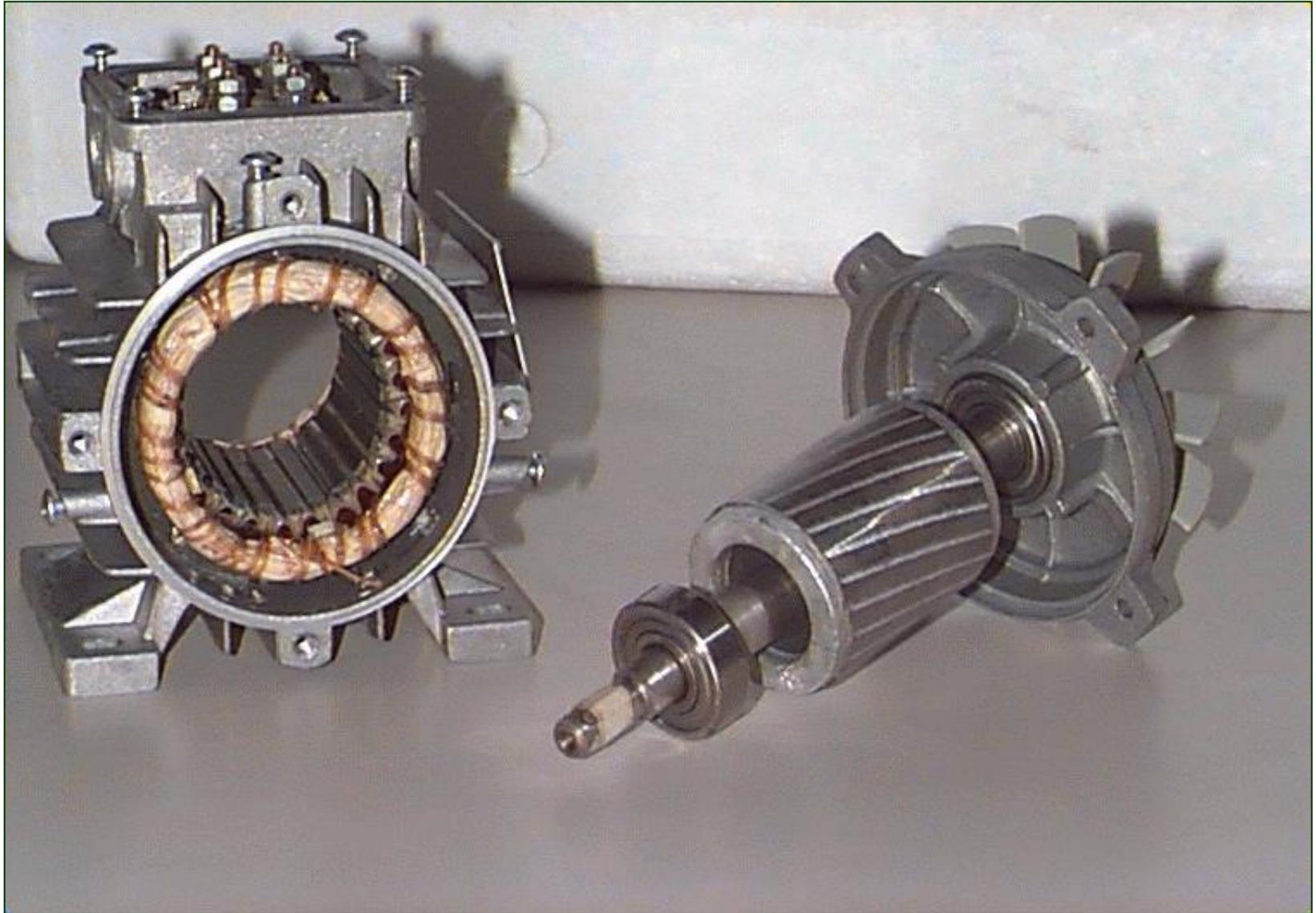
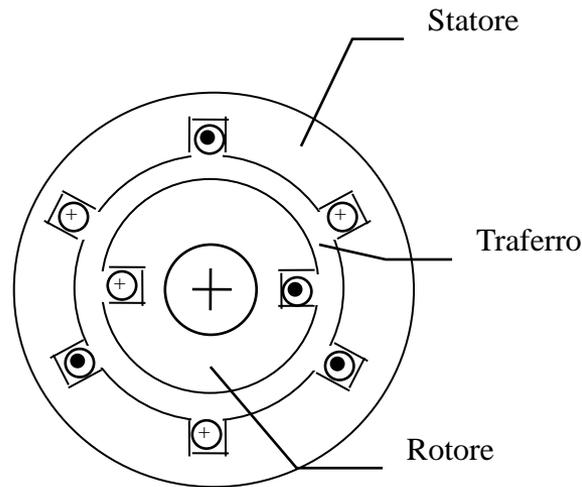


MACCHINE ASINCRONE

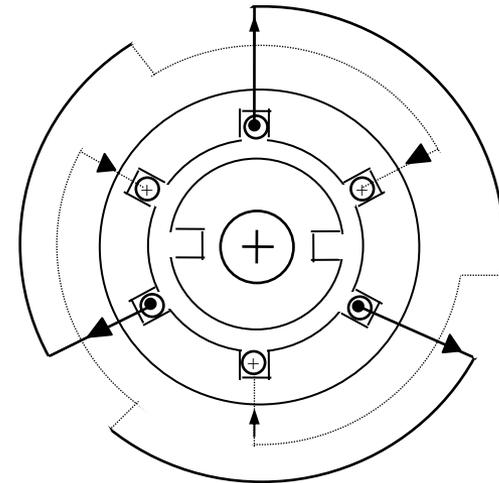
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE



CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE



Sezione mediana di una macchina elettrica a traferro costante



Collegamenti dei lati attivi dell'avvolgimento sulla testata

Una macchina elettrica rotante è costituita da due serie di circuiti montati su due strutture in ferro. La struttura esterna solitamente è ferma e viene detta **statore**, la seconda è in moto e viene detta **rotore**.

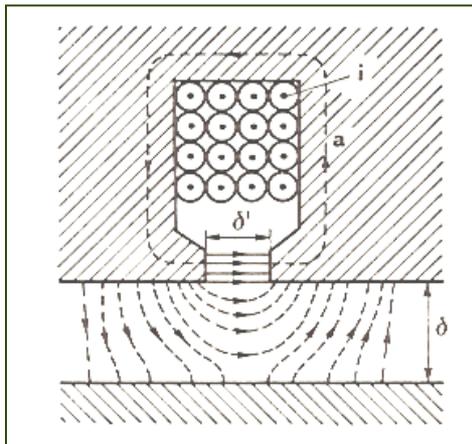
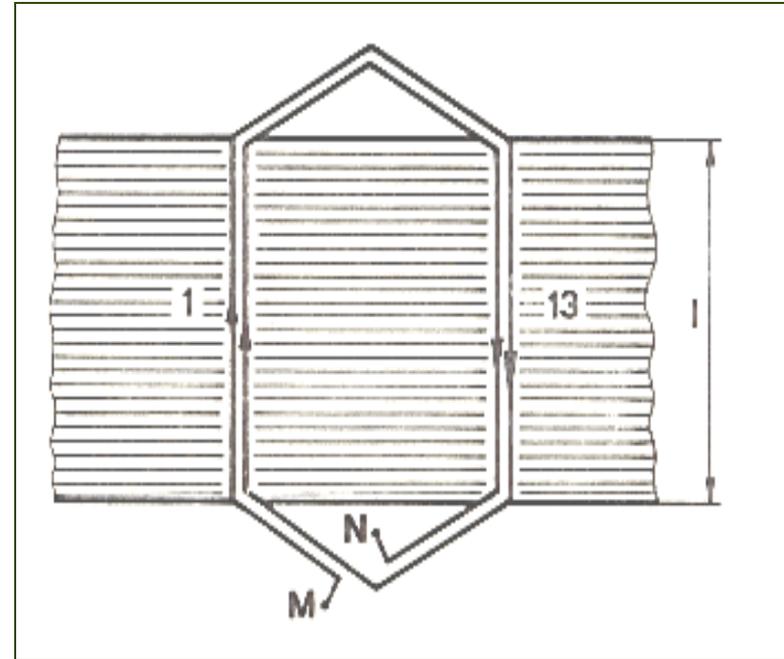
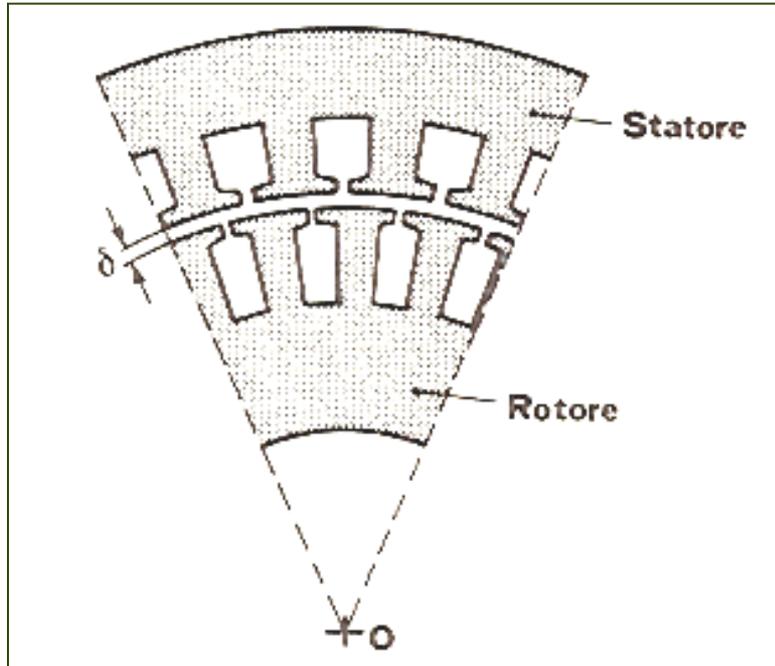
Le due strutture in ferro sono separate da un **traferro** di aria per consentire la rotazione senza attrito del rotore rispetto allo statore

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE



Corona di statore e rotore di una macchina asincrona

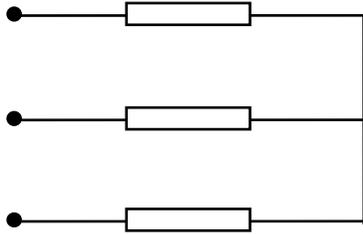
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE



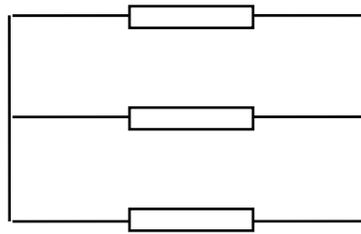
- la **permeabilità del ferro** si suppone **infinita**
- la distribuzione del campo magnetico si ritiene identica in tutti i piani perpendicolari all'asse della macchina;
- l'andamento delle linee del **campo magnetico al traferro** si suppone **radiale**.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Avvolgimento di
statore



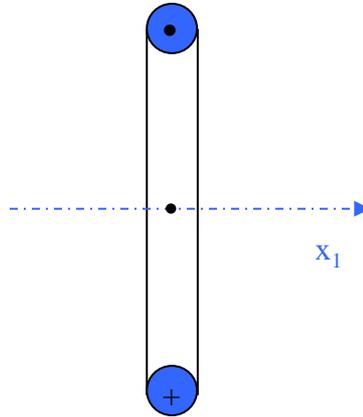
Avvolgimento di
rotore



Nelle cave di rotore e statore sono alloggiati due **avvolgimenti trifase** aventi lo **stesso passo polare**. L'avvolgimento di statore può essere collegato a stella (come illustrato nella figura), oppure a triangolo, mentre **l'avvolgimento di rotore viene chiuso in corto circuito**.

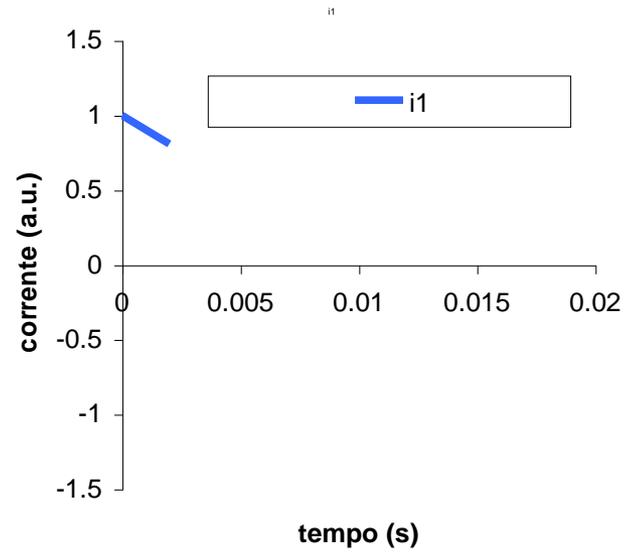
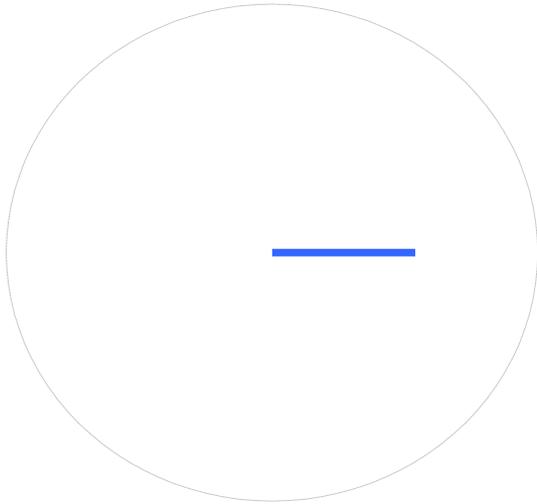
- Una volta alimentato con una terna di tensioni concatenate simmetriche aventi una pulsazione ω , l'avvolgimento di statore viene percorso da una terna equilibrata di correnti. **Le correnti di statore generano al traferro** della macchina **un campo rotante**, con velocità angolare $\omega_c = \omega/p$ (p = numero di coppie di poli).
- Il campo rotante di statore induce f.e.m. negli avvolgimenti di rotore; essendo questi chiusi in c.c. **nell'avvolgimento di rotore circola un sistema di correnti equilibrato**.
- L'interazione della corrente di rotore con il campo di statore (forza di Lorentz) genera un sistema di forze agenti sui lati attivi dell'avvolgimento di rotore che ha una **coppia risultante non nulla rispetto all'asse di rotazione** della macchina e tende a portare in rotazione il rotore nello stesso verso del campo di statore

CAMPO ROTANTE

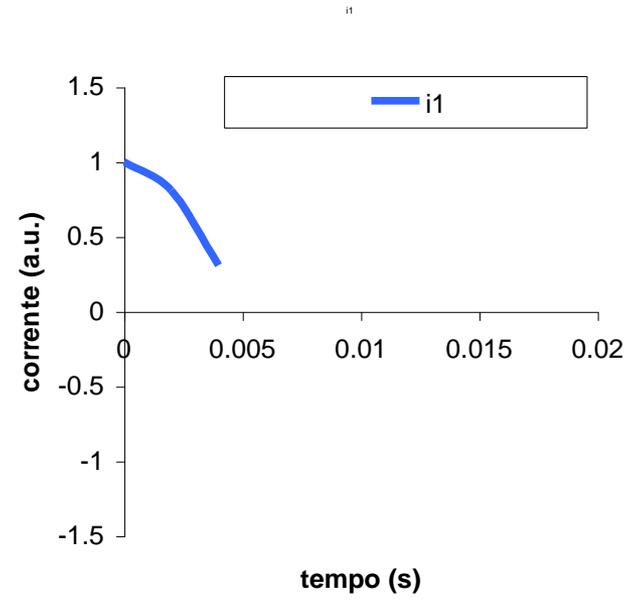
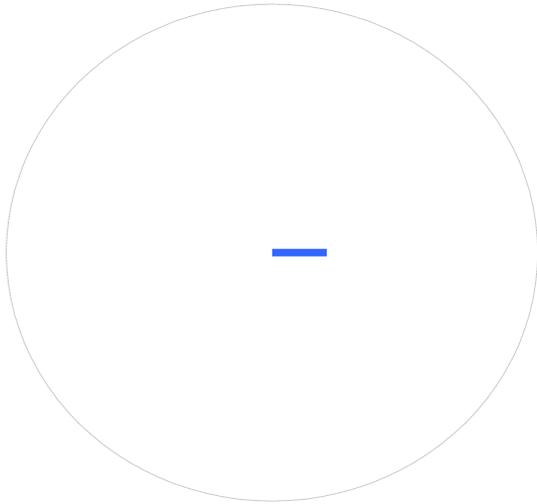


