comporta una suddivisione dell'anello d'alimentazione in quattro parti (**figura 1.6**).

In realtà il rotore del motore in corrente continua è più complesso poiché contiene numerose spire collegate a piccole sezioni di un anello che formano, nel loro insieme, il collettore (**figura 1.7**), costoso e vulnerabile nel tempo. Ogni spira è alimentata per un breve tempo. Ciò accade solo quando la spira stessa si trova nella posizione di massima interazione con il campo magnetico prodotto dallo statore generando, così, una coppia motrice costante.

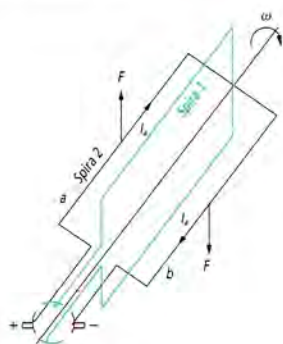


figura 1.6

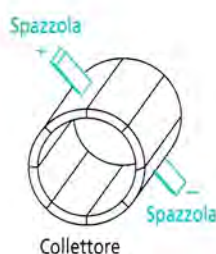
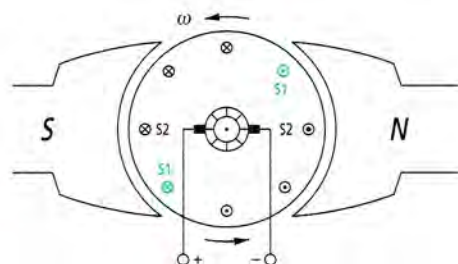


figura 1.7



Il motore in corrente continua è una **macchina elettrica reversibile**, ossia può funzionare come generatore di una tensione continua (**figura 1.8**). Applicando al rotore una velocità angolare (causa), sui morsetti dello statore si genera una tensione continua (effetto) funzione della velocità angolare ( $\rightarrow$  Unità 4, Paragrafo 4.1 del presente Modulo).

Questa condizione di reversibilità è utilizzabile nel recupero di energia elettrica nella fase di riduzione di velocità dovuta all'energia cinetica immagazzinata dalla massa del gruppo rotore. La **figura 1.9** mostra un dispositivo che utilizza un piccolo generatore di tensione in continua (dinamo) per generare energia. La dinamo è attivata manualmente da una leva a cremagliera che mette in rotazione il rotore.

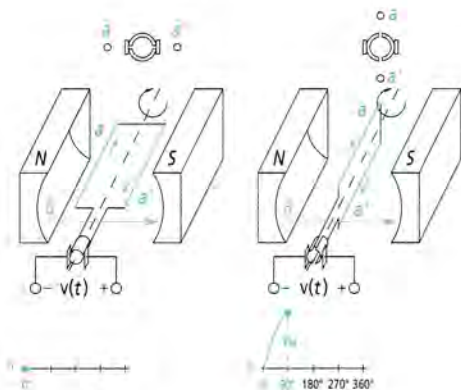


figura 1.8



figura 1.9

### 1.3 Il motore in C.C. nei sistemi di controllo

Il motore in C.C. può essere utilizzato nei sistemi di controllo della velocità angolare  $\omega(t)$ , della posizione  $\phi(t)$  e della coppia  $C_m(t)$  proporzionale a  $I_a(t)$ . Risulta evidente che il sistema di controllo utilizzato, basa il suo principio di funzionamento su una diversa catena di reazione per generare il segnale compatibile con quello d'ingresso (figura 1.10).

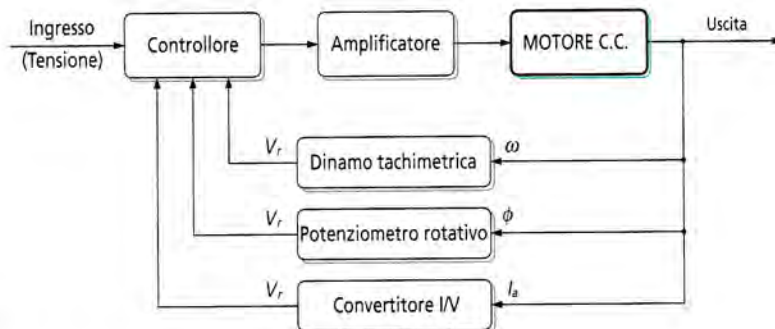


figura 1.10

### 1.4 Controllo della velocità dei motori in C.C.

Nella regolazione di velocità, il circuito di controllo deve gestire il modo d'accelerazione, quello di decelerazione e deve garantire una velocità costante durante il funzionamento a regime. Il controllo può essere fatto a **catena aperta** o a **catena chiusa** (figura 1.11).

Nel primo caso i circuiti di regolazione sono di tipo ON/OFF o lineari e sono utilizzati transistor o amplificatori operazionali di potenza. Nel secondo caso, poiché occorre rilevare la grandezza controllata con trasduttori specifici, i circuiti di regolazione sono più complessi e sono generalmente realizzati con integrati dedicati.

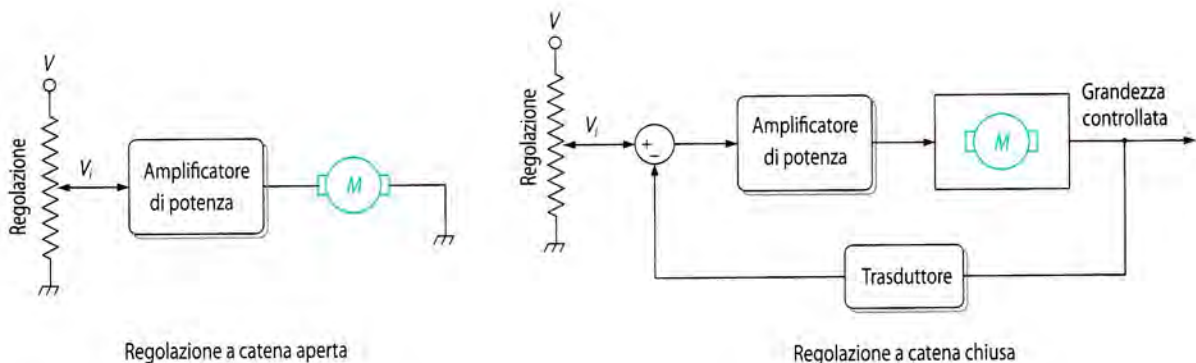


figura 1.11

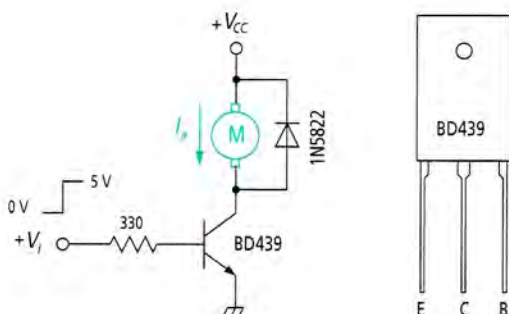
### 1.4.1 Regolazione della velocità ON/OFF

La **figura 1.12** mostra lo schema elettrico di un circuito di controllo di velocità a catena aperta di un motore in corrente continua che richiede una tensione d'alimentazione  $V_{CC} = 24$  V e assorbe, a vuoto, una corrente d'intensità uguale a 270 mA.

Il circuito di controllo è di tipo ON/OFF e utilizza il transistor di potenza del tipo BD439 (**tabella 1.1**) pilotato con un segnale di controllo  $V_i$  di tipo TTL.

Il transistor va in saturazione (stato di ON) quando  $V_i = 5$  V (motore funzionante) e in interdizione (stato di OFF) quando  $V_i = 0$  V (motore fermo).

Come si può osservare dalla **figura 1.12** il motore non ha alcun terminale collegato ai riferimenti di massa.

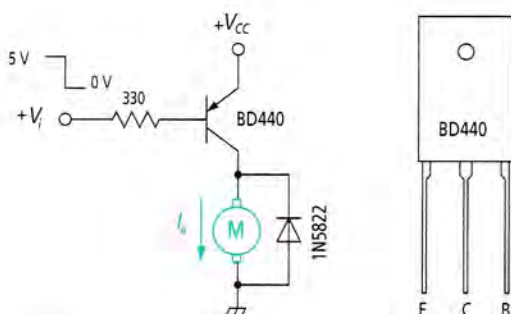


**figura 1.12**

**tabella 1.1** Caratteristiche elettriche BD439.

Caratteristiche	Valori	U. misura
$V_{CEO} = V_{CBO}$	60	V
$V_{EBO}$	5	V
$V_{CE(Sat)}$ max	0,8	V
$V_{BE(ON)}$ max	1,5	V
$I_C$	4	A
$I_B$	1	A
$h_{FE}$ (min)	20	-

Per collegare un terminale del motore alla massa di riferimento bisogna utilizzare un transistor di tipo PNP (BD440 - **tabella 1.2**) con funzionamento ON/OFF come mostra la **figura 1.13**.



**figura 1.13**

**tabella 1.2** Caratteristiche elettriche BD440.

Caratteristiche	Valori	U. misura
$V_{CEO} = V_{CBO}$	60	V
$V_{EBO}$	5	V
$V_{CE(Sat)}$ max	0,8	V
$V_{BE(ON)}$ max	1,5	V
$I_C$	4	A
$I_B$	1	A
$h_{FE}$ (min)	20	-



### 1.4.2 Regolazione della velocità lineare

Nella **figura 1.14** è riportato lo schema di un circuito di regolazione di velocità a catena aperta di tipo lineare. Il transistor di potenza è nella configurazione d'inseguitore d'emettitore. Il segnale di controllo  $V_i$  sul motore, varia linearmente in ampiezza e controlla la velocità di rotazione dell'albero. Gli schemi elettrici riportati nella **figura 1.12** e nella **figura 1.14** permettono il controllo di velocità del motore senza poter invertire il verso di rotazione. Per gestire anche il verso di rotazione si utilizzano più transistor con strutture a T (2 BJT collegati a semiponte e con alimentazione duale), con strutture ad H (4 BJT collegati a ponte e con alimentazione singola) oppure amplificatori operazionali di potenza.

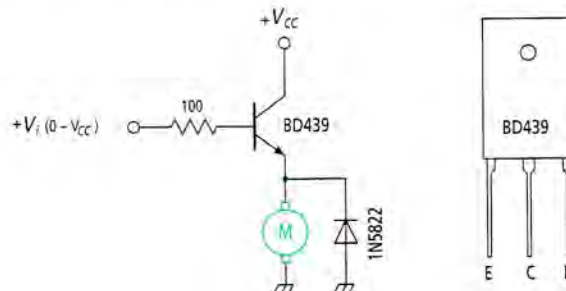


figura 1.14

Lo schema di **figura 1.15** utilizza l'amplificatore operazionale di potenza L165 (→ Volume 2, Modulo 2, Unità 4, Paragrafo 4.3) con configurazione d'amplificatore invertente a guadagno unitario. La tensione di controllo  $V_i$  regola velocità e inverte il verso di rotazione dell'albero motore. Il filtro  $RC$  in uscita evita inneschi indesiderati d'oscillazioni e la resistenza  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  è consigliata dal costruttore.