Una spira percorsa da corrente alternata produce un campo magnetico alternato

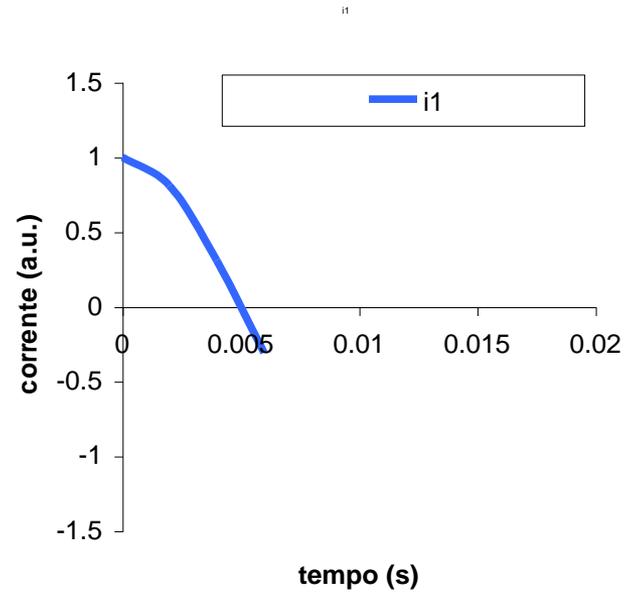
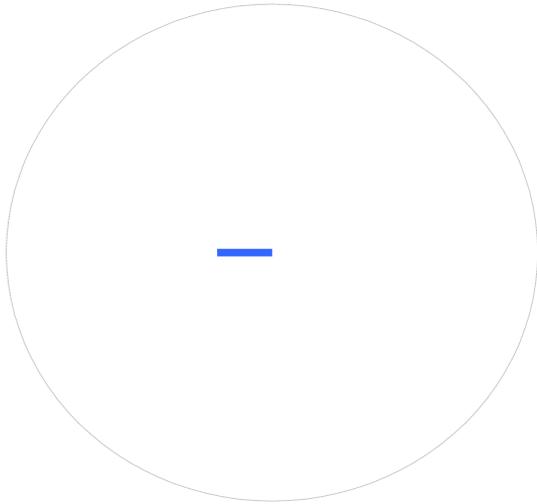
B1



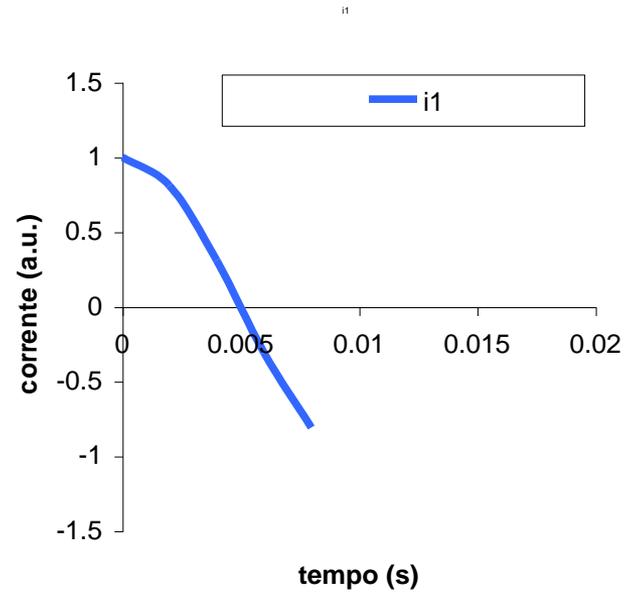
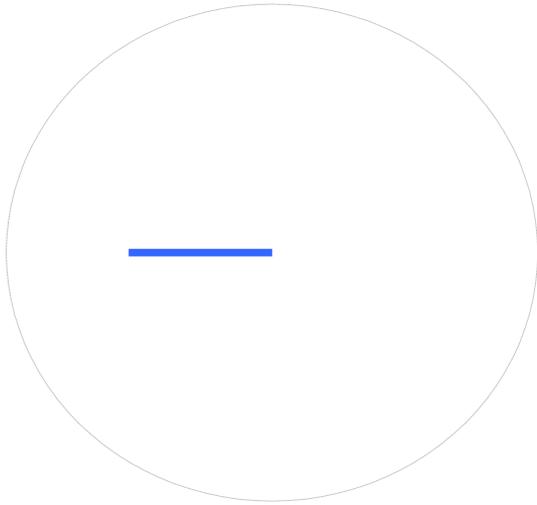
B1



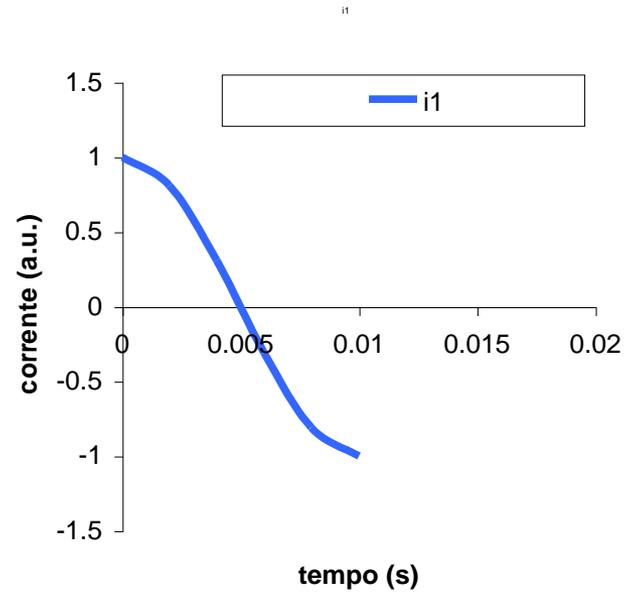
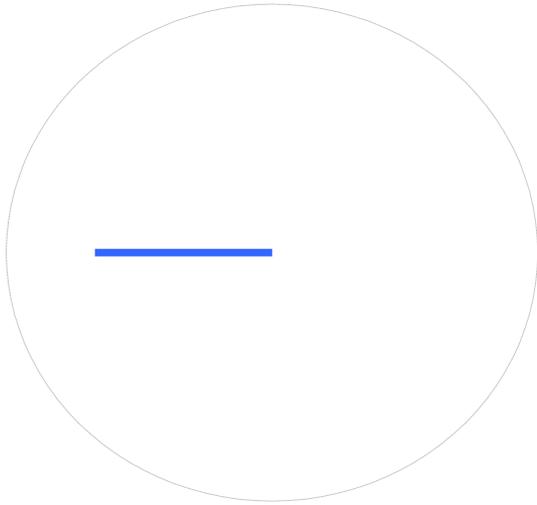
B1



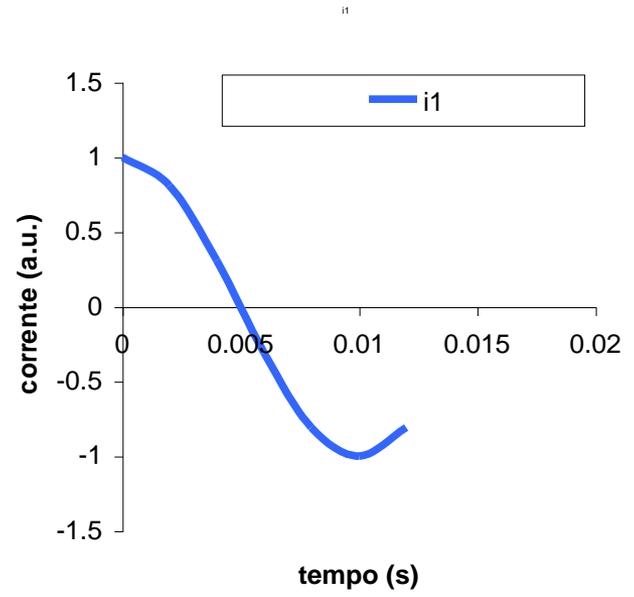
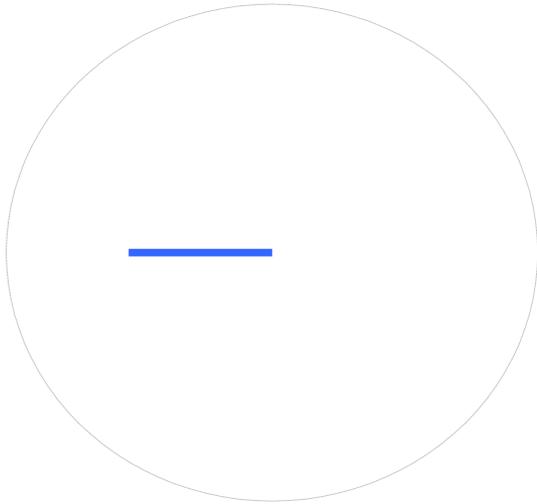
B1



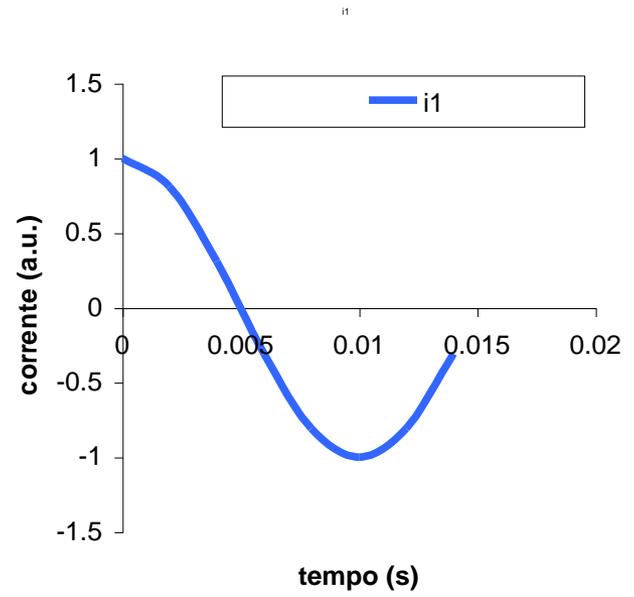
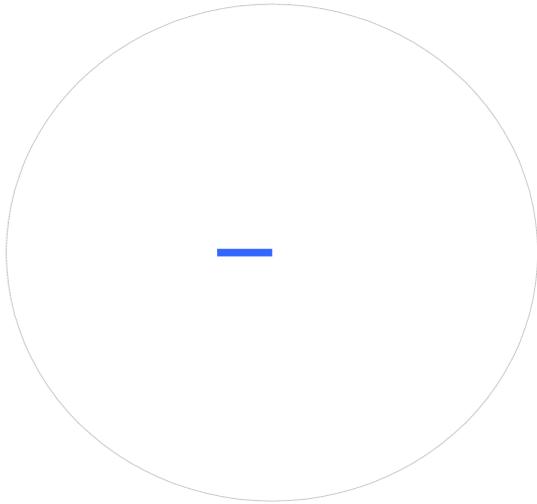
B1



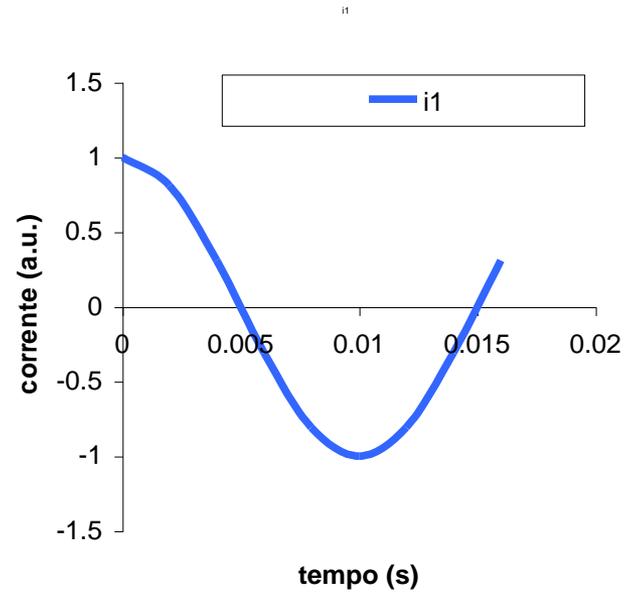
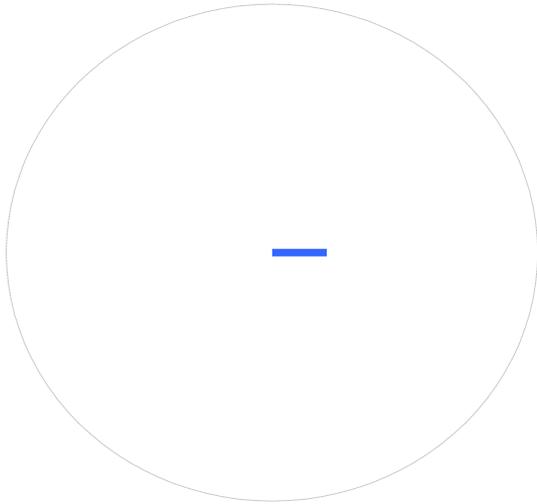
B1



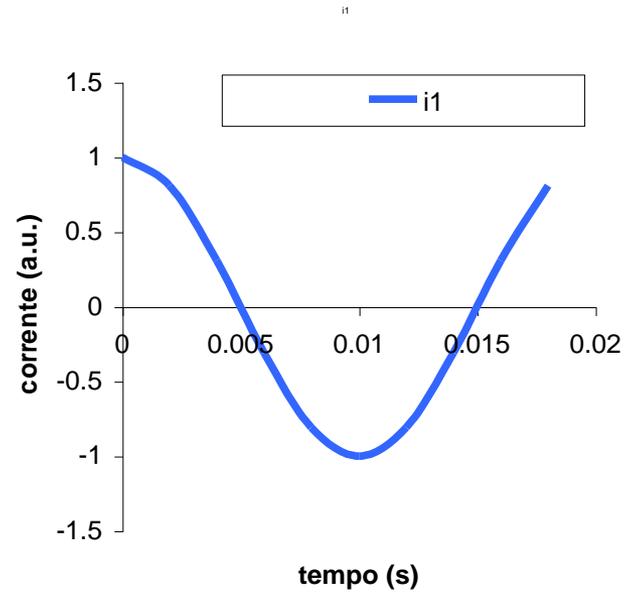
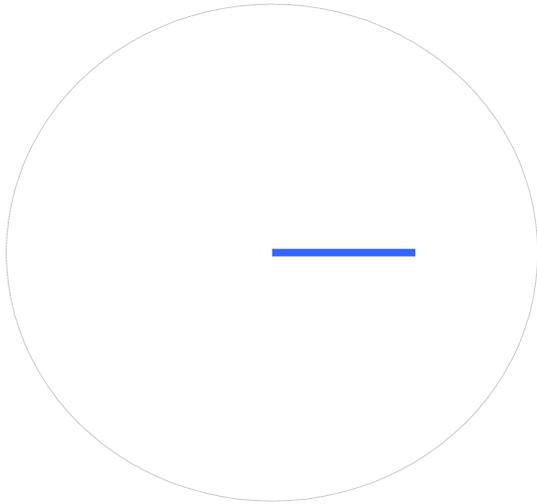
B1