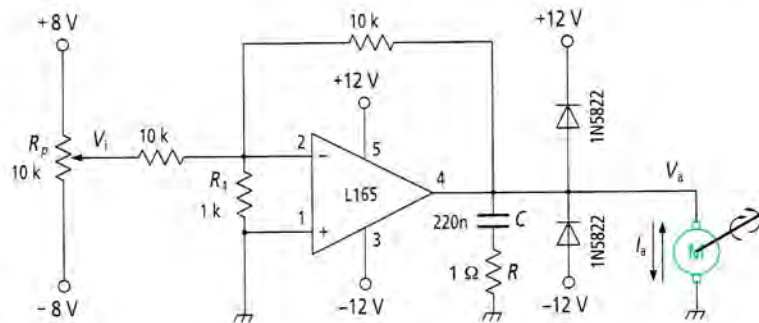


figura 1.15

### 1.4.3 Regolazione della velocità lineare con tecnica PWM

La tecnica di regolazione PWM, *modulazione in larghezza d'impulsi*, fa uso di un segnale pilota a onda quadra.

Si consideri la F.d.T. del motore in C.C. funzionante a vuoto.

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{J \cdot L_a \cdot s^2 + J \cdot R_a \cdot s + K_T \cdot K_E} = \frac{\frac{K_T}{J \cdot L_a}}{\left(s + \frac{1}{\tau_m}\right) \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_e}\right)} = \frac{\frac{1}{K_E}}{(1 + \tau_m \cdot s) \cdot (1 + \tau_e \cdot s)}$$

dove:

$$\tau_m = \frac{J \cdot R_a}{K_T \cdot K_E} \quad \text{e} \quad \tau_a = \frac{L_a}{R_a}$$

La F.d.T. ha due poli reali e negativi. Nei motori in C.C. la costante di tempo meccanica  $\tau_m$  è sempre maggiore della costante di tempo elettrica  $\tau_a$ , pertanto la pulsazione d'angolo  $1/\tau_m$  è dominante rispetto alla  $1/\tau_a$ .

Ipotizzando:

$$K_E = 0,1194 \text{ m} \cdot \text{N/A}, \quad \tau_m = 10,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}, \quad \tau_a = 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

il diagramma di Bode in ampiezza mostra una risposta tipica di un filtro RC passa-basso, in grado di eliminare tutti i segnali le cui frequenze sono superiori alla frequenza di taglio  $f_T$  del sistema (figura 1.16).

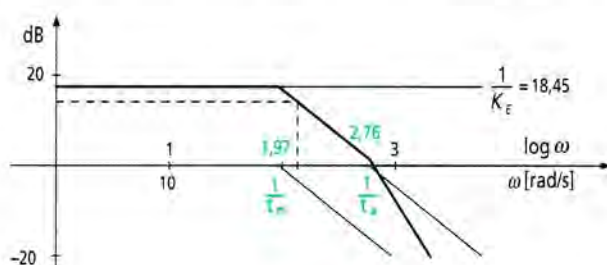


figura 1.16

Considerato che un'onda quadra di frequenza  $f_0$  è costituita da una componente continua e da segnali sinusoidali aventi frequenze  $f_0$ ,  $2 \cdot f_0$ ,  $3 \cdot f_0$ , ecc. (sviluppo in serie di Fourier) il motore in C.C. è, in pratica, alimentato dalla sola componente continua se la frequenza  $f_0$  della fondamentale è molto maggiore della frequenza di taglio  $f_T$  della F.d.T. del motore. Da tali considerazioni si comprende perché la tecnica PWM sia molto utilizzata nei sistemi di controllo della velocità di motori in C.C.

Il circuito di controllo di velocità con tecnica PWM (figura 1.17) è costituito da un oscillatore a onda triangolare, un comparatore e un transistor di potenza che funziona come interruttore (ON/OFF). Infatti durante la fase attiva (livello alto) degli impulsi il transistor è in conduzione (ON) mentre durante la fase inattiva (livello basso) il transistor va in interdizione (OFF).

All'aumentare della tensione continua di regolazione  $V_i$ , il comparatore genera impulsi con livello alto di durata sempre maggiore e l'ampiezza della componente continua della forma d'onda  $V_0$  indicata con  $V_{med} \equiv V_a$  (tensione d'armatura del motore) aumenta incrementando la velocità di rotazione dell'albero motore.

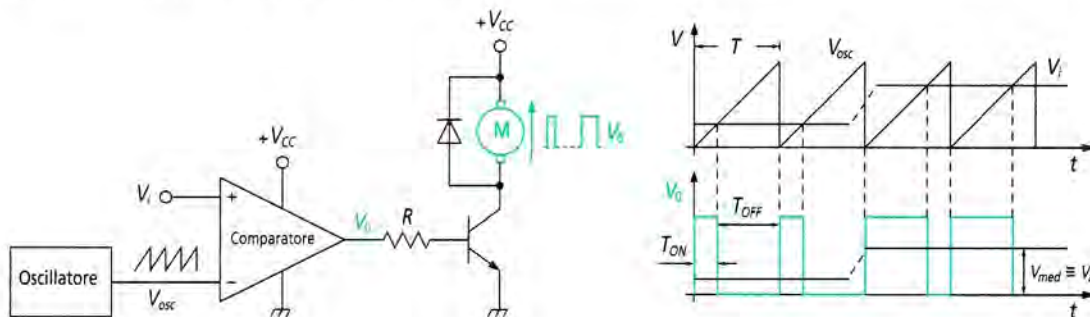


figura 1.17



### 1.4.4 Utilizzando Multisim

Le forme d'onda della **figura 1.17** possono essere visualizzate utilizzando Multisim. Si disegna lo schema elettrico di **figura 1.18** che contiene:

- la tensione d'alimentazione  $V_{CC} = V1$ ;
- l'oscillatore con forma triangolare ( $V_{osc} = 12\text{ V}$  e  $f = 10\text{ kHz}$ );
- il potenziometro  $R_p = R_2$  per variare la tensione continua  $V_i$  della PWM da 0 V a 12 V;
- il comparatore LM311N;
- la sonda Probe 1 che misura la tensione continua  $V_i$ ;
- il multimetro in DC per la misura della tensione continua d'uscita  $V_o$  coincidente con  $V_a$ ;
- l'oscilloscopio a 4 tracce che visualizza tre tracce dei segnali  $V_i$ ,  $V_{osc}$  e  $V_o$ ;
- l'analizzatore di spettro che visualizza lo spettro del segnale d'uscita comprensivo della componente continua.

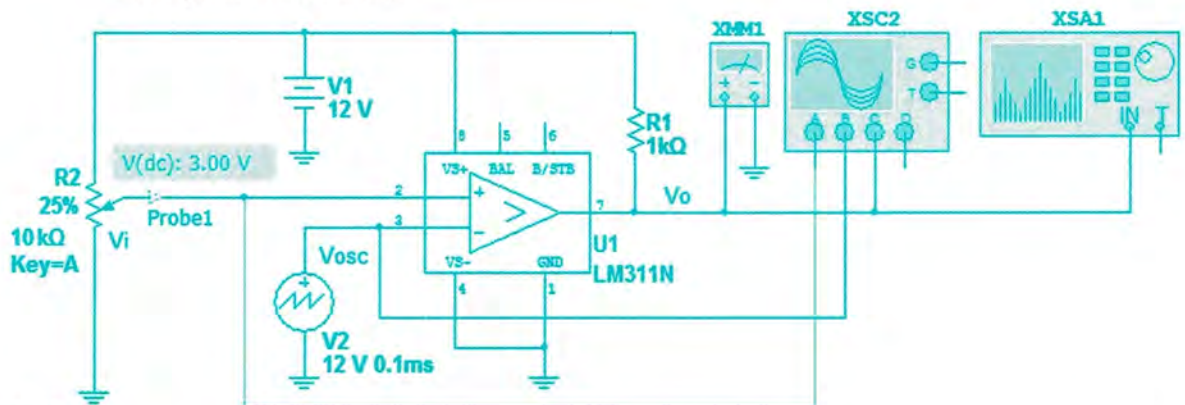


figura 1.18

Per la simulazione si fissa la percentuale del potenziometro  $R_2$  uguale al 25%. La **figura 1.19** visualizza i segnali  $V_i$ ,  $V_{osc}$  e  $V_o$ . La posizione dei due cursori permette di misurare il perio-



figura 1.19



do del segnale PWM ( $T_2 - T_1 = 100.147 \mu\text{s}$ ), la tensione  $V_i = 3.000 \text{ V}$  (canale A) e il livello massimo della tensione PWM  $V_0 = 12 \text{ V}$  (canale B).

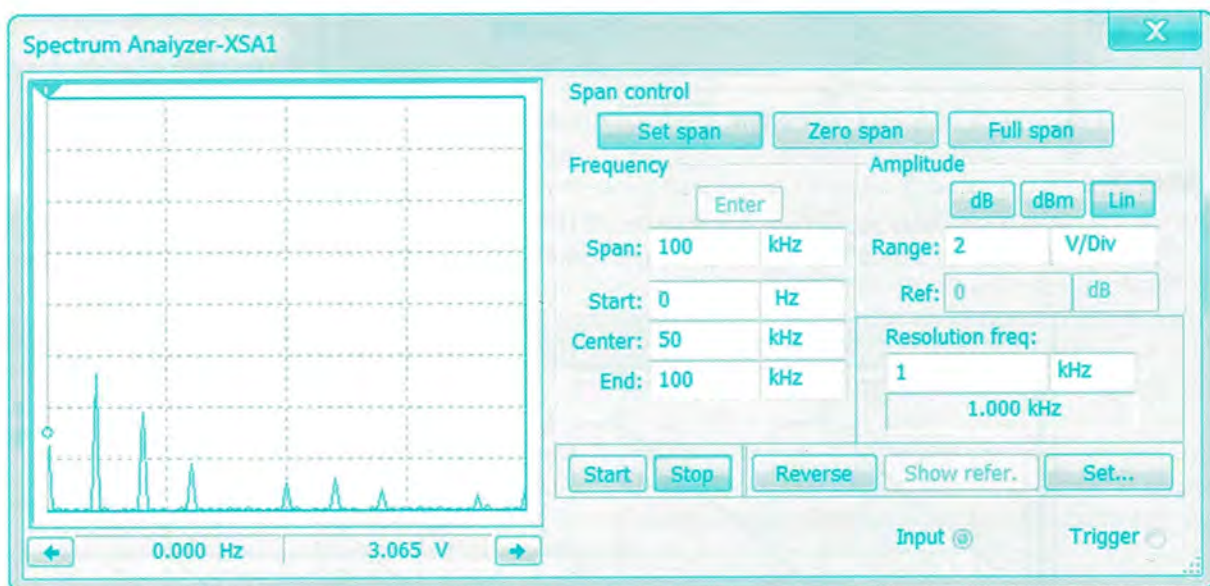
La **figura 1.20** visualizza la tensione continua (componente continua) del segnale d'uscita  $V_0$ .



**figura 1.20**

La **figura 1.21** visualizza lo spettro del segnale d'uscita  $V_0$  la cui componente continua è uguale a 3.065 V.

L'operatore può variare il valore in percentuale del potenziometro che fissa il valore della tensione d'ingresso  $V_i$  e osservare come si modificano sia i valori numerici che le forme d'onda.