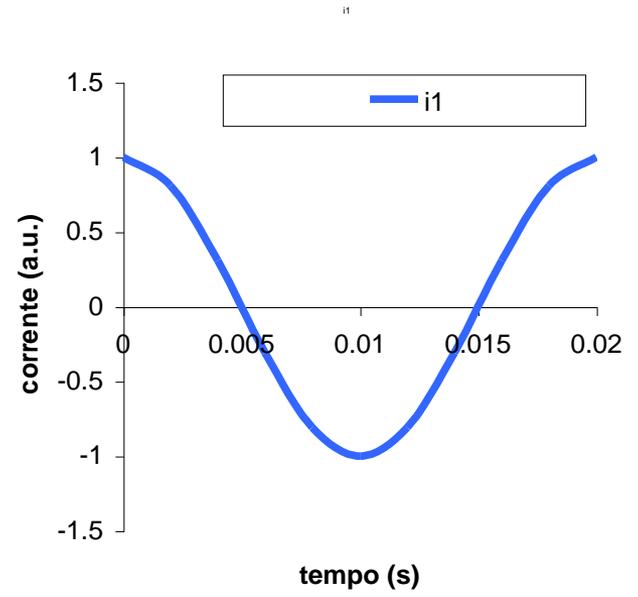
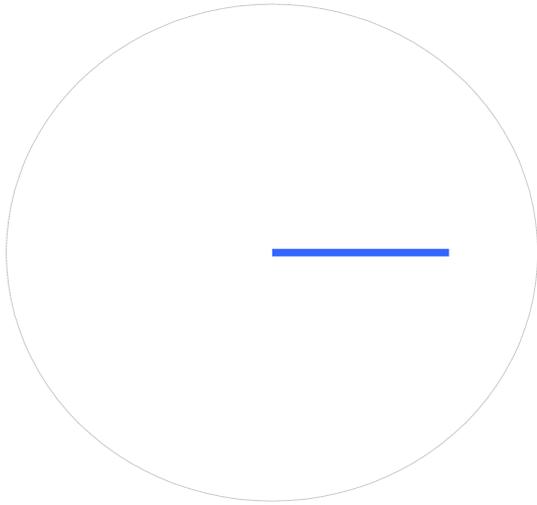
B1

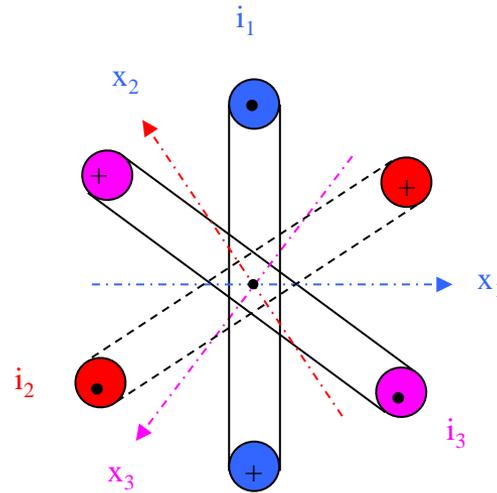


B1



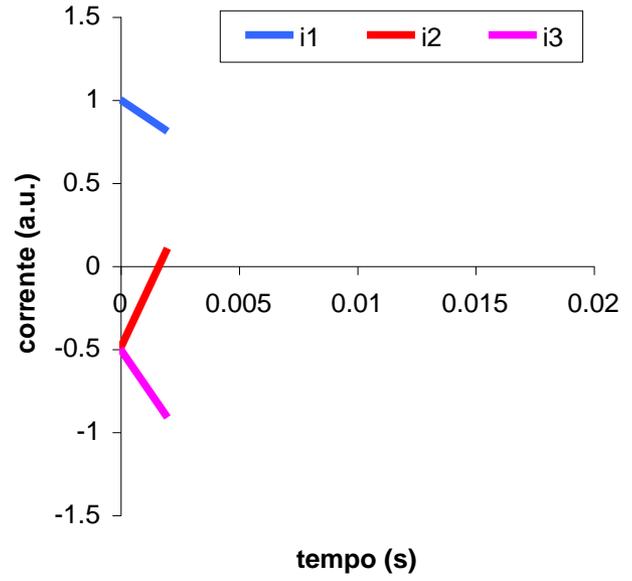
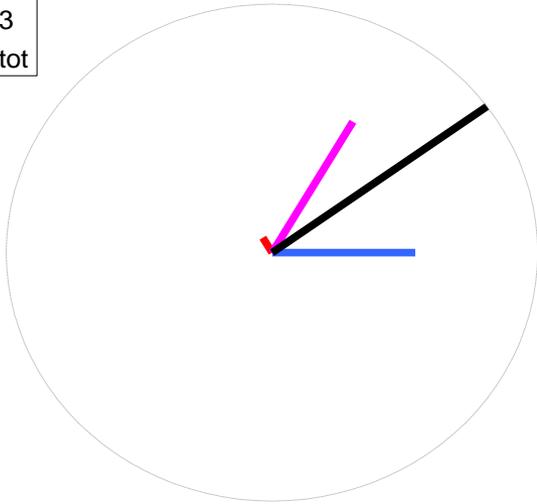
B1

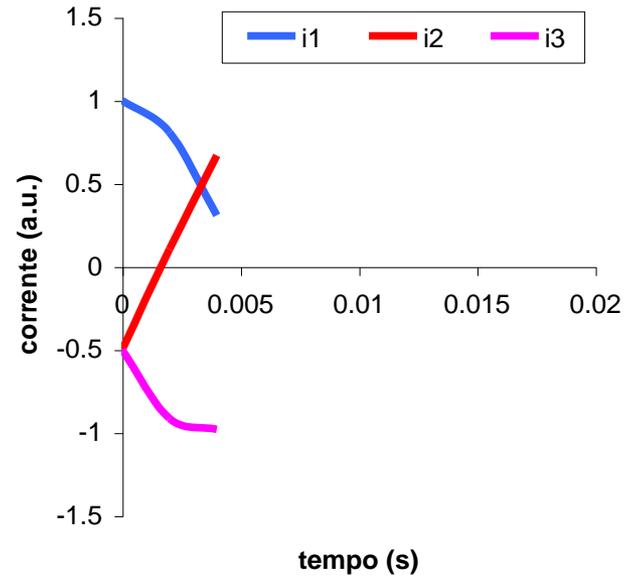
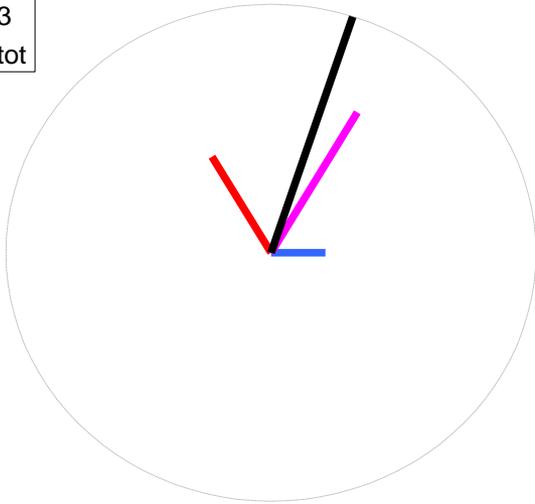


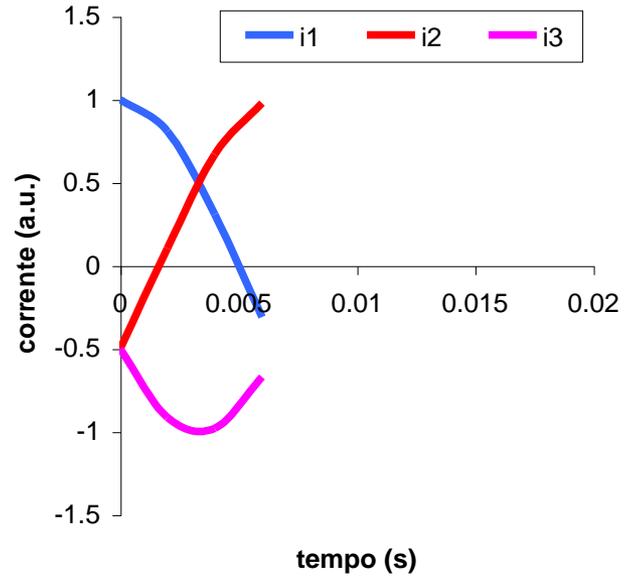
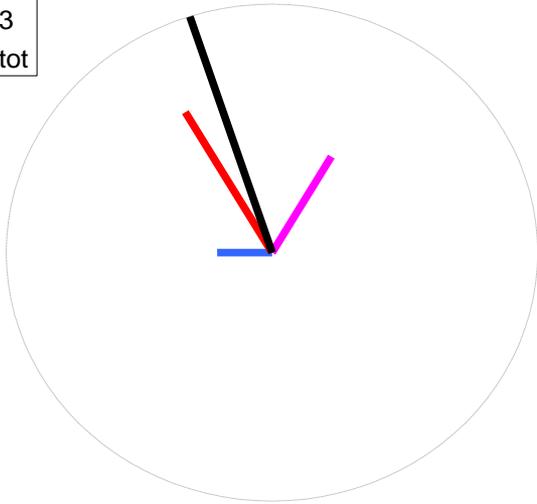


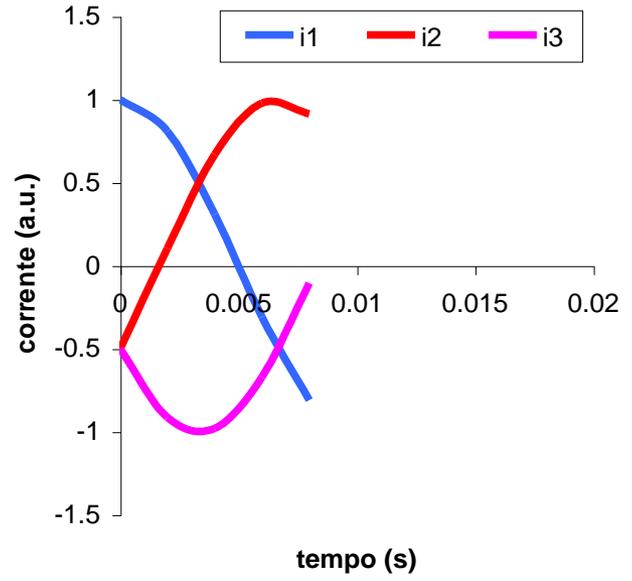
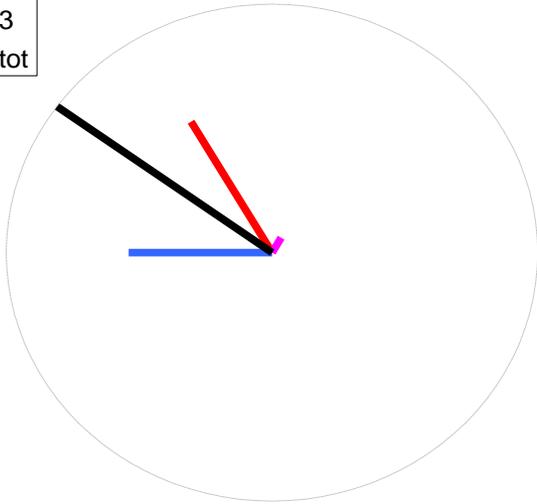
Tre spire orientate a 120° l'una rispetto all'altra, percorse da un sistema di correnti equilibrato producono un campo magnetico che ruota con una velocità angolare ω_c pari alla pulsazione ω delle correnti

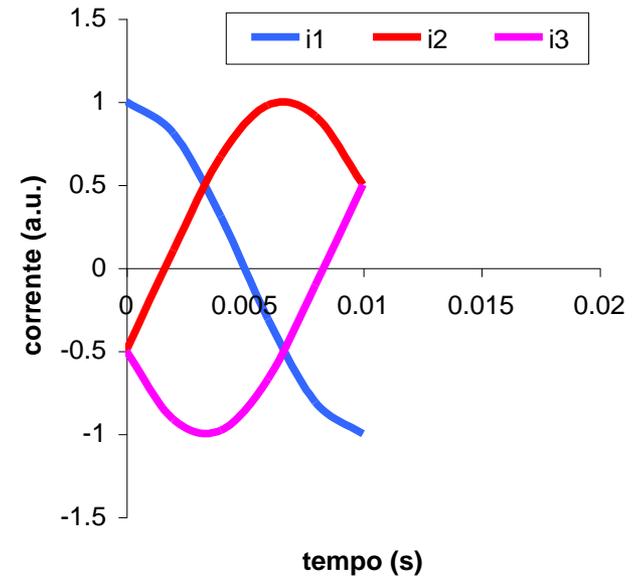
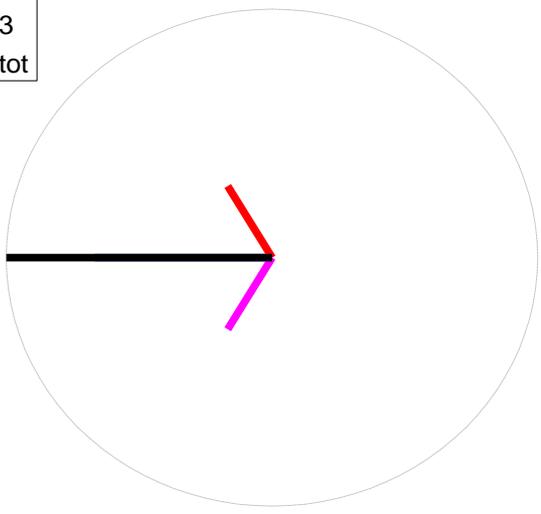
$$\omega_c = \omega$$

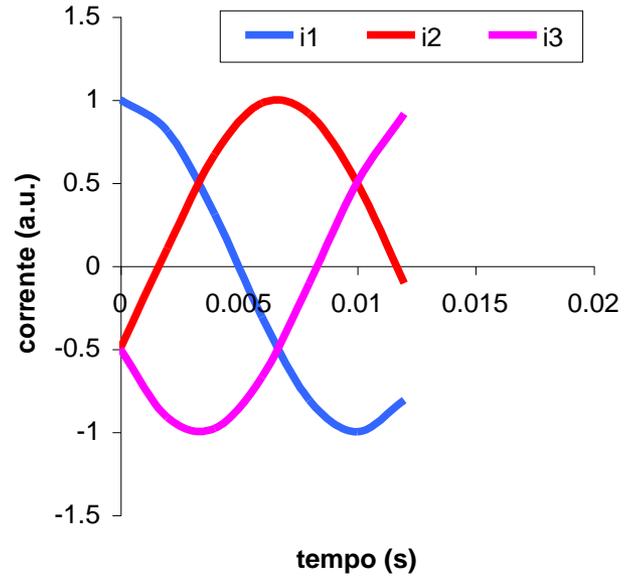
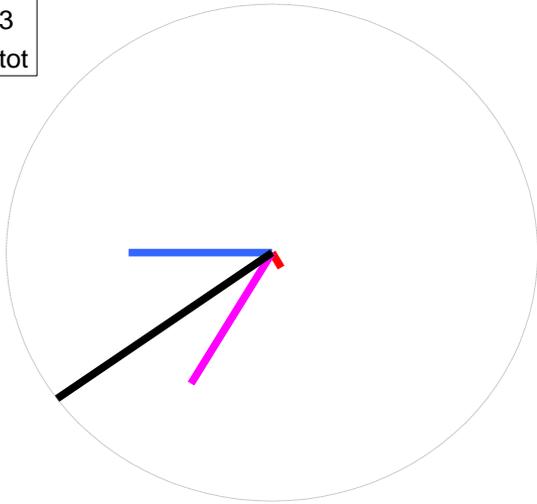


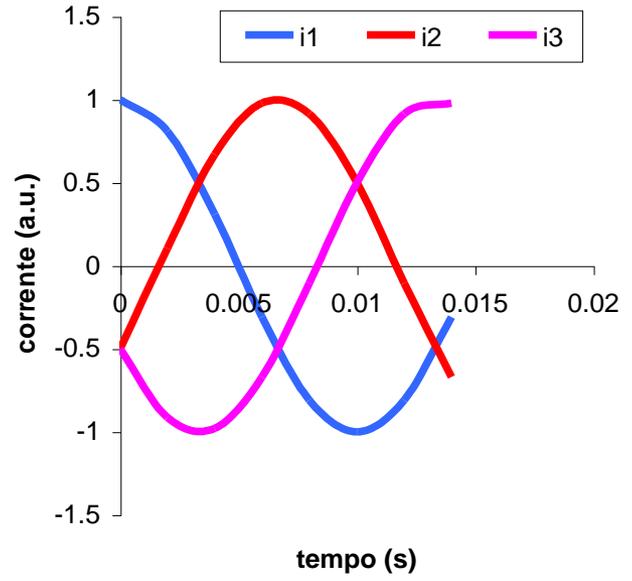
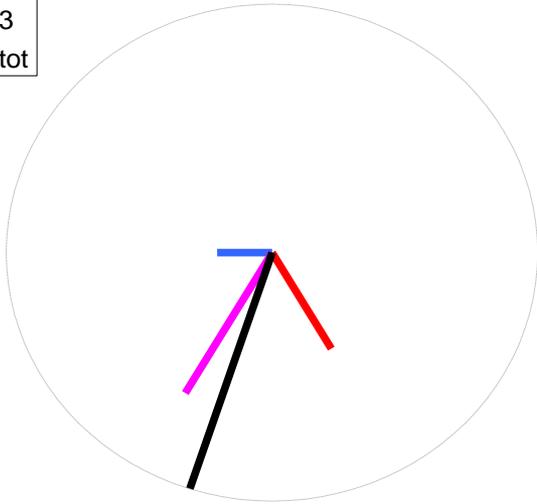


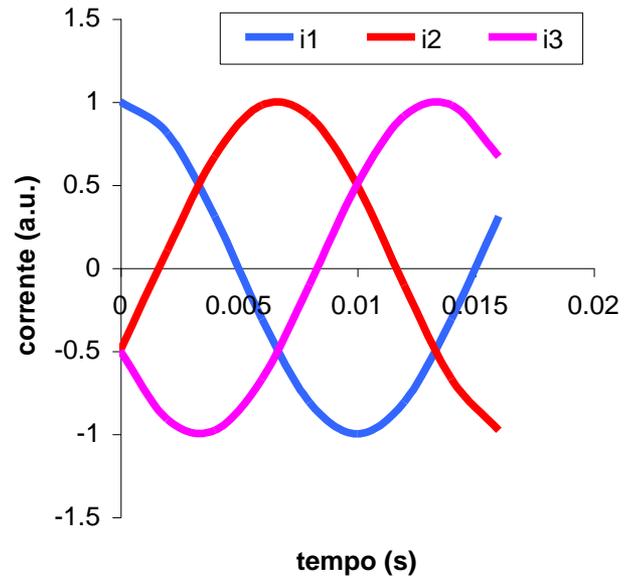
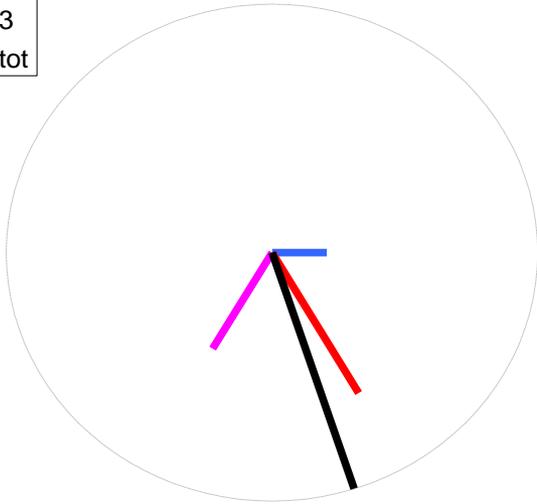


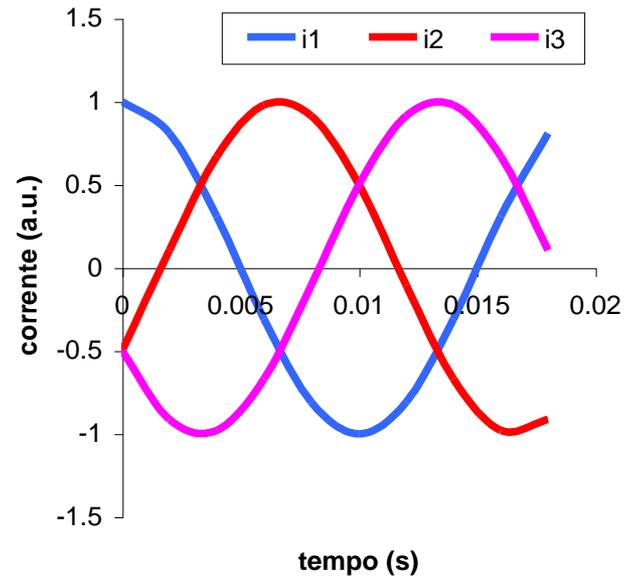
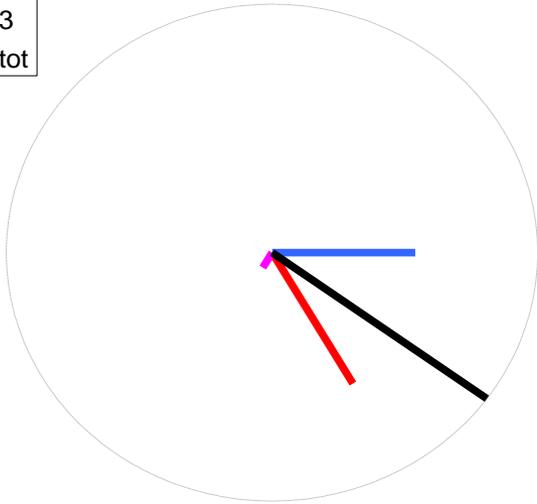


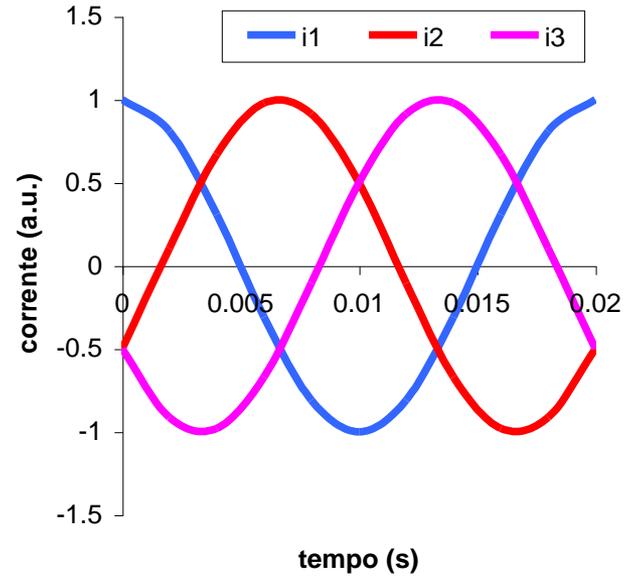
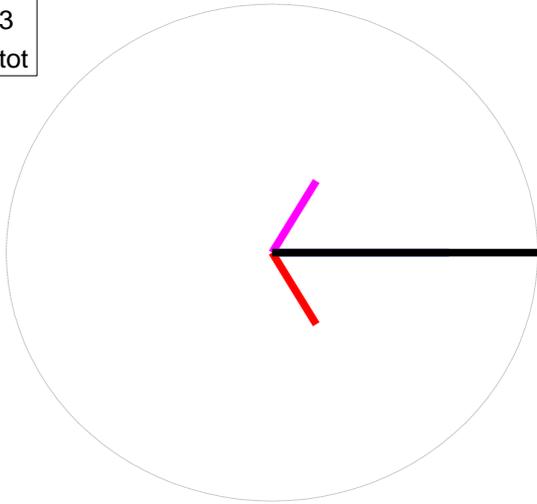