**figura 1.21**

### esempio 1.1

*Si progetti un sistema di controllo a catena aperta della velocità di un motore in C.C. a magnete permanente.*

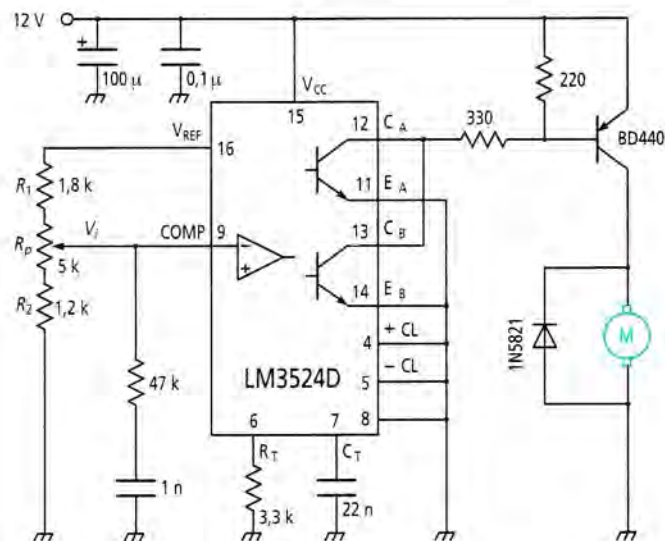
Nell'ipotesi di utilizzare la tecnica PWM, il circuito proposto è basato sull'integrato LM3524D perché contiene tutti i dispositivi necessari per la regolazione a catena aperta e chiusa.

Nella pratica si utilizzano circuiti integrati dedicati perché contengono tutti i dispositivi necessari per la regolazione. L'integrato LM3524D, ad esempio, contiene:

- un regolatore interno  $V_{REF} = 5 \text{ V} \pm 1\%$  ( $I = 50 \text{ mA}$ ) con una tensione d'alimentazione  $8 \text{ V} < V_{CC} < 40 \text{ V}$ ;
- un oscillatore a dente di sega la cui frequenza  $f \approx 1/R_T \cdot C_T$  ( $f_{max} \geq 100 \text{ kHz}$ ) è fissata dalla resistenza  $R_T$  ( $1,8 \text{ k}\Omega < R_T < 100 \text{ k}\Omega$ ) e dal condensatore  $C_T$  ( $0,001 \mu\text{F} < C_T < 0,1 \mu\text{F}$ );
- un amplificatore errore e un comparatore;
- un amplificatore limitatore di corrente utilizzato negli alimentatori SWITCHING;
- una logica di controllo per i due transistor finali interni ( $I_C = 100 \text{ mA}$  ciascuno);
- due ingressi di controllo per l'abilitazione e la compensazione.

Lo schema elettrico funzionale del regolatore di velocità PWM a catena aperta è riportato nella figura 1.22.

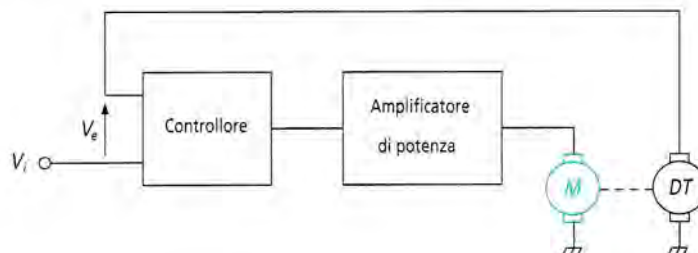
figura 1.22



Considerato che la tensione a dente di sega deve avere una frequenza superiore a 10 kHz, si utilizza una resistenza  $R_T = 3,3 \text{ k}\Omega$  e un condensatore  $C_T = 22 \text{ nF}$ . Poiché l'ampiezza dell'onda triangolare ha un valore compreso tra 0,8 V e 3,8 V i valori delle resistenze del partitore sono:  $R_1 = 1,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1,8 \text{ k}\Omega$  e  $R_P = 5 \text{ k}\Omega$ . La regolazione lineare di velocità si ottiene variando il valore della resistenza  $R_P$ .

La tecnica di controllo PWM permette anche la regolazione di velocità a catena chiusa utilizzando: un amplificatore errore (controllore), un amplificatore di potenza in grado di pilotare il motore in C.C. e una dinamo tachimetrica collocata sulla catena di reazione (figura 1.23).

figura 1.23



Nella figura 1.24 è riportato lo schema elettrico di un sistema di regolazione a catena chiusa con inversione del senso di rotazione che utilizza il dispositivo L292 della SGS-Thomson perché in esso sono integrati il generatore d'impulsi PWM e il circuito di potenza a ponte.

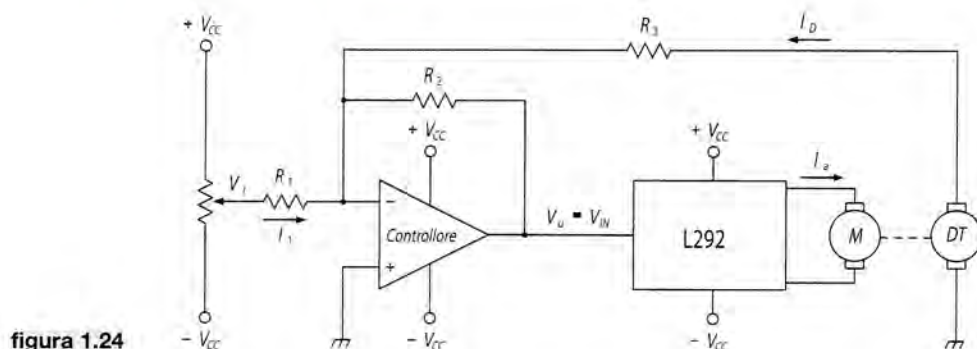


figura 1.24

L'integrato L292 eroga un'intensità di corrente  $I_a$  alla tensione d'ingresso  $V_{IN}$  secondo la relazione  $I_a = K \cdot V_{IN}$ . Una variazione di carico sull'albero motore genera una variazione d'intensità di corrente  $I_a$  erogata dall'integrato e, conseguentemente, una variazione di  $V_{IN}$  dovuta alla sola variazione della tensione della dinamo tachimetrica  $E_{DT}$ . Poiché quest'ultima genera una variazione di corrente  $I_D$  sulla resistenza  $R_3$ , si dimostra che la variazione del numero di giri  $\Delta n$  è proporzionale alla variazione della corrente  $\Delta I_a$  e il coefficiente di proporzionalità è dato dal rapporto  $R_3/R_1$ . Si deduce che la variazione del numero di giri è tanto più sentita quanto più è grande  $R_3$  rispetto a  $R_1$ .

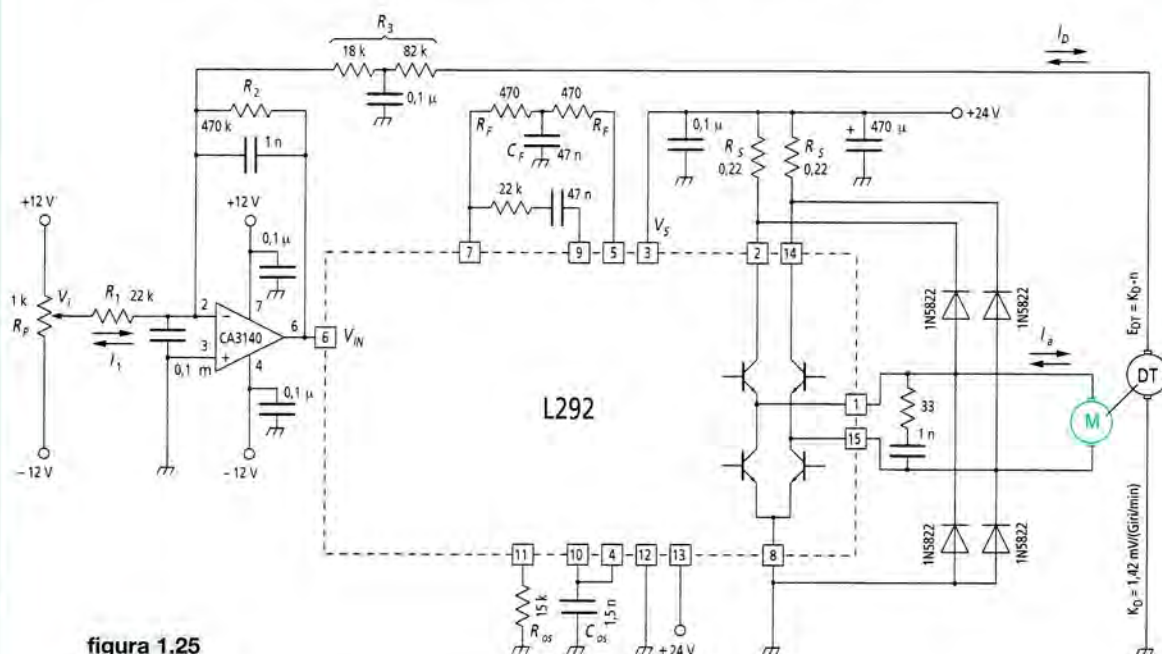


figura 1.25

Dall'analisi della **figura 1.25** e dalla lettura dei data sheets si ricavano le seguenti informazioni:

- i componenti  $R_{OS}$  e  $C_{OS}$  (pin 10 e 11) determinano la frequenza dell'oscillatore;
- le resistenze  $R_S$  e l'amplificatore CS (Current Sense) assicurano la proporzionalità tra l'intensità di corrente assorbita dal motore e la tensione di controllo;
- la rete  $R_F C_F$  filtra la tensione generata dall'amplificatore interno CS;
- la resistenza  $R_3$  limita l'intensità di corrente della dinamo tachimetrica e unitamente al condensatore di  $0,1 \mu F$  filtra la tensione generata dalla dinamo tachimetrica;
- il trimmer  $R_P$  determina la velocità e il verso di rotazione.



La **figura 1.26** mostra la scheda utilizzata nella prova di funzionamento con il potenziometro multigiro a filo per la regolazione della velocità, l'integrato L292 con il dissipatore e i morsetti per il motore in C.C. e la dinamo tachimetrica.

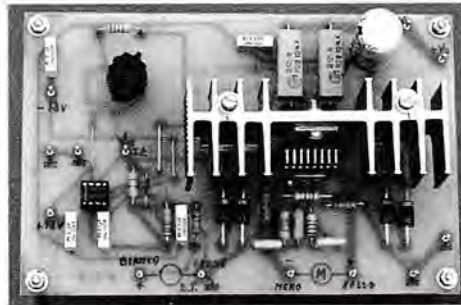


figura 1.26

## 1.5 Motore senza spazzole (Brushless)

Nel motore a corrente continua (**figura 1.27**) il dispositivo collettore-spazzole è sottoposto a un continuo sfregamento e pertanto, nel tempo, si usura. Inoltre il salto delle spazzole da una sezione di collettore all'altra produce **scintillazioni** dovute al carico di natura induttiva (spira) con disturbi elettromagnetici.

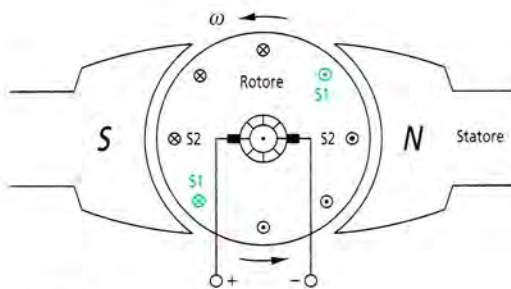


figura 1.27



figura 1.28

Il motore Brushless (detto anche motore senza spazzole) può essere costruito per il funzionamento in corrente continua o per quello in corrente alternata.

Il motore Brushless in corrente continua (**figura 1.28**) elimina i disturbi prodotti dal motore in corrente continua poiché il dispositivo collettore-spazzole è sostituito da un commutatore elettronico rendendo il motore senza spazzole.