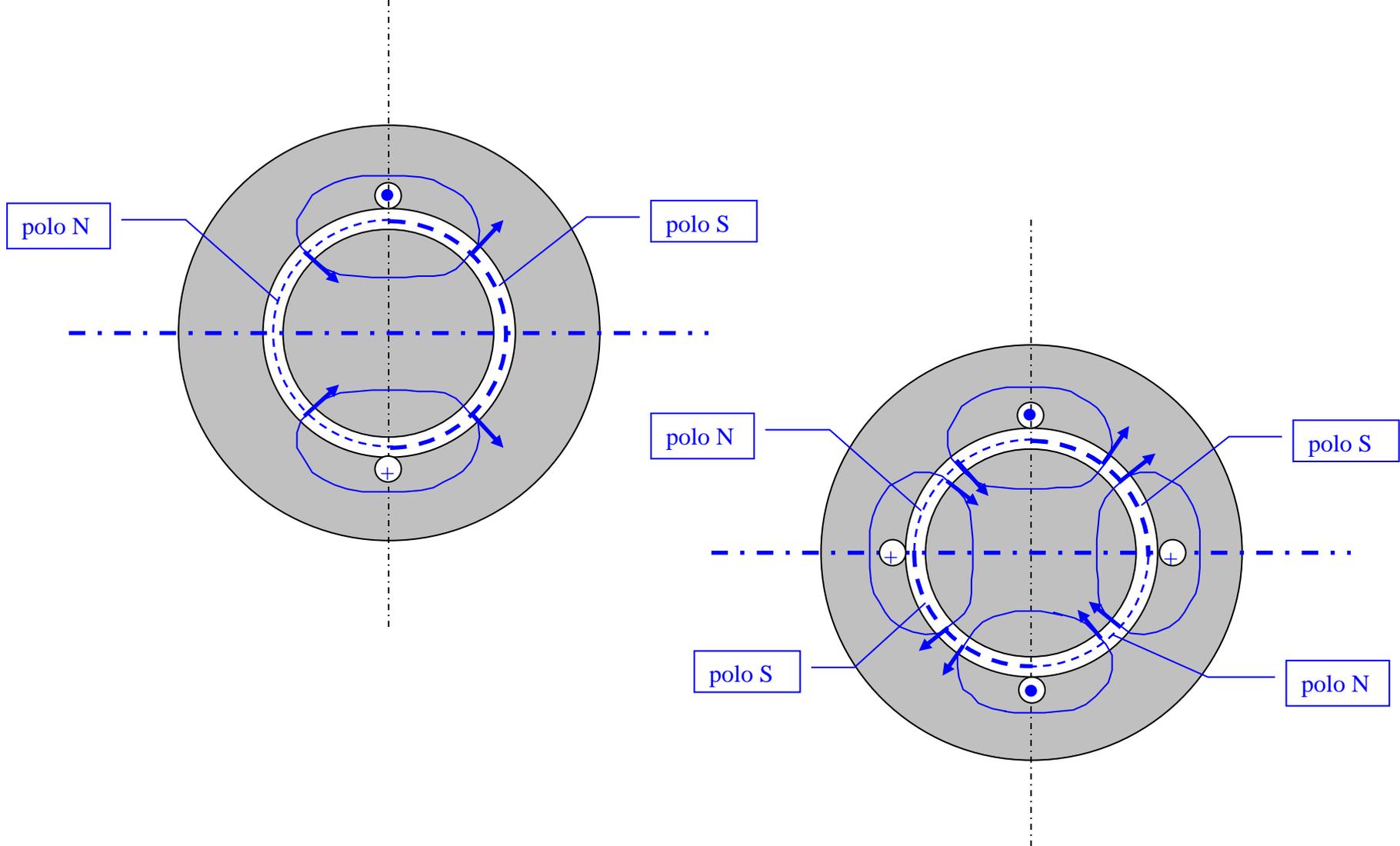




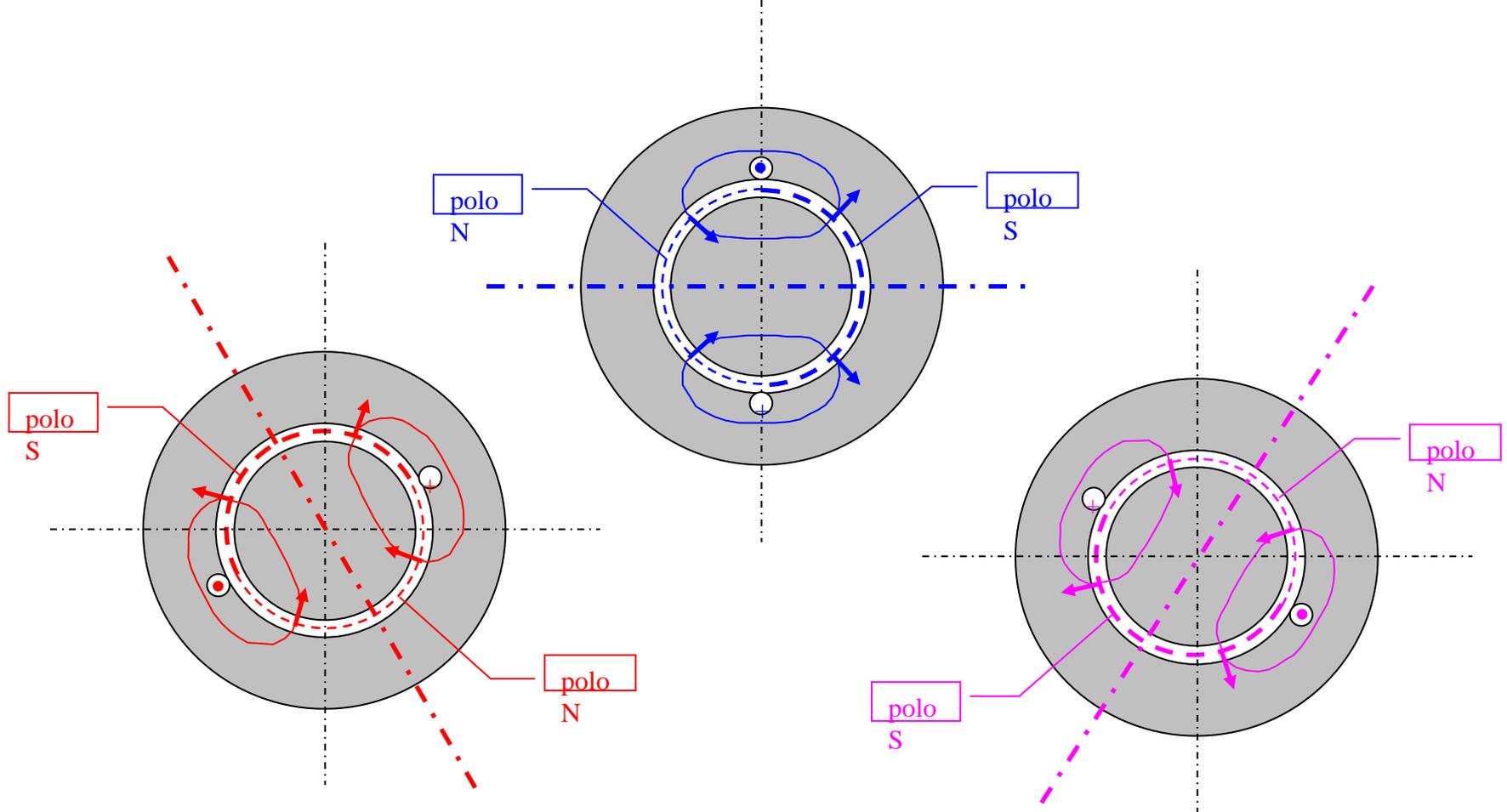






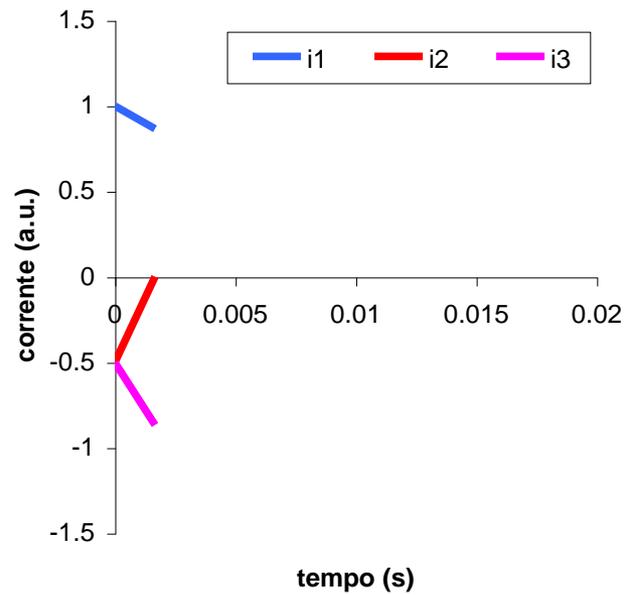
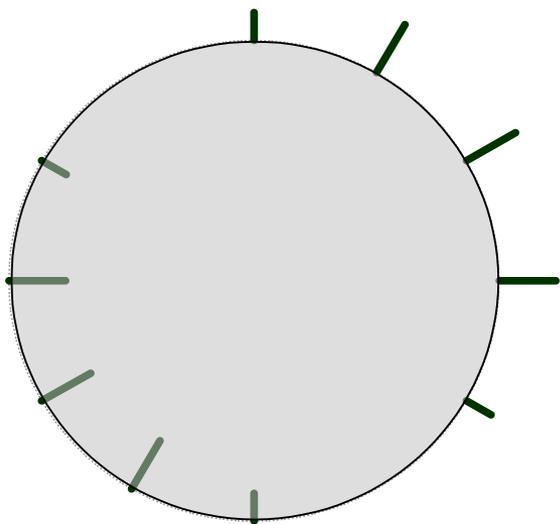


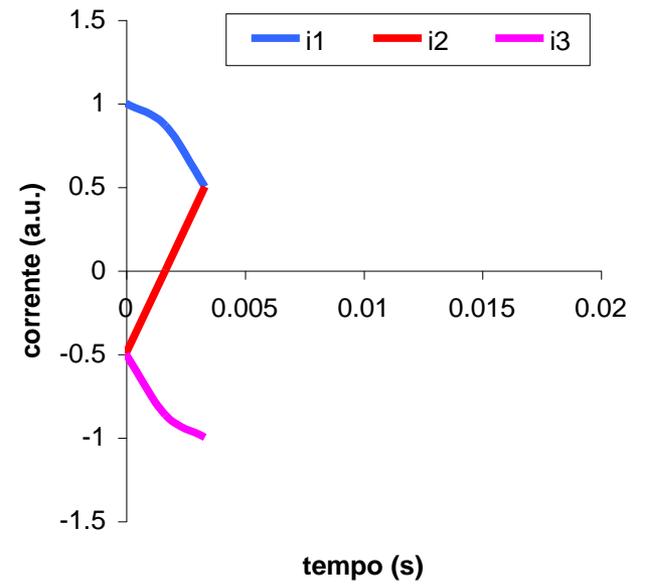
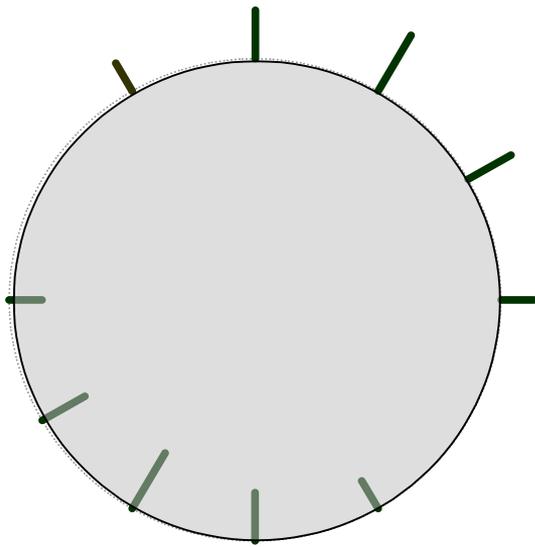
Il campo al traferro prodotto da una fase è un campo alternato diretto radialmente ed è caratterizzato da un numero $2p$ di poli

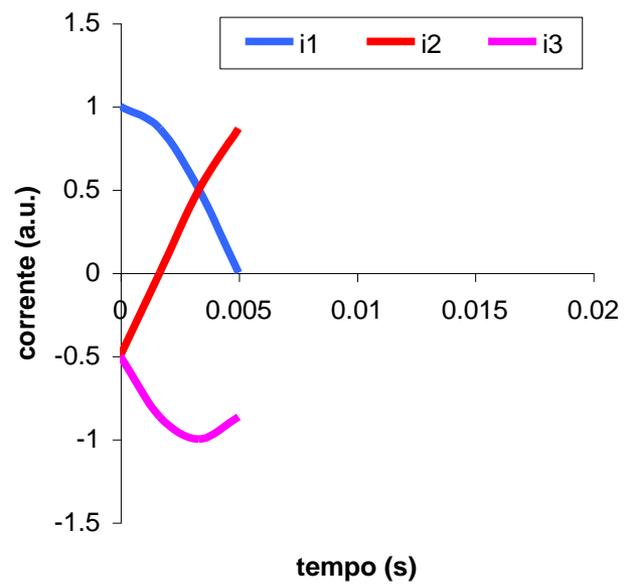
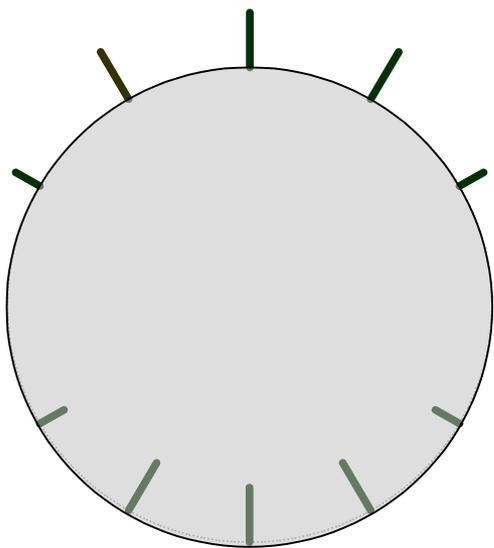


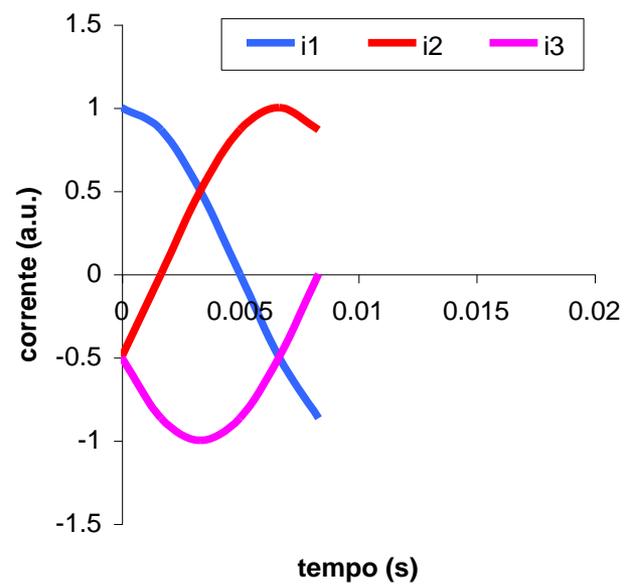
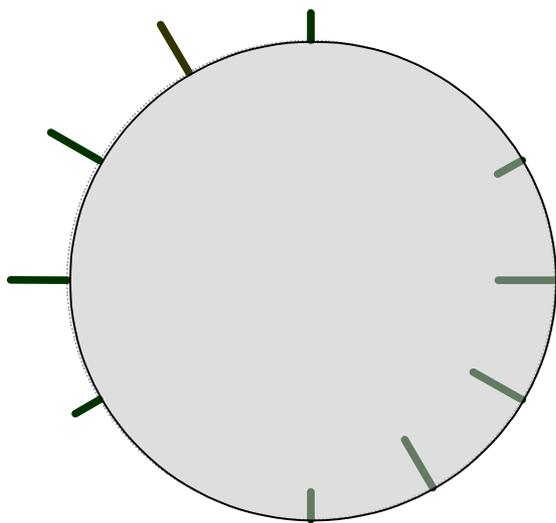
Il campo al traferro prodotto da ciascuna delle tre fasi dell'avvolgimento trifase è sfasato di 120° elettrici rispetto a quello delle altre due fasi.

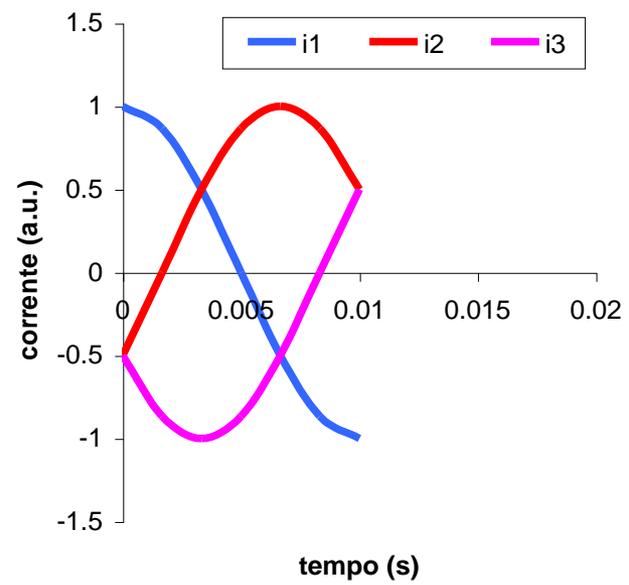
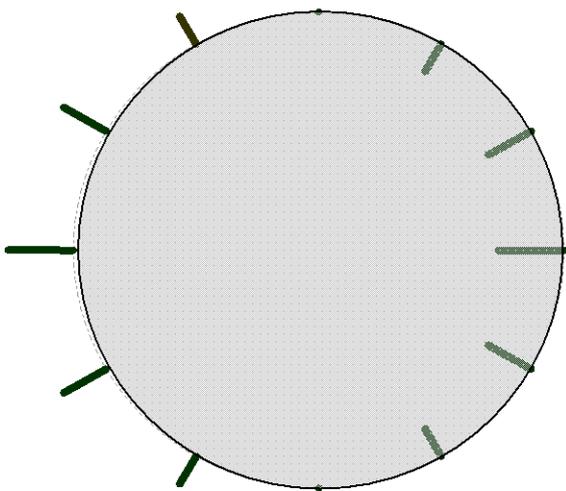
Il campo al traferro prodotto da un avvolgimento trifase percorso da un sistema di correnti equilibrato **ruota con una velocità angolare** $\omega_c = \omega / p$

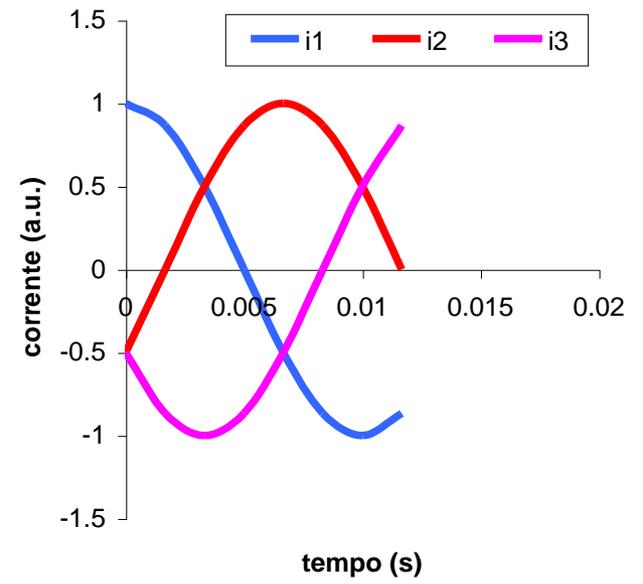
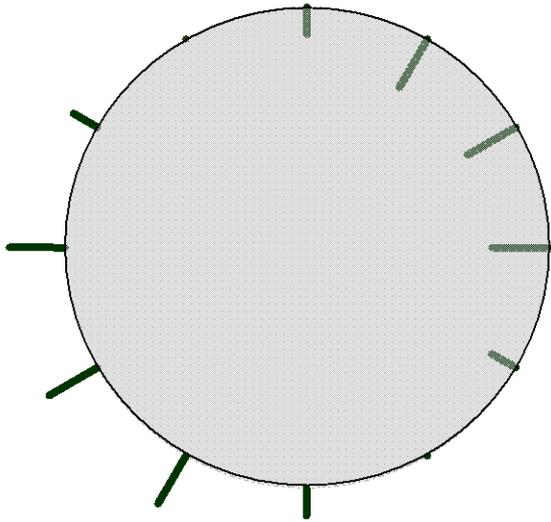


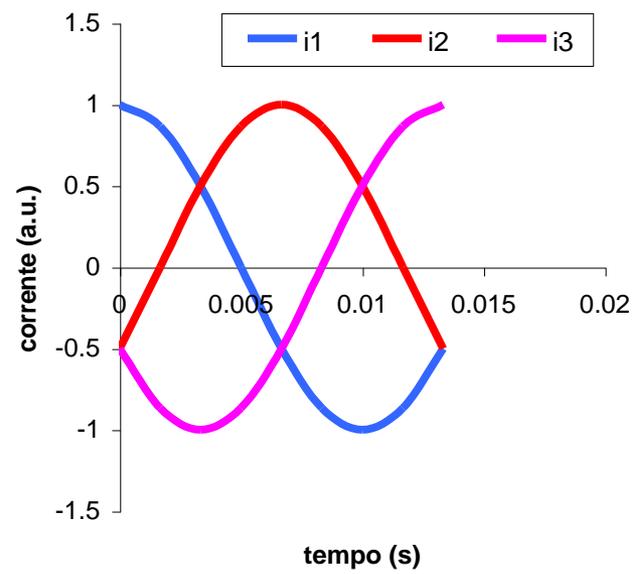
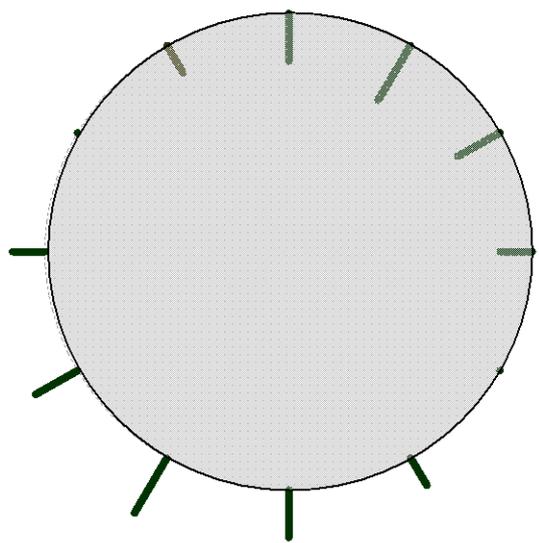