Le parti che costituiscono il motore Brushless (**figura 1.29**) sono identiche a quelle del motore in corrente continua ma con disposizione invertita, ossia:

- il rotore è un magnete permanente ad alto flusso che permette di ridurre le dimensioni;
- lo statore (o circuito di armatura) è un elettromagnete che contiene l'avvolgimento (o più avvolgimenti);
- il dispositivo collettore-spazzole è sostituito da un circuito elettronico e da un rilevatore angolare.

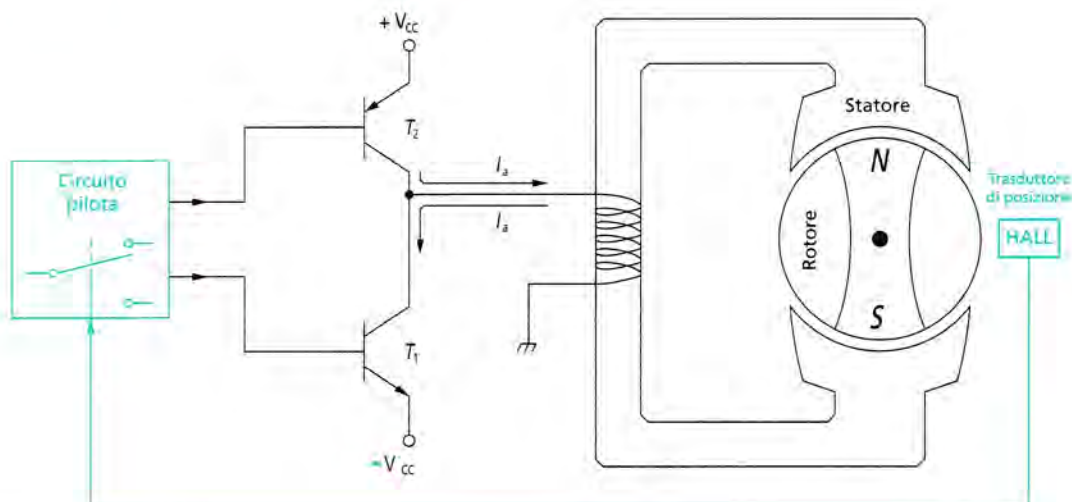


figura 1.29

### ■ Sistema rilevatore

Il rilevatore è un sistema di posizione che può essere un encoder, un resolver o un trasduttore magnetico. Quest'ultimo è costituito da:

- un magnete permanente calettato sull'albero motore;
- un trasduttore HALL che rileva la posizione del rotore mediante la posizione della polarità *N* o *S* del magnete e di conseguenza inverte il verso della corrente nell'avvolgimento.

Come si può osservare dalla **figura 1.29** l'inversione della polarità si ottiene sul circuito di armatura che è la parte fissa del motore Brushless. Questa particolare condizione elimina la parte in movimento del collettore del motore in corrente continua.

### ■ Circuito elettronico

È costituito da un circuito pilota (deviatore elettronico), da due transistor: NPN e PNP e da un'alimentazione duale simmetrica.

Il trasduttore HALL rileva la posizione del magnete e se, ad esempio, è nella posizione *N* attiva il funzionamento del transistor  $T_1$  facendo scorrere la corrente dalla massa a  $-V_{cc}$ . Quando il magnete è nella posizione *S* invece attiva il transistor  $T_2$  che inverte il verso della corrente nell'avvolgimento.

Il motore Brushless ha le stesse caratteristiche del motore in C.C. con la stessa relazione di coppia  $C_m = K_T \cdot I_a$  dove:

- $C_m(t)$  è la coppia motrice;
- $K_T$  è la costante di coppia;
- $I_a$  è l'intensità di corrente d'armatura.

### ■ Motore senza spazzole a 3 fasi

Il motore commerciale Brushless con prestazioni migliori si ottiene con 3 avvolgimenti sfasati di  $120^\circ$ . Questo tipo di costruzione rende la coppia motrice più uniforme.

Per ciascun avvolgimento è presente un trasduttore HALL (o una coppia di LED e Fototransistor) che rileva la posizione del rotore, la sincronizza con l'alimentazione attiva della fase statorica che fa fluire nell'avvolgimento l'intensità di corrente  $I_a$  generatrice della coppia  $C_m$  per una rotazione di un angolo meccanico di  $120^\circ$ . In pratica il commutato-

re meccanico (collettore del motore in corrente continua) è sostituito, nei motori Brushless a 3 fasi, da 3 trasduttori HALL. Questi rilevano istante per istante la posizione del rotore tramite un disco sul quale è disposto un piccolo magnete permanente calettato sull'albero del rotore. Il disco è suddiviso in 3 parti come il numero delle fasi che attivano in sequenza, tramite la logica di controllo, i 3 interruttori elettronici per una rotazione completa di  $360^\circ$  (figura 1.30).

La presenza della logica di controllo complessa rende però il motore più costoso nei confronti di quelli in corrente continua.

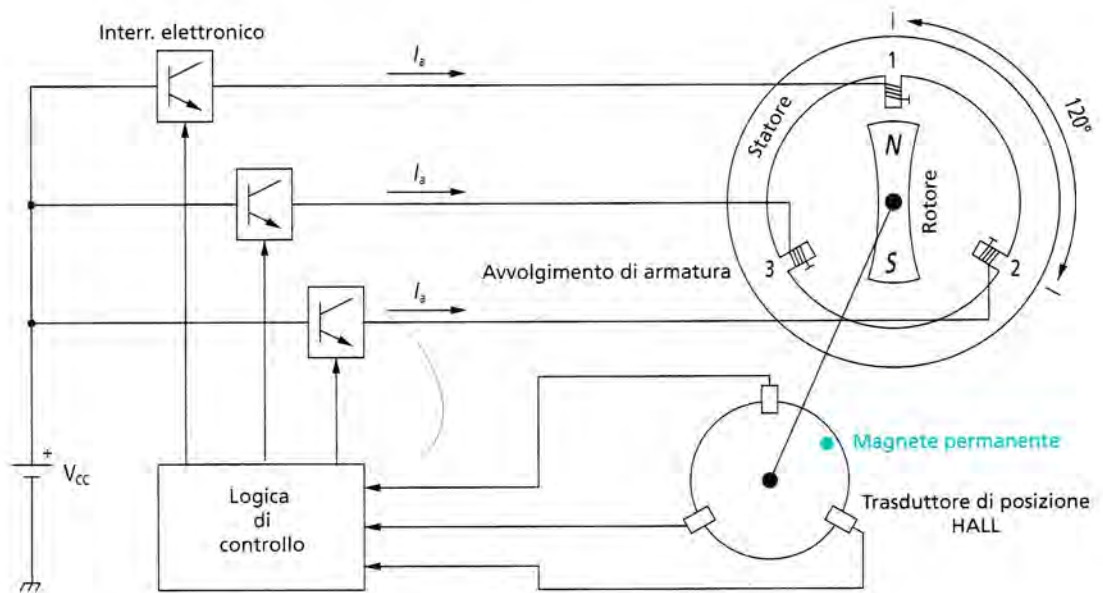


figura 1.30

L'inversione del verso di rotazione si ottiene invertendo il verso della corrente  $I_a$  negli avvolgimenti sostituendo i transistor di figura 1.29 con una coppia di transistor NPN e PNP portando in saturazione il transistor  $T_2$  o  $T_1$  (figura 1.31).

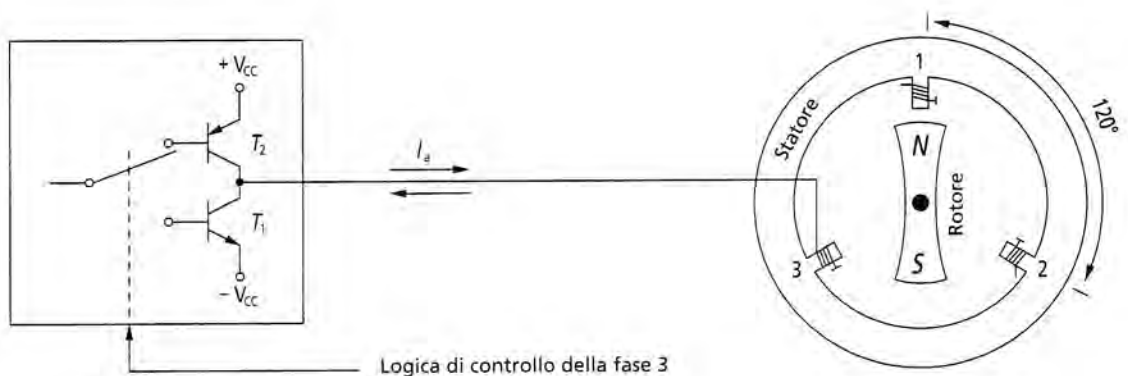


figura 1.31



### ■ Caratteristiche e impiego motori Brushless

Le principali caratteristiche del motore Brushless sono:

- affidabilità;
- elevata precisione;
- ottimo rendimento;
- coppia di spunto elevata;
- momento d'inerzia piccolo;
- ridotta manutenzione;
- riduzione sia delle dimensioni sia dei pesi;
- versatilità nella tensione di alimentazione.

Per potenze di piccole entità trovano impiego per:

- funzionamento continuo;
- controllo elettronico della velocità.

### ■ Controllo velocità motore Brushless

La velocità di rotazione del motore Brushless può essere controllata con la tecnica di tipo PWM agendo sulle singole fasi. Alcuni integrati commerciali dedicati al pilotaggio dei motori Brushless in corrente continua sono prodotti dalla SGS Thomson:

- L6230 Bidirezionale 3 fasi;
- L6231 3 fasi.

L'elevata precisione nella versione in corrente continua li rende utili per il posizionamento come nelle stampanti, negli H.D. Nella versione sia in corrente continua sia in corrente alternata trovano largo impiego nelle applicazioni in cui gli attuatori richiedono specifiche prestazioni nel movimento di assi nelle macchine utensili a controllo numerico anche se la maggior diffusione applicativa è nel campo della robotica.

## 1.6 Motore universale

Alcune macchine utensili di piccole dimensioni e piccole potenze come i trapani, le mole portatili, le elettroseghe, alcuni elettrodomestici, ecc. sono dotati di **motori universali** che hanno il pregio di funzionare sia con tensione continua che con tensione alternata (**figura 1.32**).



figura 1.32

Questo tipo di macchina elettrica ha una struttura identica a quella del motore in corrente continua. A differenza di quest'ultimo lo statore, formato da un pacchetto di lamierini con due poli salienti (sporgenti rispetto allo statore), contiene un avvolgimento per l'eccitazione costituito con poche spire e grande sezione che genera il campo magnetico di armatura.

L'avvolgimento di eccitazione, collegato in serie all'avvolgimento rotorico, è alimentato dalla stessa alimentazione del rotore formando un motore in corrente continua con eccitazione serie (figura 1.33).

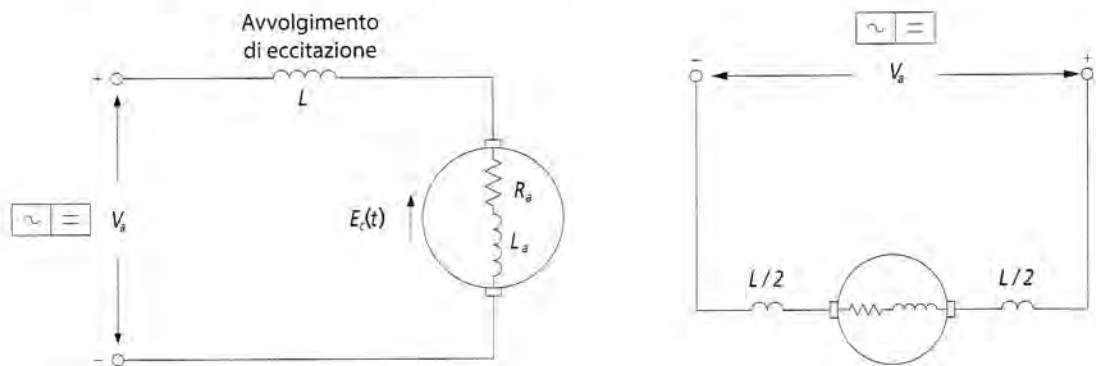


figura 1.33

Generalmente in serie all'avvolgimento di campo statorico sono collegati anche due bobine di filtro per attenuare i disturbi di scintillio dovute alle spazzole che strofinano sul collettore. L'indotto è come quello del motore in corrente continua con funzionamento analogo se alimentato con una tensione continua. Se alimentato con una tensione alternata quando questa inverte la polarità con il collettore-spazzole inverte anche la polarità sulla bobina di eccitazione collegata in serie mantenendo il verso di rotazione. Per contro questa particolarità, molto utile per il funzionamento, non permette l'inversione di rotazione del rotore.

Il diagramma di figura 1.34 mostra le curve caratteristiche del numero di giri  $N$  in funzione della coppia motrice  $C$  di un motore universale alimentato in corrente continua e in corrente alternata con eccitazione in serie. Come si può osservare il numero di giri a parità di coppia motrice, è diverso per le rispettive alimentazioni.

La prestazione della macchina elettrica può essere all'incirca identica disponendo più spire nell'avvolgimento principale quando l'alimentazione è in corrente continua.

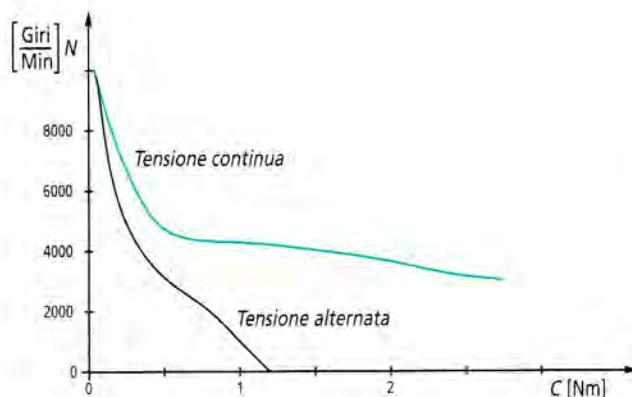
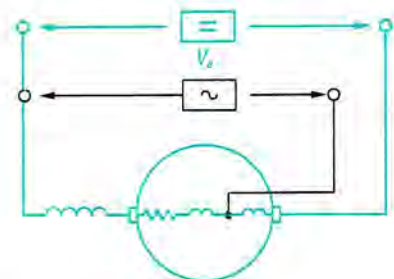


figura 1.34



Con l'alimentazione in corrente alternata, invece, si può ottenere la regolazione di velocità modificando il valore efficace della tensione con parzializzazione di fase mediante TRIAC.

## Test di verifica

■ Stabilisci se le seguenti affermazioni sono vere o false.

1. La coppia motrice  $C_m(t)$  del motore in C.C. è proporzionale della tensione di armatura.  
☐ vero  
☐ falso
2. La legge di equilibrio elettrico del motore in C.C. è una equazione differenziale del 2° ordine.  
☐ vero  
☐ falso
3. Il collettore nel motore in C.C. alimenta, tramite le spazzole, le singole spire del rotore.  
☐ vero  
☐ falso
4. Una macchina elettrica in C.C. è detta reversibile perché può funzionare sia come motore che come generatore.  
☐ vero  
☐ falso
5. La tensione pilota per la regolazione lineare di velocità di un motore in C.C. è una tensione di tipo TTL.  
☐ vero  
☐ falso
6. Il segnale PWM è un'onda quadra con impulsi modulati in larghezza.  
☐ vero  
☐ falso
7. Il motore in C.C. può essere alimentato con la tecnica PWM perché si comporta come un filtro passa-basso.  
☐ vero  
☐ falso
8. Il motore Brushless è definito anche come un motore senza spazzole.  
☐ vero  
☐ falso
9. Nel motore Brushless il rotore contiene l'avvolgimento.  
☐ vero  
☐ falso
10. Il motore universale può funzionare con l'alimentazione sia in alternata sia in continua.  
☐ vero  
☐ falso



# Servomotori, servosistemi e servomeccanismi

## 3.1 Servomotori

Il servomotore, inizialmente definito come un **motore ausiliario**, è un qualsiasi motore di piccola o media potenza con caratteristiche molto raffinate utilizzato in un sistema di controllo semplice o complesso per comandi di movimenti (angolari e lineari) precisi e rapidi. È quindi un **attuatore** di uscita del sistema di controllo che fornisce potenza al carico controllato in un **movimento** generalmente **angolare** o **lineare**. Se pilotato con apparecchiature elettroniche dedicate, l'albero di rotazione segue rigorosamente il segnale pilota per un controllo di posizione (servomeccanismo) o di velocità (servosistema). Il dispositivo trasforma in **energia meccanica** altre **energie** come quella:

- ▶ **idraulica** (motore idraulico);
- ▶ **pneumatica** (motore pneumatico a palette con turbina ad aria di **figura 3.1** che mostra un motore con un solo senso di rotazione e un altro con doppio senso di rotazione);
- ▶ **elettrica** (motore elettrico).

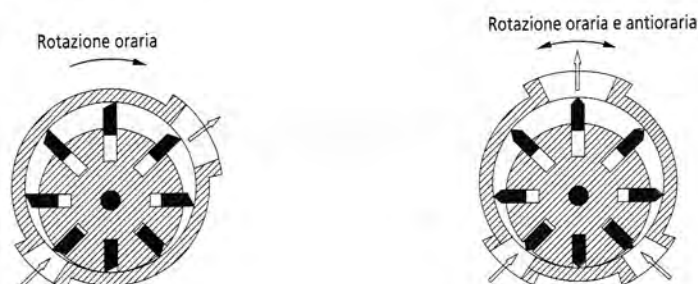


figura 3.1

Nel campo applicativo, indipendentemente dal tipo, deve avere alcuni requisiti fondamentali quali:

- ▶ fornire la potenza richiesta dal carico;
- ▶ fornire la potenza di picco richiesta dal carico;
- ▶ fornire la potenza perduta dall'eventuale motoriduttore aggiunto;
- ▶ accelerare il carico collegato come richiesto dal sistema di controllo.

### 3.1.1 Servomotore elettrico

È un motore elettrico in C.C. (**figura 3.2**) modificato sia nella parte meccanica sia in quella elettrica per avere i requisiti richiesti dal sistema come le continue e rapide accelerazioni e le alte coppie di spunto.



figura 3.2

Per soddisfare tali requisiti il servomotore deve avere una piccola costante elettrica e una piccola costante meccanica tali da far raggiungere, nel minor tempo possibile e senza oscillazioni, la condizione finale richiesta. Se utilizzato nei modellismi e nella robotica deve avere un elevato rapporto potenza/peso, mentre nei sistemi di controllo a elevate prestazioni deve avere un elevato rapporto coppia/inerzia.

Generalmente i modelli in commercio per servosistemi e servomeccanismi sono forniti in combinazione con la dinamo tachimetrica, l'encoder, il riduttore, il freno e la ventilazione.

### 3.1.2 Servomotore con dinamo tachimetrica

Il motore è in C.C. a magnete permanente. Sull'albero del rotore è collegato l'albero di trascinamento della dinamo tachimetrica (D.T.) con un accoppiamento diretto senza giunto eliminando elasticità, gioco e vibrazioni torsionali. Questo tipo di servomotore

risulta adatto nelle applicazioni di servosistemi come il controllo di velocità (→ Unità 3 del presente Modulo). Nella **figura 3.3** è mostrato un servomotore con dinamo tachimetrica le cui caratteristiche sono riportate nella **tabella 3.1**.



figura 3.3

tabella 3.1

Tachometer - Gen		Motor Generator	
14,2 VOLTS/KRPM		MODEL E576-000	Serial C
RIPPLE 5% P-P MAX	$R_G$ 660 OHMS	RATED 30 VOLTS	2,1 AMPS CONT
		Torque 12 OZ-IN CONT	$R_A = 3$ OHMS
		$K_T = 7,5$ OZ-IN/AMPS	

### 3.1.3 Servomotore con encoder

Il motore è in C.C. a magnete permanente. Sull'albero del rotore è collegato l'albero di trascinamento dell'encoder (incrementale o assoluto) con un accoppiamento diretto senza giunto eliminando elasticità, gioco e vibrazioni torsionali. A volte contiene anche il riduttore per ridurre il numero di giri aumentandone la coppia. Questo tipo di servomotore

risulta adatto nelle applicazioni di controllo di posizione (servomeccanismo) e di velocità (servosistema). Nella **figura 3.4** è mostrato un servomotore con encoder incrementale e riduttore le cui caratteristiche sono riportate nella **tabella 3.2**.



figura 3.4



tabella 3.2

Modello M 9234 Portescap		
Rated torque	43	mNm
Stall torque	300	mNm
No-load speed	6200	rpm
Speed regulation constant	21	rpm/mNm
Rotor inertia	41,7	kgm <sup>2</sup> x 10 <sup>-7</sup>
Mechanical time constant	9	ms
Thermal time constant	11,4	minutes
Thermal resistance rotor-stator	8,7	°C/W
Thermal resistance stator-ambient	7,7	°C/W
Static friction torque	4,2	mNm
Viscous damping constant	2,61	Nms x 10 <sup>-6</sup>
Motor weighy	290	g
Motor length L <sub>1</sub>	61,0	mm
Measuring voltage	12	V
Torque constant	18,3	mNm/A
Back-EMF constant	1,9	V/krpm
Termin resistance	0,8	ohm
Inductance	0,6	mH
No-load current	0,33	A
Stall current	14,5	A
Riduttore		
K 38.0	60 : 1	CW
Encoder		
3 Channels	TTL	100 to 512

### 3.1.4 Servomotore per robotica e modellismo

Il servomotore per modellismo deriva dal motore in C.C. È di piccole dimensioni (**figura 3.5**) ed è utilizzato nei modelli delle automobili, degli elicotteri, delle navi, dei robot, ecc. Lo statore è costruito con magneti ceramici che consentono di concentrare il flusso magnetico sul rotore realizzato con lamierini magnetici a basse perdite e avvolgimenti in fili di rame nudo isolato. La **tabella 3.3** riporta le caratteristiche di un tipico servomotore per modellismo.

figura 3.5



tabella 3.3

Servo 213		
Alimentazione	5 ÷ 7,2	Vdc
Coppia di torsione	13	kg/cm
Velocità	0,16	s/60°
Dimensioni	41 x 20,1 x 38	mm
Peso	55	g



Il servomotore, racchiuso in un contenitore, è costituito da:

- un motore in C.C.;
- un riduttore meccanico a ingranaggi per aumentare la coppia;
- un circuito elettronico di controllo;
- un potenziometro per la regolazione della rotazione dell'albero di uscita;
- tre fili: due per l'alimentazione e il terzo per il segnale di controllo.

## 3.2 Servosistemi e servomeccanismi

Un sistema si dice controllato se una o più grandezze d'uscita assumono, nel tempo, i valori desiderati.