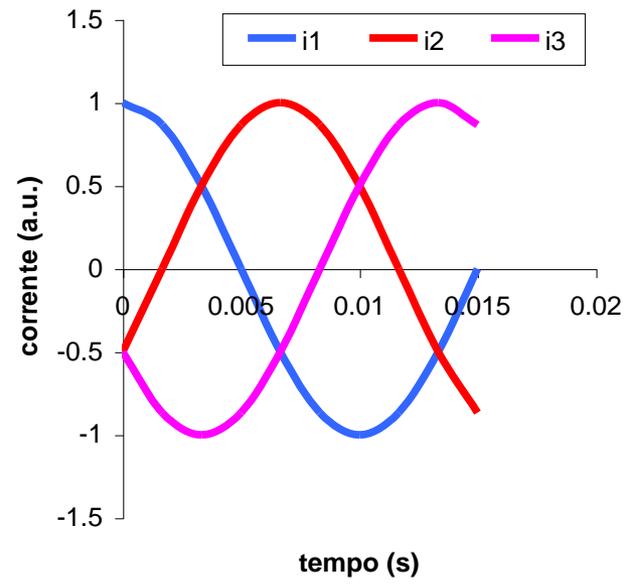
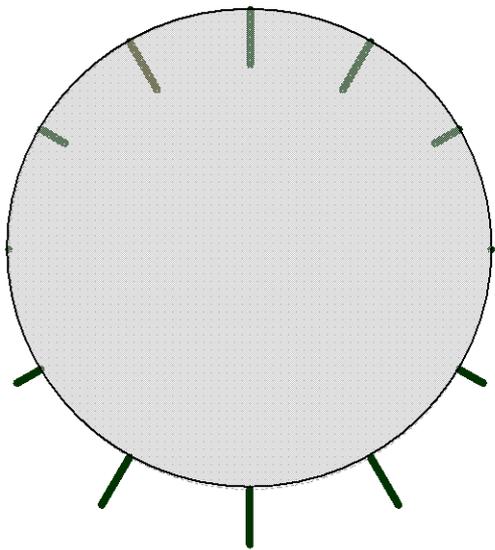


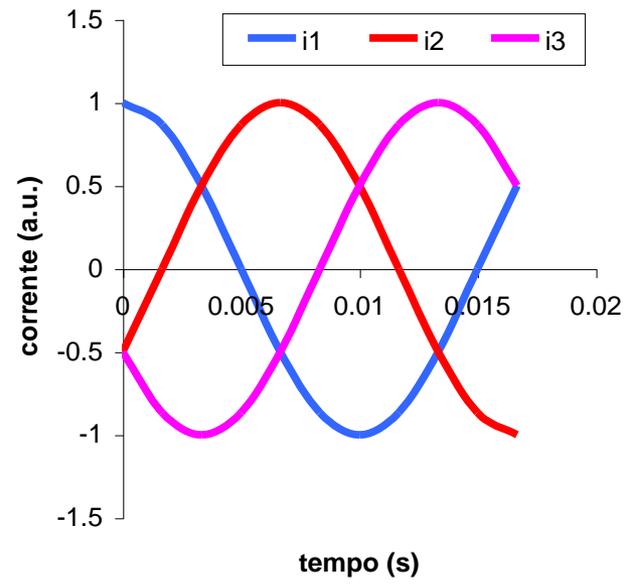
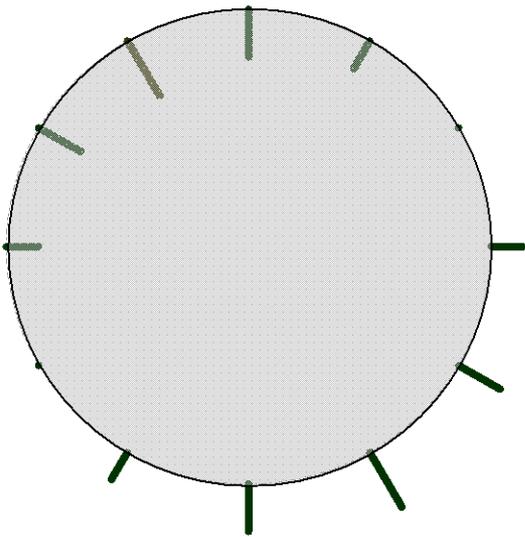


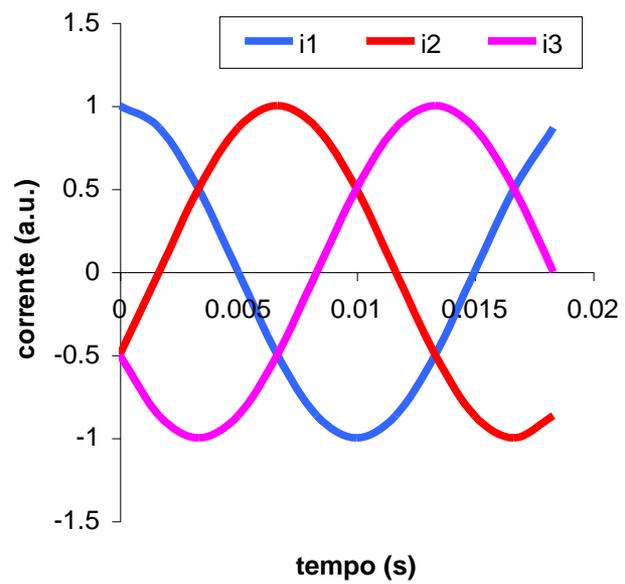
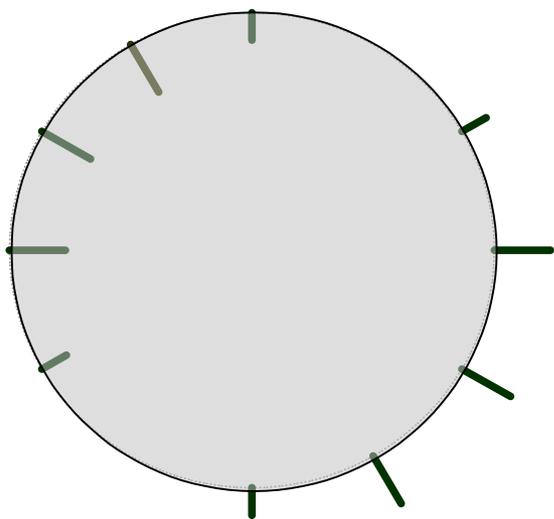


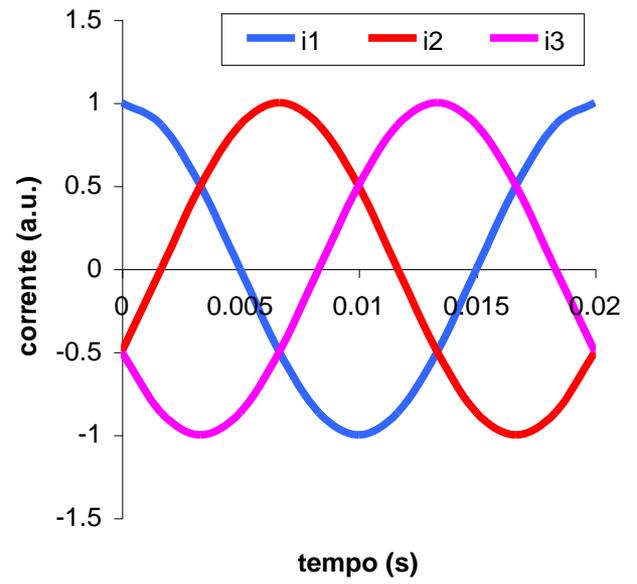
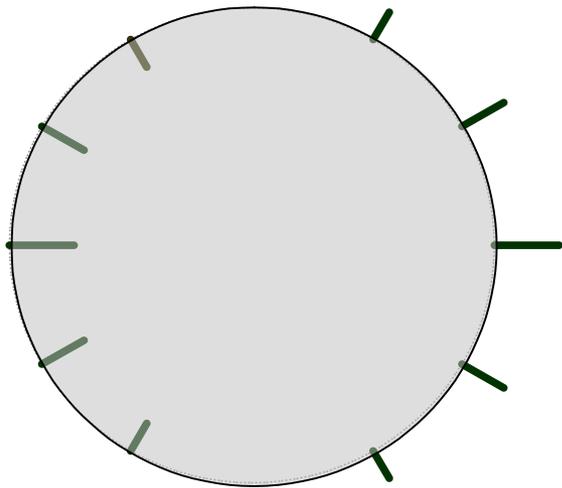




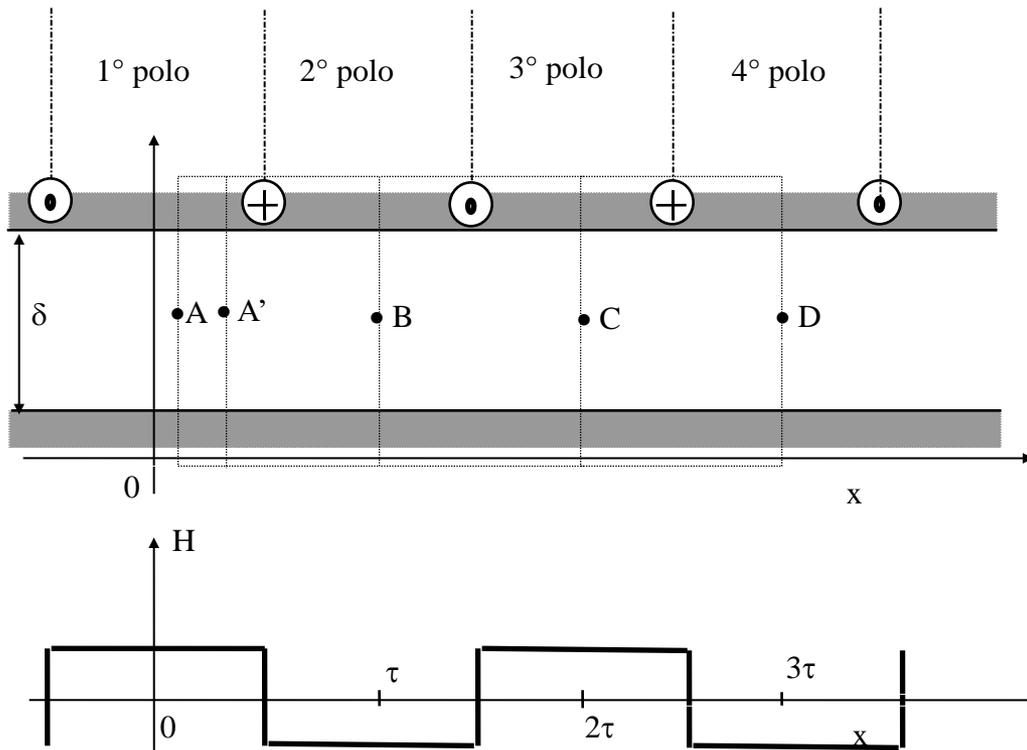








Campo prodotto da una fase avente una cava per polo



Per la legge di Ampère:

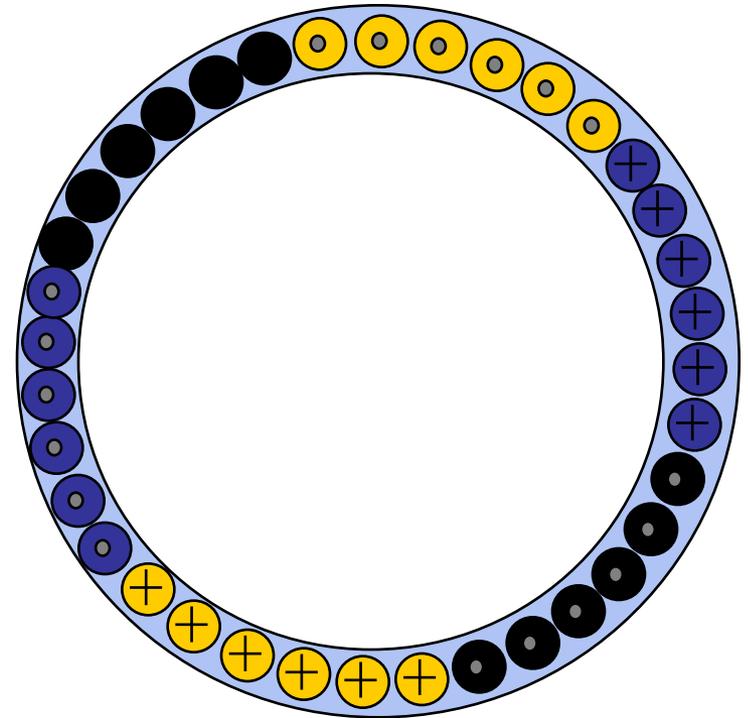
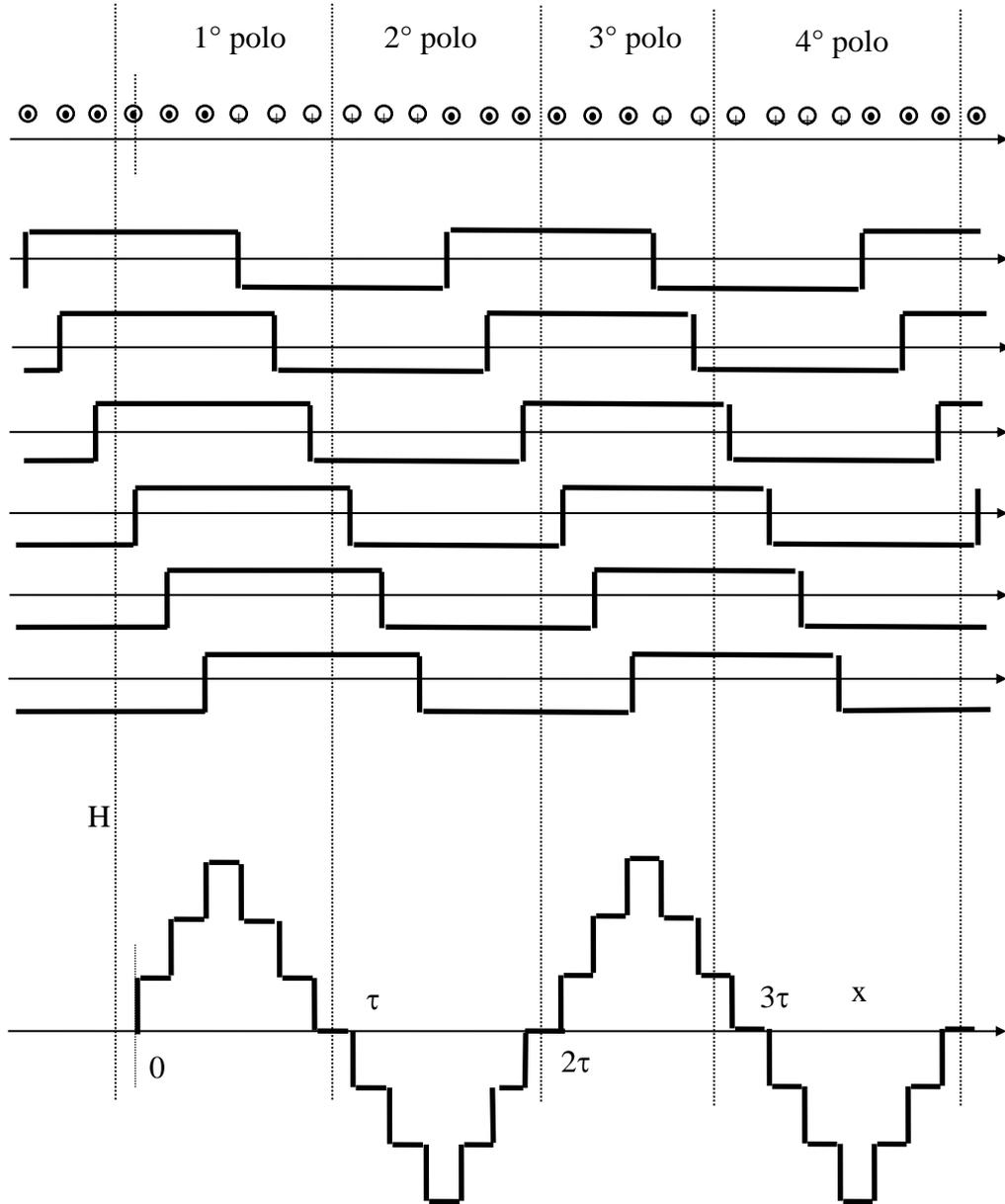
$$\begin{cases} H_A \cdot \delta - H_B \cdot \delta = ni \\ H_A \cdot \delta - H_C \cdot \delta = 0 \\ H_A \cdot \delta - H_D \cdot \delta = ni \end{cases}$$