Ad esempio, in un alternatore per la produzione di energia elettrica deve essere controllata la frequenza della tensione sinusoidale generata (grandezza controllata) per mantenerla costante al variare del carico elettrico.

L'esempio descritto è un controllo (o regolazione) di un sistema a catena chiusa (→ Volume 1, Modulo 1, Unità 1) nel quale l'insieme delle regolazioni sulle variabili del processo portano l'uscita al valore desiderato, a meno di un errore prestabilito, indipendentemente dai disturbi.

I sistemi di regolazione automatica sono, per lo più, a catena chiusa e possono essere classificati in:

- **regolatori** se la grandezza d'ingresso controlla quella di uscita mantenendola in un intervallo predefinito (controllo di temperatura);
- **servosistemi** se la grandezza d'ingresso controlla quella di uscita in modo continuo nel tempo confrontandola istante per istante con quella di riferimento. In generale nei servosistemi (o controllo di processo) sono controllate grandezze fisiche, chimiche, ecc. come la temperatura, la pressione, il livello, la portata, ecc.;
- **servomeccanismi** se la grandezza di uscita è di natura meccanica (controllo cinetico come il controllo di posizione);
- **regolatori a valori programmati** se le grandezze controllate sono più di una e devono assumere nel tempo un andamento prestabilito compiendo un ciclo programmato (lavastoviglie, lavatrici).

Per esempio, il sistema di regolazione di tensione di un alimentatore in C.C. stabilizzato mantiene la tensione di uscita costante indipendentemente dalle variazioni di carico e da quelle della tensione d'alimentazione in corrente alternata.

Il sistema di regolazione della temperatura in un forno mantiene la temperatura interna costante, impostata con una temperatura di riferimento, indipendentemente dalle dispersioni di calore.

Il sistema di regolazione di velocità dell'albero di un motore elettrico mantiene la velocità di rotazione al valore prefissato, indipendentemente dalle variazioni della coppia resistente. Alcuni autori definiscono questa regolazione come un servomeccanismo (controllo cinetico).

### 3.2.1 Servosistemi

Nei servosistemi la grandezza di uscita è regolata da un segnale errore  $E$  diverso da zero che è la differenza tra il segnale di uscita (grandezza controllata) e quello di riferimento (grandezza d'ingresso). Nella **figura 3.6** è riportato un servosistema per il controllo di velocità dell'albero di un motore elettrico in C.C.

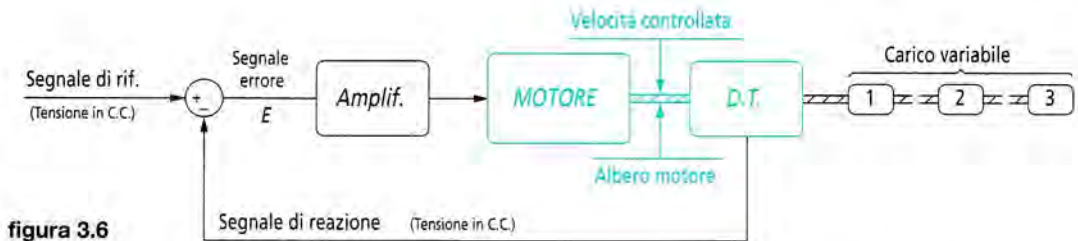


figura 3.6

In verità la dinamo tachimetrica (D.T.) è il trasduttore da disporre sulla linea di retroazione che converte la velocità di rotazione dell'albero motore proporzionale a una tensione continua  $V_{DT}$  confrontabile con quella di riferimento (figura 3.7). Se aumenta il carico trascinata dal motore:

- diminuisce la velocità di rotazione dell'albero;
- diminuisce la tensione generata dalla dinamo tachimetrica;
- aumenta la tensione errore  $E$ , differenza tra la  $V_{Rif}$  e  $V_{DT}$ .

L'aumento della tensione errore  $E$ , amplificata, incrementa la tensione d'alimentazione del motore ripristinando (in tempi brevi) la velocità di rotazione iniziale.

Si fa notare che anche quando l'albero del motore gira a vuoto (senza carico) il motore deve produrre una coppia tale da vincere le resistenze meccaniche. In altre parole quando il motore gira a vuoto (motore alimentato) la tensione errore  $E$  deve essere necessariamente diversa da zero anche se con un valore molto piccolo.

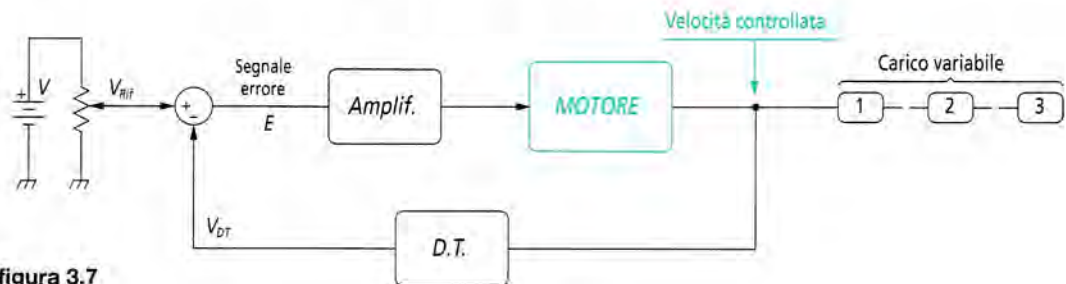


figura 3.7

### 3.2.2 Servomeccanismi

I servomeccanismi controllano una grandezza di uscita di natura meccanica, generalmente una posizione angolare o una posizione lineare il controllo delle quali si ottiene mediante servomotori elettrici in C.C. In questi controlli, in condizioni di regime, la tensione errore  $E$  è nulla, a differenza dei controlli di velocità in cui la tensione errore  $E$  è sempre diversa da zero.

La figura 3.8 mostra uno schema a blocchi di un servomeccanismo di posizione angolare. La tensione di uscita  $V_{Reaz}$  (posizione angolare  $\vartheta_v$ ) è confrontata con quella d'ingresso  $V_{Rif}$  (posizione angolare  $\vartheta_r$ ). Entrambe le tensioni sono prodotte da potenziometri rotativi con lo stesso valore resistivo  $R_p$ .

Se i due angoli sono diversi, la tensione errore  $E$  è diversa da zero. L'amplificatore  $A$  amplifica il segnale errore  $E$  che attiva il motore modificando la posizione dell'angolo di uscita. Quando i due angoli sono uguali, la tensione errore  $E$  è nulla e il motore non sviluppa alcuna coppia (motore fermo).



Il verso di rotazione dell'albero motore è dovuto al segno della tensione errore  $E$ . Quando  $\vartheta_I > \vartheta_U$  la tensione  $V_{Rif}$  è maggiore di quella di reazione  $V_{Reaz}$ , il segnale errore  $E$  è positivo e l'amplificatore (con alimentazione duale) attiva il motore con una tensione positiva. Quando  $\vartheta_I < \vartheta_U$  il segnale errore  $E$  diviene negativo invertendo la coppia motrice.

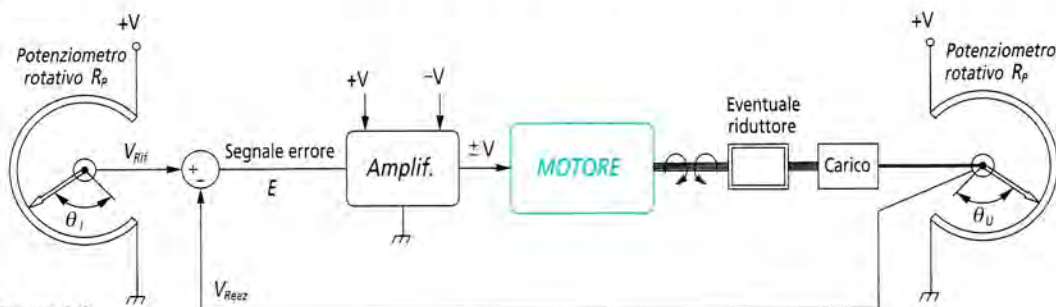


figura 3.8

I servomeccanismi come controlli di posizione sia angolare sia lineare sono alla base del funzionamento dei piccoli robot per generare i movimenti, ottenibili con servomotori, di rotazione o spostamento dei bracci (figura 3.9).

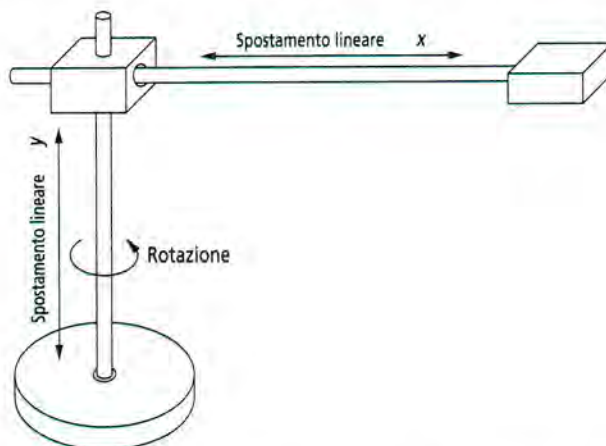


figura 3.9

I componenti utilizzati nei servomeccanismi possono essere elettrici, elettronici, meccanici, idraulici, pneumatici che possono essere combinati tra loro in vari modi.

In generale i servosistemi sono dispositivi di controllo complessi e di alta precisione nei quali la variabile controllata segue, istante per istante, la variazione della grandezza di riferimento, anche in presenza di eventuali disturbi, fornendo alla grandezza controllata la potenza necessaria per il funzionamento richiesta dai dispositivi da attivare.

Il servosterzo di un'automobile (figura 3.10) fa seguire alle ruote direzionali, istante per istante, la posizione angolare impostata dall'autista. La potenza che occorre per azionare il sistema (massima con auto ferma) non è prodotta dall'uomo ma è generata da servomotori.



figura 3.10



Il primo servomeccanismo, costruito solo con parti meccaniche, è quello di J. Watt per la regolazione automatica di velocità angolare dell'albero motore delle macchine a vapore. È costituito da un parallelogramma (pendolo centrifugo), alcune sfere metalliche e un collare mobile (**figura 3.11**).

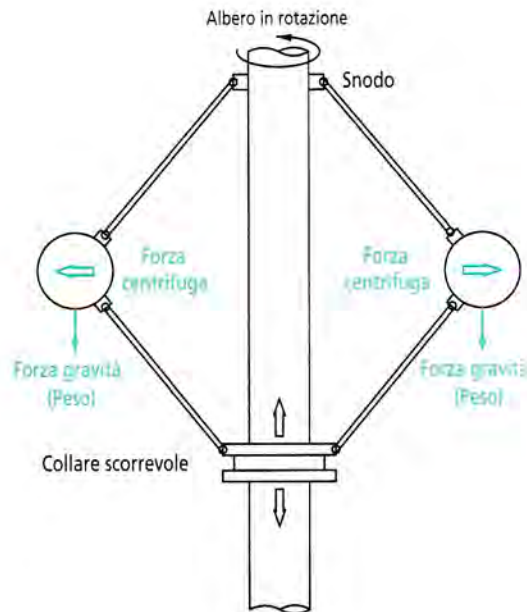


figura 3.11

Con l'albero in rotazione le sfere metalliche (masse rotanti) tendono ad allontanarsi dall'albero per effetto delle forze centrifughe quanto più è alta la velocità di rotazione (**figura 3.12**). Il collare mobile, collegato alle masse rotanti con le aste, scorre sull'albero e trasforma la velocità radiale in uno spostamento assiale ossia trasforma la velocità angolare in una velocità lineare.

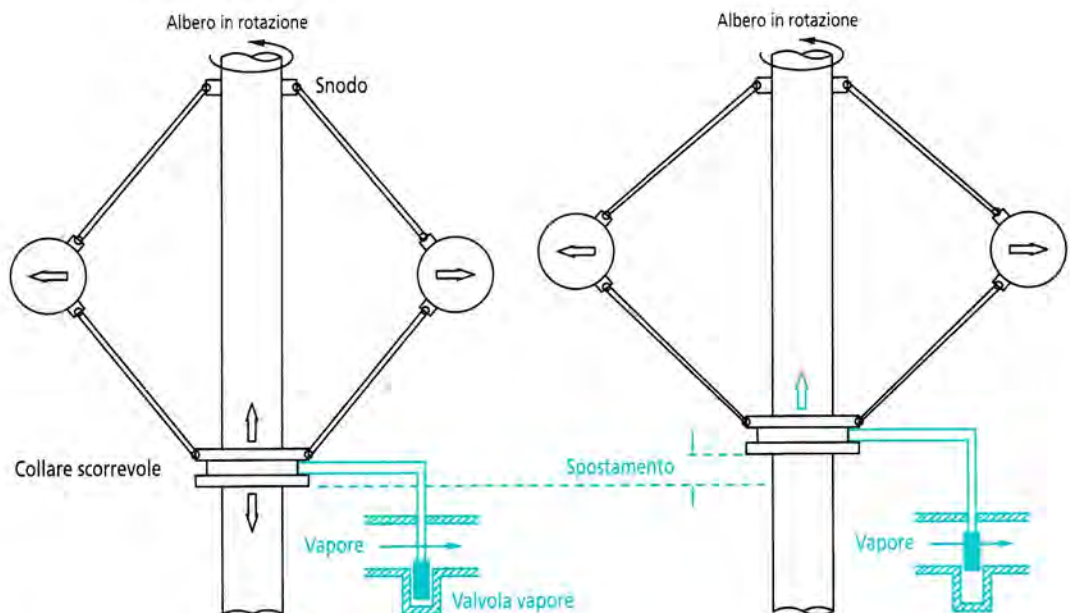
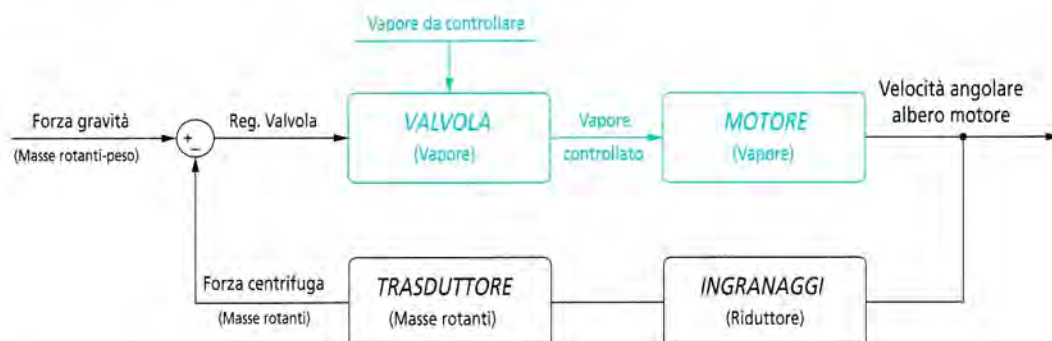


figura 3.12

Nella **figura 3.12** è riportato il regolatore di Watt con due velocità angolari diverse. La figura di destra, con velocità angolare maggiore, mostra la posizione che assume il collare e la relativa traslazione in alto che subisce trasferendola all'asta che attiva la valvola vapore.

Il sistema, retroazionato, confrontando la forza centrifuga (grandezza di retroazione) con la forza di gravità (grandezza di riferimento) regola la velocità di rotazione dell'albero che è la grandezza controllata (**figura 3.13**). Come si può osservare le masse rotanti sono soggette sia alla forza di gravità sia a quella centrifuga.



**figura 3.13**

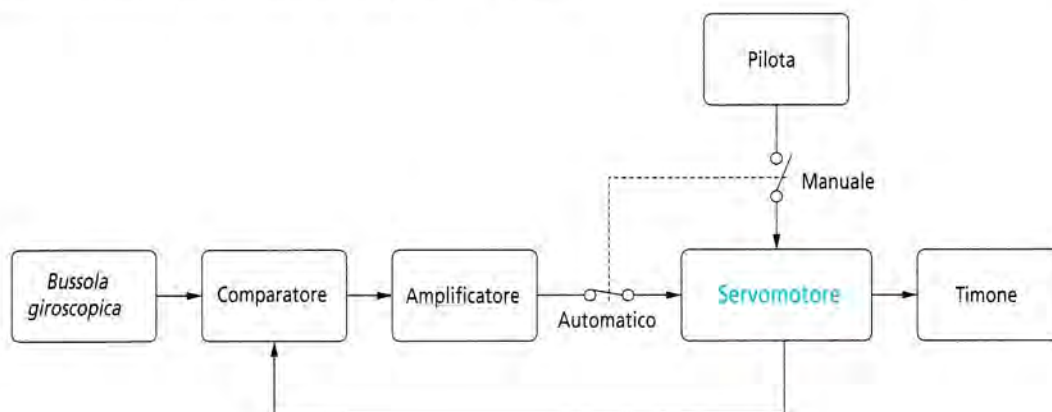
I tipi di servomeccanismi sono numerosi e sono utilizzati in svariati mezzi (automobili, navi, elicotteri, aerei, apparecchi per riprese televisive, ecc.).

Senza entrare in merito al complicato funzionamento, per il quale si rimanda a testi specifici, si riporta lo schema a blocchi di un pilota automatico d'aereo. Il pilota di un aereo per mantenere la rotta può inserire, una volta che l'aereo è stato portato sulla rotta stabilita, il pilota automatico costituito da un sofisticato servomeccanismo.

La bussola giroscopica rileva la deviazione casuale dell'aereo dalla rotta stabilita generando un segnale compatibile con quello di retroazione.

Il comparatore genera il debole segnale errore che, per essere utilizzato, deve essere amplificato in potenza.

L'amplificatore (elettronico) comanda un servomotore (elettrico) che ridispone il timone sulla direzione della rotta da seguire (**figura 3.14**).



**figura 3.14**

## Test di verifica

■ Stabilisci se le seguenti affermazioni sono vere o false.

1. Il servomotore e il motore elettrico in C.C. hanno le stesse caratteristiche.  
☐ vero  
☐ falso
2. Il servomotore utilizzato nei servosistemi e servomeccanismi contiene l'encoder o la dinamo tachimetrica.  
☐ vero  
☐ falso
3. Il servomotore per modellismo è un particolare dispositivo che contiene anche un circuito elettronico di controllo.  
☐ vero  
☐ falso
4. Il servosistema è un controllo di processo per grandezze di diversa natura (fisiche, chimiche, ecc.).  
☐ vero  
☐ falso
5. Il servosistema e il servomeccanismo hanno lo stesso significato.  
☐ vero  
☐ falso
6. Il segnale errore  $E$  nei servosistemi reazionati assume anche il valore nullo.  
☐ vero  
☐ falso
7. Il servomeccanismo è un controllo di qualsiasi tipo.  
☐ vero  
☐ falso
8. Nel servomeccanismo la potenza che aziona il dispositivo di movimento è fornita dal servomotore.  
☐ vero  
☐ falso
9. Il regolatore di Watt è un controllo di posizione.  
☐ vero  
☐ falso
10. Il regolatore di Watt trasforma uno spostamento lineare in una velocità angolare.  
☐ vero  
☐ falso



# Generatori elettrici

I generatori elettrici sono macchine dinamiche che trasformano energia meccanica (causa) in energia elettrica (effetto). Il principio di funzionamento è basato sul fenomeno della induzione elettromagnetica (→ Forze elettromotrici e campo magnetico rotante su [www.auladigitale.rcs.it](http://www.auladigitale.rcs.it)).

La struttura della macchina generatrice è costituita da:

- un sistema induttore che genera un campo magnetico;
- un sistema indotto nel quale si generano le forze elettromotrici indotte.

Il campo magnetico può essere generato da:

- un magnete permanente (statore). La macchina è a poli esterni e l'energia elettrica è prodotta sul rotore;
- un avvolgimento di eccitazione sullo statore alimentato in corrente continua che genera il campo magnetico. La macchina è a poli esterni e l'energia elettrica è prodotta sul rotore;
- un avvolgimento di eccitazione alimentato in corrente continua per la generazione del campo magnetico disposto sul rotore. La macchina è a poli interni ed è detta **alternatore**. L'energia elettrica è prodotta sullo statore.

La produzione di energia elettrica può essere in corrente:

- continua;
- alternata monofase;
- alternata trifase.

Un qualsiasi generatore elettrico si può schematizzare con una spira che ruota, intorno al suo asse, con velocità angolare costante  $\omega$  in un campo magnetico  $B$  uniforme generato da un magnete permanente. La **figura 4.1** mostra il modello di un generatore elettrico che genera una tensione alternata (sinusoidale) prelevata con contatti (spazzole) che strisciano su due anelli.

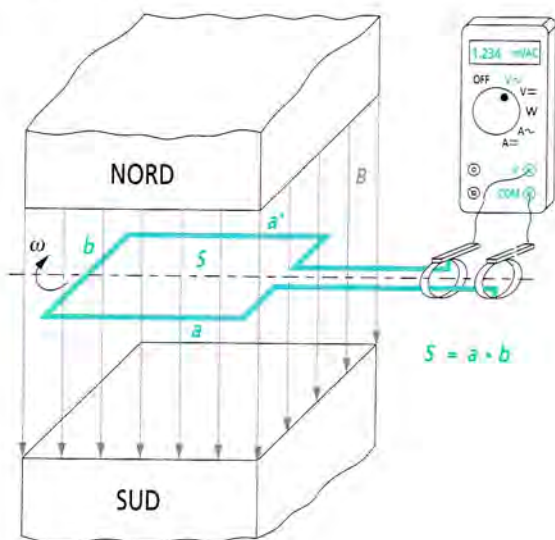
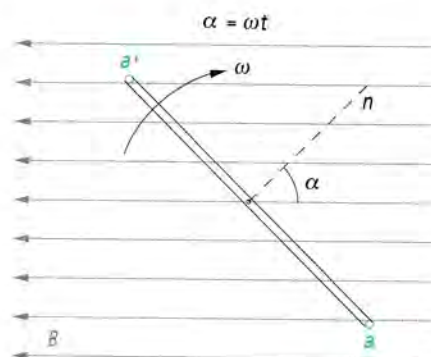


figura 4.1

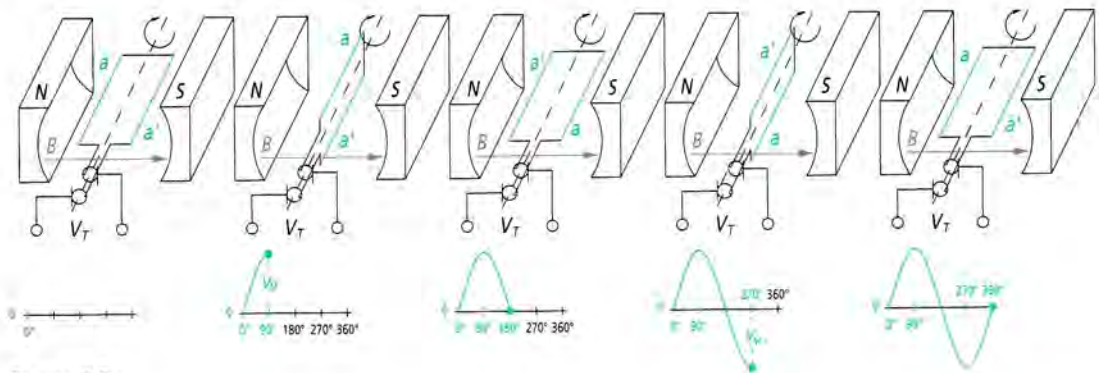


La tensione d'uscita disponibile sui due contatti striscianti è dovuta alla variazione di flusso  $\phi$  per la diversa superficie  $S$  della spira investita dal campo magnetico  $B$ . Si ha, con riferimento alla **figura 4.1**:

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = \phi_M \cdot \cos \omega t$$

$$v(t) = -\frac{d\phi}{dt} = \omega \cdot \phi_M \cdot \sin \omega t = V_M \cdot \sin \omega t \quad [4.1]$$

La **figura 4.2** mostra come si genera l'onda sinusoidale per una rotazione completa della spira a passi di  $90^\circ$ .