Per la solenoidalità di B:

$$2p[(\mu_0 H_A)(l\tau) + (\mu_0 H_B)(l\tau)] = 0$$

$$\Rightarrow H_A + H_B = 0$$

Campo prodotto da una fase avente più cave per polo



PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il nome di **macchina asincrona** esprime il fatto che la velocità di rotazione del rotore della macchina (ω_m) non coincide con quella di rotazione del campo al traferro (ω_c); lo **scorrimento** (s) viene definito come il rapporto tra le velocità di rotazione del campo al traferro rispetto al rotore ($\omega'_c = \omega_c - \omega_m$) e allo statore (ω_c):

$$s = \frac{\omega_c - \omega_m}{\omega_c}$$

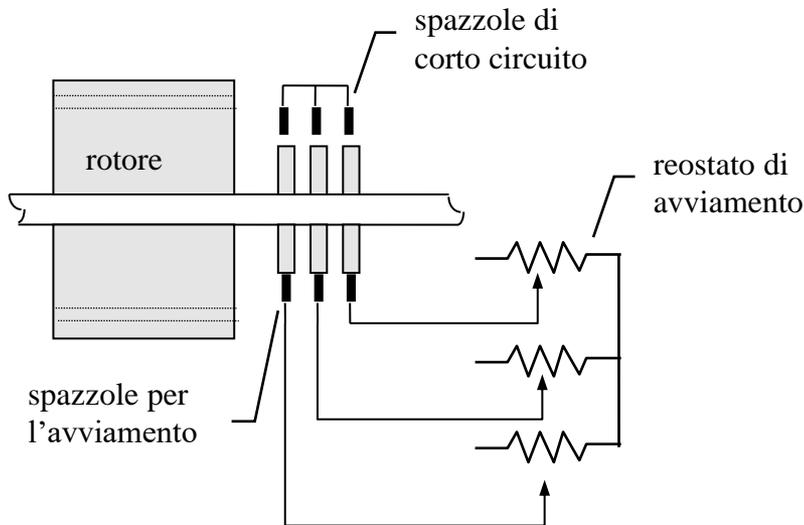
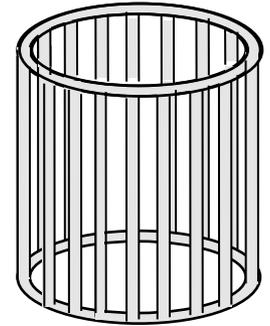
La pulsazione delle f.e.m. indotte e delle correnti nelle fasi di rotore risulta quindi:

$$\omega' = p \omega'_c = s \omega$$

Il campo al traferro prodotto dalle correnti di rotore è un campo rotante che ruota nello stesso verso e con la stessa velocità del campo rotante di statore (i due campi sono fermi l'uno rispetto all'altro)

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

Il rotore della macchina sincrona può essere realizzato anche senza avvolgimenti; al posto dell'avvolgimento trifase (**rotore avvolto**) si trova una gabbia di conduttori massicci (**rotore a gabbia di scoiattolo**) che funzionalmente si comporta come un avvolgimento trifase.

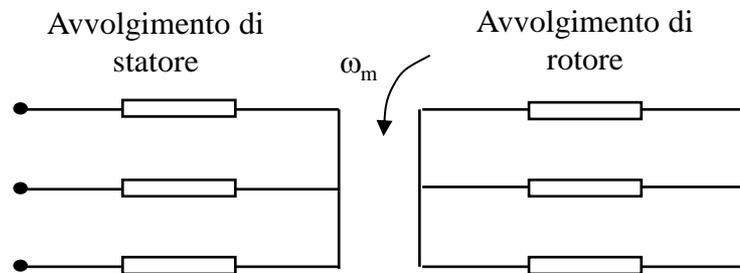


In presenza di rotore avvolto, è possibile collegare, mediante un collettore ad anelli e tre contatti striscianti, l'avvolgimento di rotore ad un reostato esterno. Il collegamento con il reostato esterno viene utilizzato nella fase di avviamento.

TEOREMA DI EQUIVALENZA

Una macchina asincrona funzionante (con le fasi di rotore in cortocircuito) ad una generica velocità (a cui corrisponde un generico valore s dello scorrimento = rapporto tra la velocità del campo rispetto al rotore e la velocità del campo rispetto allo statore) equivale, sotto il profilo del funzionamento elettrico, alla stessa macchina mantenuta a rotore bloccato ma con le fasi di rotore che alimentano ciascuna una resistenza pari a $R_2(1-s)/s$, essendo R_2 la resistenza di una fase rotorica.

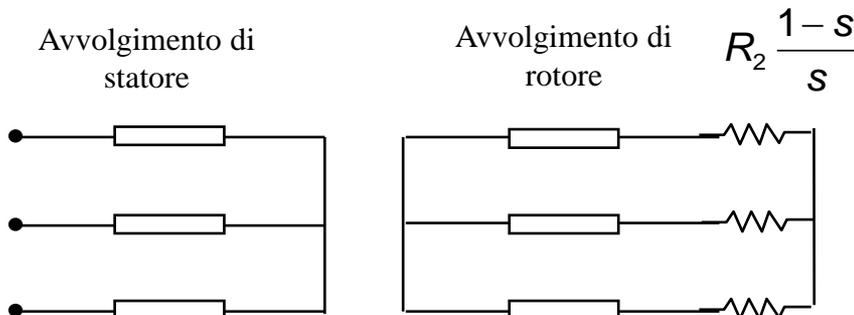
$$s = \frac{\omega_c - \omega_m}{\omega_c}$$



Pulsazione delle correnti di statore: ω

Pulsazione delle correnti di rotore: $s \omega$

Stessa potenza elettrica assorbita a statore
 Stessa potenza dissipata nel ferro
 Stessa potenza dissipata nel rame

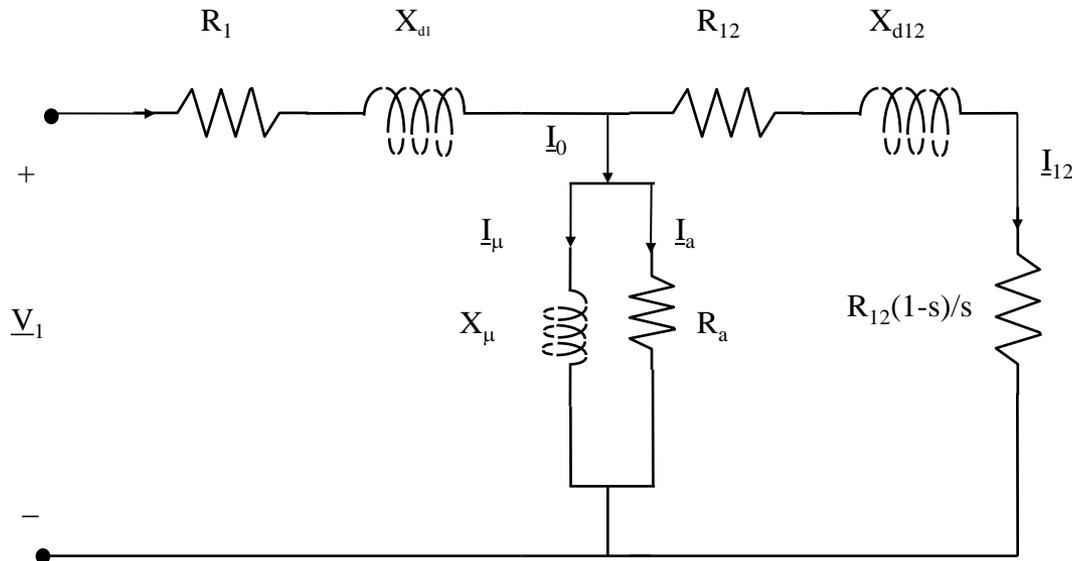


Pulsazione delle correnti di statore: ω

Pulsazione delle correnti di rotore: ω

CIRCUITO ELETTRICO EQUIVALENTE

La macchina asincrona funzionante con il rotore bloccato, si comporta come un trasformatore trifase



Circuito equivalente per fase di una macchina asincrona

$$P_m = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2$$

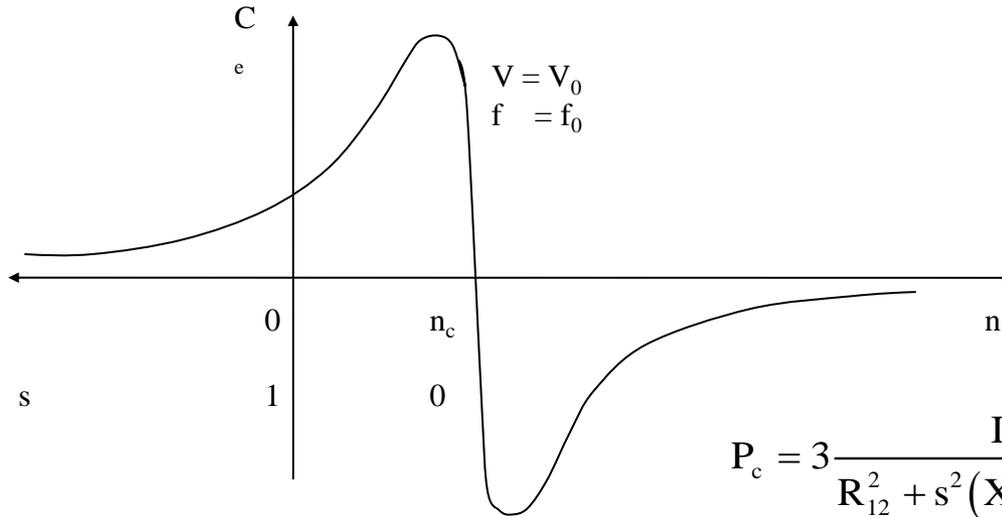
P_m = Potenza meccanica erogata

$$C = \frac{P_m}{\omega_m}$$

C = Coppia motrice di origine elettromagnetica

CARATTERISTICA MECCANICA

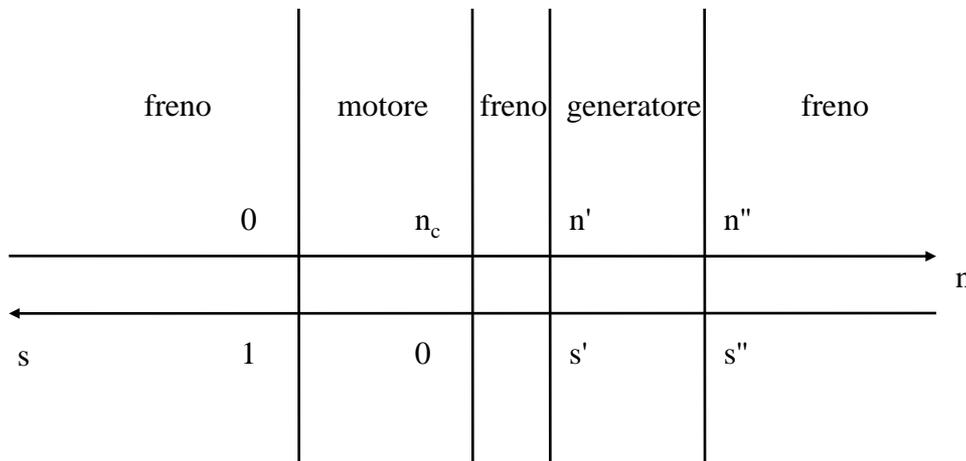
La caratteristica meccanica è la curva che descrive l'andamento della coppia di origine elettromagnetica al variare della velocità angolare del rotore.



$$n_c = \frac{60f}{p}$$

Velocità del campo rotante
(velocità di sincronismo)

$$P_c = 3 \frac{I_1^2}{R_{12}^2 + s^2 (X_0 + X_{d12})^2} \left[(X_0 + X_{d12})^2 R_1 s^2 + X_0^2 R_{12} s + R_1 R_{12}^2 \right]$$

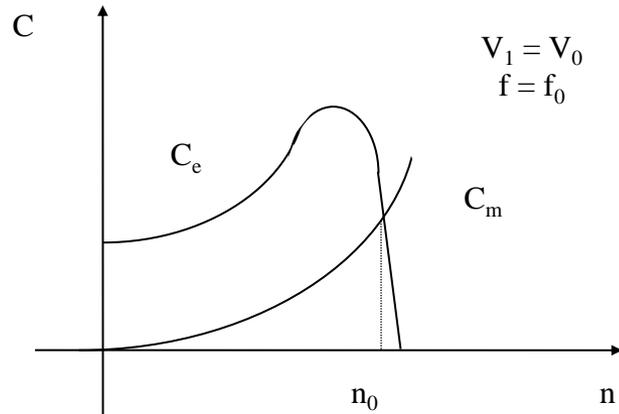


Potenza elettrica assorbita a statore

Funzionamento da:

- motore ($P_e > 0, P_m > 0$)
- generatore ($P_e < 0, P_m < 0$)
- freno ($P_e > 0, P_m < 0$)

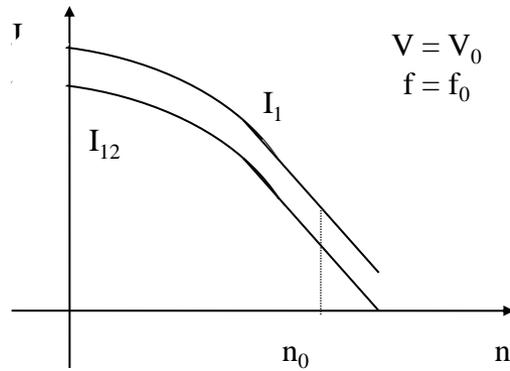
FUNZIONAMENTO DA MOTORE



- A rotore fermo (spunto) la macchina presenta una coppia motrice.
- La coppia varia al variare della velocità a causa della variazione delle f.e.m. indotte negli avvolgimenti di rotore e di statore che provocano la variazione delle correnti di rotore e di statore.

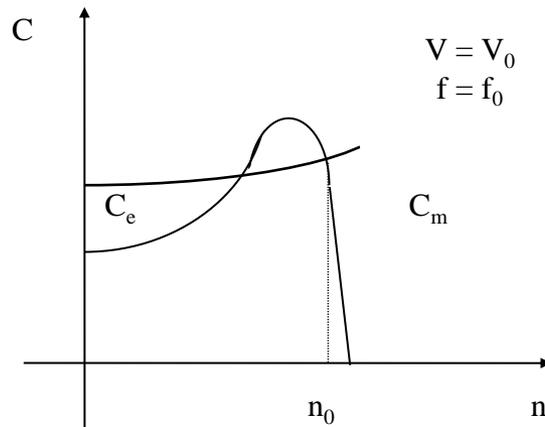
- La **coppia di spunto** risulta sensibilmente inferiore alla **coppia massima**.
- Alla **velocità di sincronismo** la coppia è nulla in quanto in tale condizione gli avvolgimenti di rotore vedono un campo induttore di statore fermo rispetto ad essi e quindi risulta nulla la f.e.m. indotta e di conseguenza la corrente di rotore.
- Se la coppia di spunto è maggiore della coppia resistente il motore sincrono si avvia autonomamente e raggiunge una **velocità di regime** quando la coppia motrice (di origine elettromagnetica C_e) e la coppia resistente (di origine meccanica C_m) sono uguali. In tali condizioni il **rotore ruota ad una velocità diversa da quella del campo**, da cui il nome di macchina asincrona.

FUNZIONAMENTO DA MOTORE



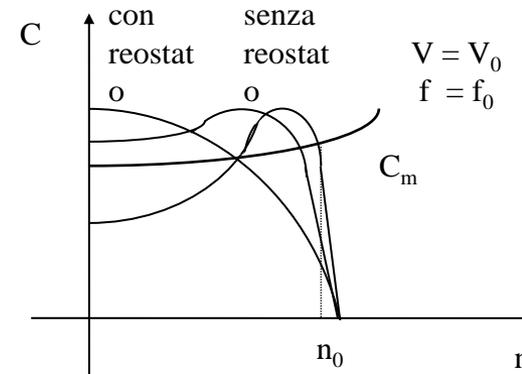
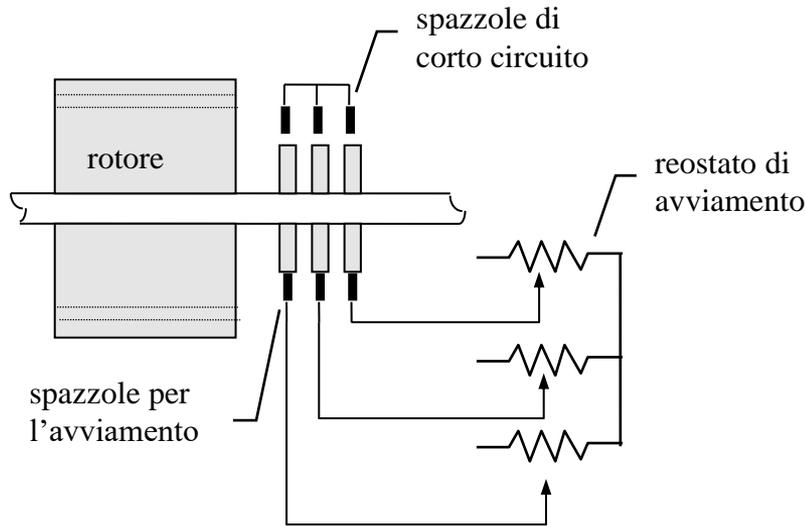
La caratteristica elettro-meccanica riporta la variazione del valore efficace delle correnti di statore e di rotore al variare della velocità

- Allo spunto la corrente è sensibilmente maggiore della corrente a regime



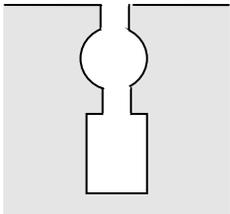
Nel caso in cui la coppia resistente sia maggiore di quella di spunto, ma minore di quella massima, il motore non è in grado di avviarsi in maniera autonoma. Se avviato, può però funzionare in corrispondenza della velocità di regime n_0 .

FUNZIONAMENTO DA MOTORE



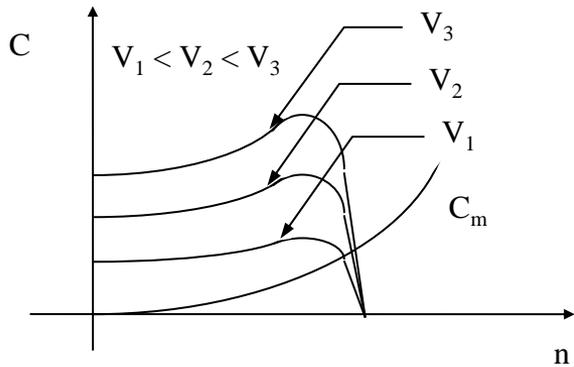
Nelle macchine con il rotore avvolto, è possibile superare i problemi all'avviamento, collegando in serie agli avvolgimenti di rotore un reostato di avviamento:

- all'aumentare della resistenza del reostato aumenta la coppia di spunto e si riduce contemporaneamente la corrente di spunto.
- Una volta avviata la macchina il reostato viene disinserito.



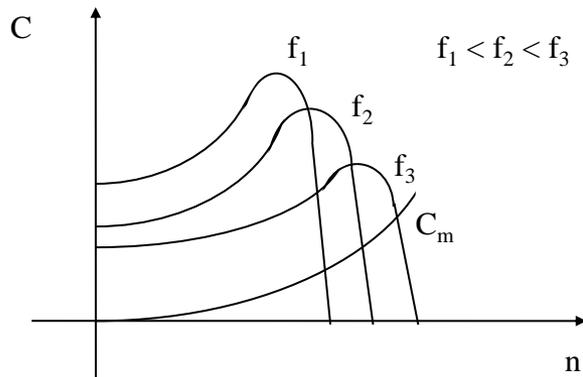
Nelle macchine con il rotore a gabbia, i problemi all'avviamento vengono ridotti realizzando un rotore a doppia gabbia: la gabbia esterna ha conduttori con una sezione minore di quelli della gabbia interna. La corrente si distribuisce naturalmente, all'avviamento, maggiormente nella gabbia esterna, a regime, maggiormente nella gabbia interna.

REGOLAZIONE DELLA VELOCITÀ

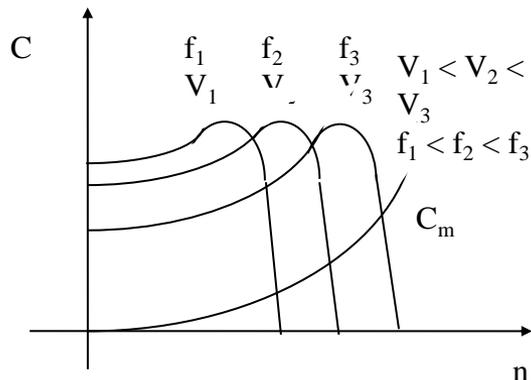


È possibile cambiare la velocità di regime agendo sulla tensione di alimentazione (valore efficace, frequenza)

- Variando il valore efficace della tensione di alimentazione si ottengono solo variazioni trascurabili della velocità di regime



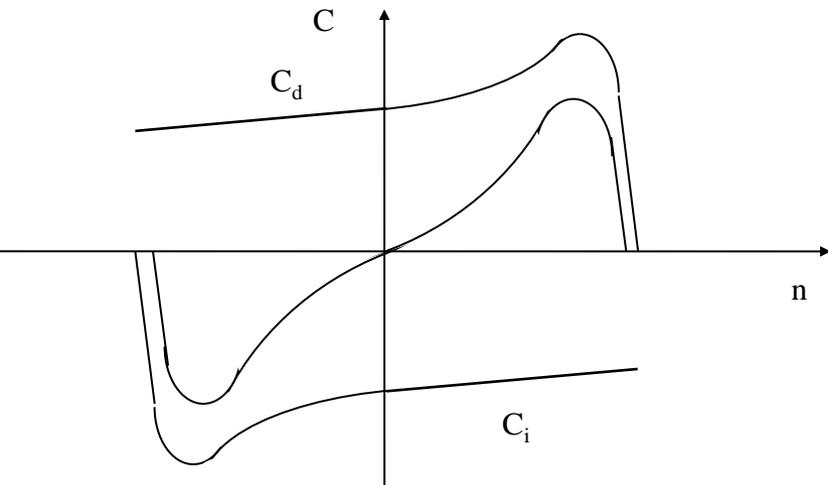
- Variando la frequenza della tensione di alimentazione, si varia la velocità di sincronismo e si ottengono grandi variazioni della velocità di regime.
- La variazione della velocità risulta però limitata dalla riduzione della coppia massima all'aumento della frequenza



- Variando contemporaneamente la frequenza ed il valore efficace della tensione di alimentazione, si varia la velocità di sincronismo mantenendo costante la coppia massima e si ottiene la massima regolazione della velocità.
- Il valore efficace della tensione non può essere aumentato oltre il valore nominale.

MOTORE ASINCRONO MONOFASE

Sullo statore del motore asincrono monofase è presente un solo avvolgimento, mentre il rotore è realizzato a gabbia di scoiattolo

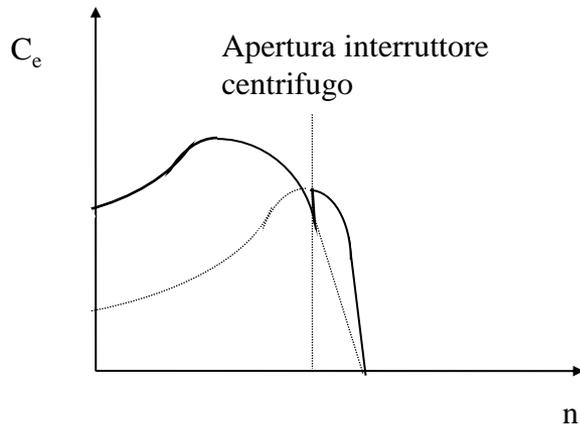
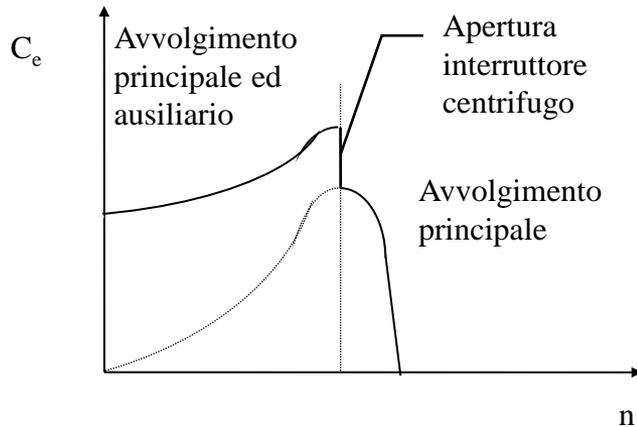
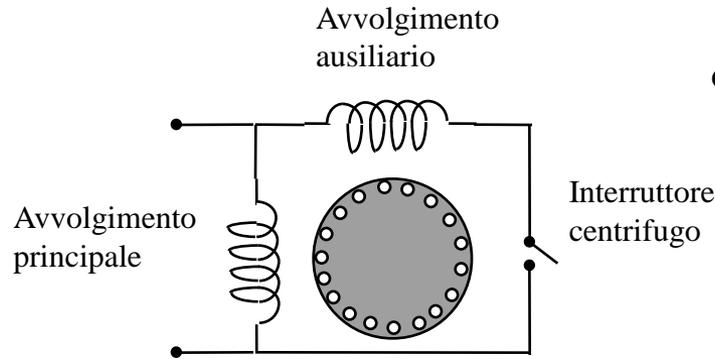


- Il campo induttore di statore non è un campo rotante bensì un campo alternato. Di conseguenza la coppia di spunto del motore risulta nulla.
- Il campo alternato può essere pensato come la sovrapposizione di due campi controrotanti: che ruotano cioè con la stessa velocità angolare ($\omega_c = \omega/p$) ma versi opposti.

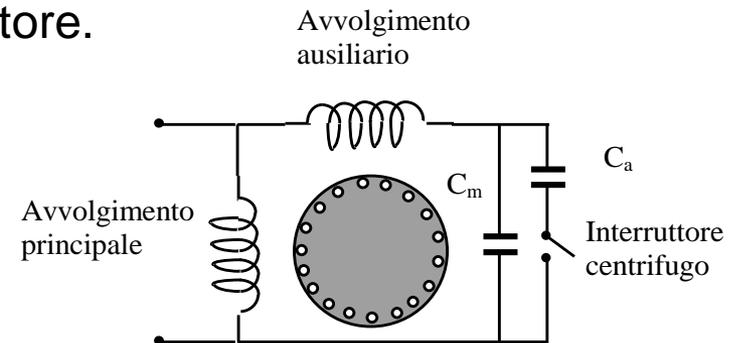
$$B_M \cos(\omega t) \cos\left(\pi \frac{x}{\tau}\right) = \frac{B_M}{2} \cos\left(\pi \frac{x}{\tau} - \omega t\right) + \frac{B_M}{2} \cos\left(\pi \frac{x}{\tau} + \omega t\right)$$

- A ciascuno dei due campi controrotanti è associata una caratteristica meccanica simile a quella del motore trifase.
- La coppia di origine elettromagnetica risulta quindi non nulla in corrispondenza di velocità di rotazione sia positive che negative, pur risultando nulla a rotore fermo

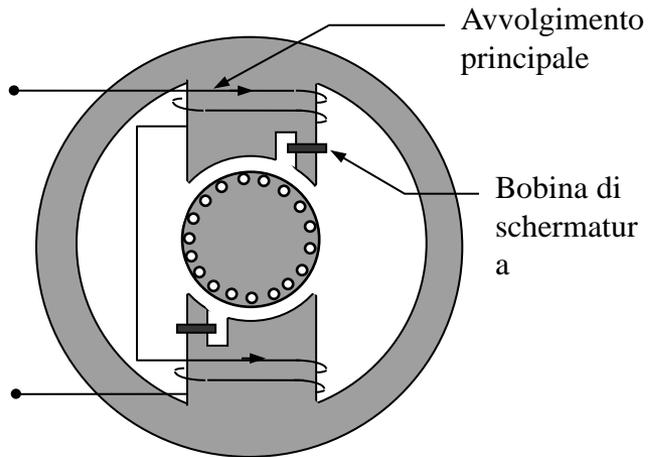
AVVIAMENTO DEL MOTORE ASINCRONO MONOFASE



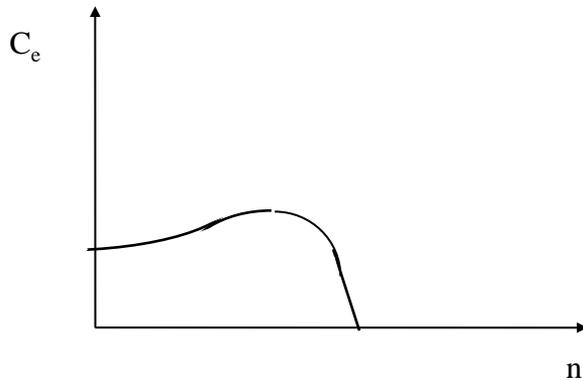
- Mediante un avvolgimento ausiliario caratterizzato da una **elevata resistenza** che viene distaccato da un interruttore centrifugo, appena superato il transitorio di avviamento, è possibile, dall'unica tensione di alimentazione ottenere due correnti quasi in quadratura.
- Nella fase di avviamento il motore si comporta come una **macchina bifase** ed il campo risultante prodotto è un campo rotante con una coppia di spunto non nulla.
- Lo stesso effetto si può ottenere con un avvolgimento ausiliario con una bassa resistenza, ma ponendo in serie ad esso un condensatore.



AVVIAMENTO DEL MOTORE ASINCRONO MONOFASE



- Lo statore del motore asincrono monofase può essere realizzato con **poli schermati**.



- L'asimmetria del circuito magnetico produce una (piccola) coppia di spunto.