**figura 4.2**

Dalla **figura 4.2** e dalla [4.1] risulta evidente che:

- se la spira è in posizione orizzontale (1° caso), la superficie  $S$  esposta all'investimento del campo magnetico  $B$  è nulla rendendo nulla anche la  $v(t)$ ;
- se la spira è in posizione verticale (2° caso) la superficie  $S$  esposta all'investimento del campo magnetico  $B$  è massima rendendo massima anche la  $v(t)$ .

## 4.1 Generatore in corrente continua (dinamo)

Il generatore in corrente continua (dinamo) è costituito da un sistema che produce un campo magnetico (induttore) e da un altro sistema che subisce l'azione del campo magnetico (indotto).

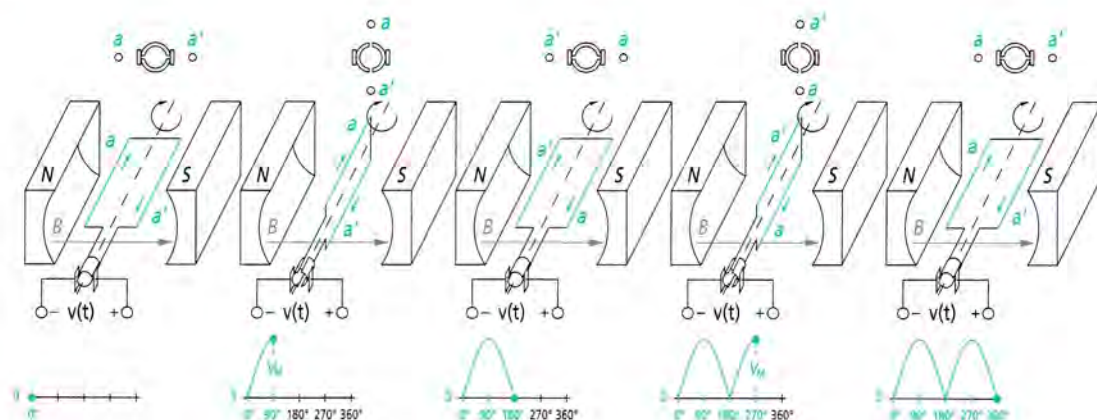
Il modello del generatore in corrente continua è simile a quello che produce una tensione alternata.

La spira ruota, anche in questo caso, in un campo magnetico uniforme  $B$  generato da un magnete permanente.

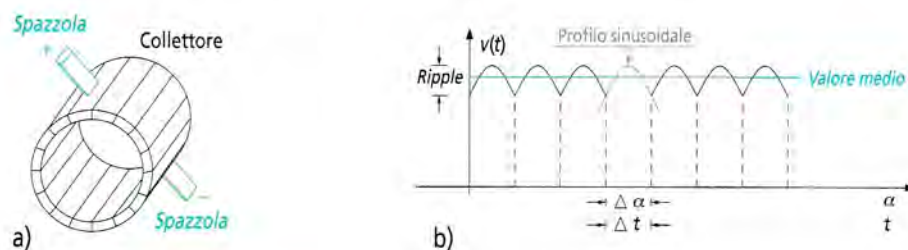
Come si può osservare dalla **figura 4.3** i due anelli sono stati sostituiti con due semianelli che trasformano la tensione alternata in una tensione raddrizzata a doppia semionda (pulsante) o, per meglio dire, una tensione unidirezionale.

Per rendere la tensione quasi continua l'elemento mobile (rotore) contiene molte spire ognuna collegata a una coppia di piccole porzioni di anelli che formano il collettore configurato come un dispositivo con la funzione di commutatore (**figura 4.4a**).

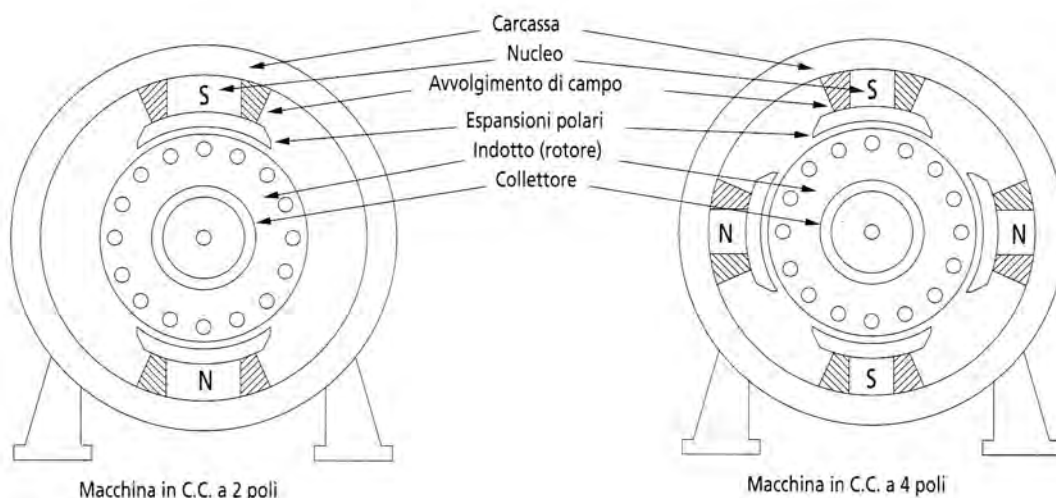



**figura 4.3**

Le spazzole striscianti sono collegate a una spira solo per un breve intervallo di tempo (o angolo di rotazione  $\Delta\alpha$ ), durante il quale la tensione d'uscita  $v(t)$  è massima poiché la spira presenta la massima superficie alle linee di induzione magnetica. In tal caso la tensione d'uscita è costituita da un segnale quasi continuo e il ripple è tanto minore quanto più è elevato il numero di spire (**figura 4.4b**).


**figura 4.4**

Nelle macchine moderne il campo magnetico è generato da avvolgimenti disposti sui nuclei polari dello statore (**figura 4.5**). La tensione continua d'uscita è prelevata sul collettore del rotore.


**figura 4.5**



Nell'avvolgimento di campo fluisce una corrente generata da una tensione continua (generatore a eccitazione indipendente). L'intensità di corrente di eccitazione  $I_e$  porta il circuito magnetico in saturazione e sul collettore si preleva la tensione d'uscita continua a vuoto  $V_0$  (figura 4.6).

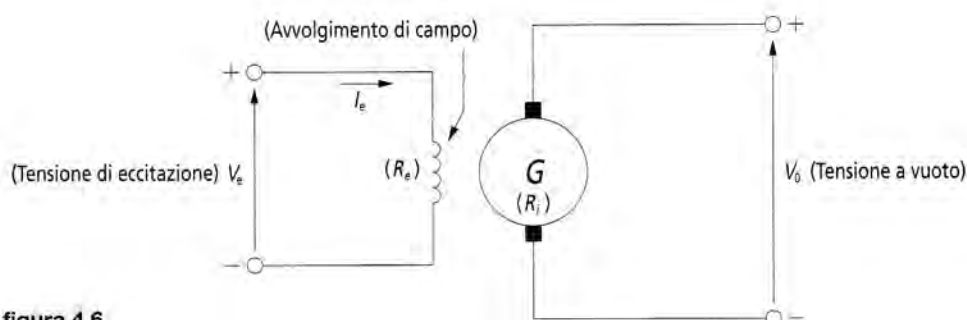


figura 4.6

Collegando un carico sui morsetti d'uscita, nell'avvolgimento rotorico scorre una corrente  $I_a$  che a sua volta genera un campo trasversale annullato da opportuni avvolgimenti di compensazione (non riportati in figura). La tensione  $V_u$  a carico è data dalla relazione:

$$V_u = V_0 - R_i \cdot I_a - V_s$$

dove:

- $R_i$  è la resistenza degli avvolgimenti indotti;
- $V_s$  è la caduta di tensione sulle spazzole (trascurabile).

Perché la tensione d'uscita sotto carico  $V_u$  non si discosti di molto da quella a vuoto  $V_0$  è necessario compensarla aumentando la corrente di eccitazione  $I_e$  con un reostato (figura 4.7).

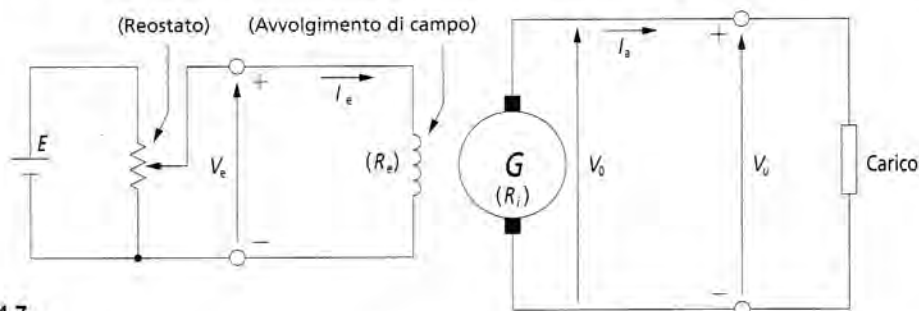


figura 4.7

Se l'alimentazione di campo deriva dalla tensione d'uscita si realizza un generatore a eccitazione in derivazione che può essere di tipo parallelo o serie (figura 4.8).

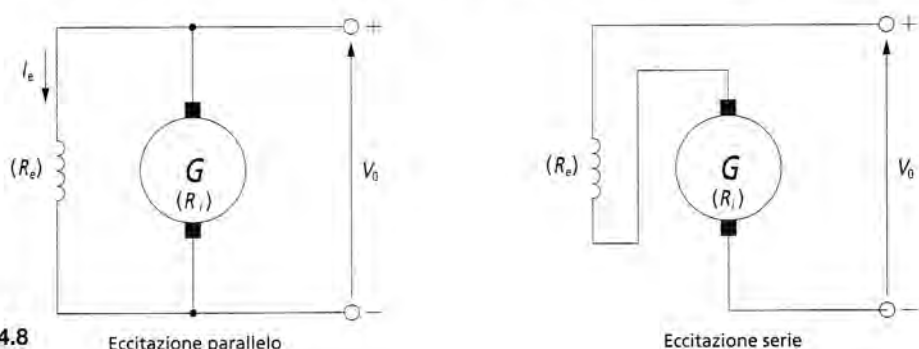


figura 4.8