

## *Corso di Macchine Elettriche : Valutazione*

L'esame prevede per gli studenti che seguono il corso:

- una prova scritta intermedia compresa tra il **18 e il 23 Aprile**
- una prova scritta di fine corso
- una prova orale finale da sostenere entro l'inizio del corso di Macchine Elettriche

La prima prova intermedia verterà sulle nozioni di base delle macchine elettriche e sui trasformatori.

La seconda prova di fine corso verterà sulle generalità

La prova orale sulle macchine elettriche sincrone e asincrone.

## *Corso di Macchine Elettriche I : Valutazione*

Il programma del corso di Macchine Elettriche e il materiale didattico utilizzato durante il corso sarà disponibile in rete.

*<http://people.unica.it/alfonsodamiano/>*

# *Classificazione delle Macchine Elettriche*

*Si definisce macchina elettrica (M.E.) un qualunque dispositivo capace di eseguire una conversione di energia elettrica in una qualunque altra forma di energia*

## *Forme di conversione energetica*

*Meccanica ↔ Elettrica*

*Chimica ↔ Elettrica*

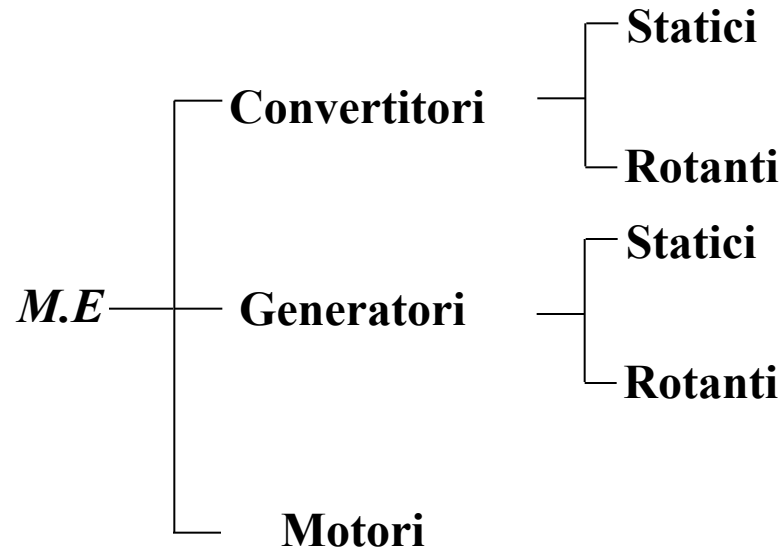
*Termica ↔ Elettrica*

*Elettrica ↔ Elettrica*

*Luminosa ↔ Elettrica*

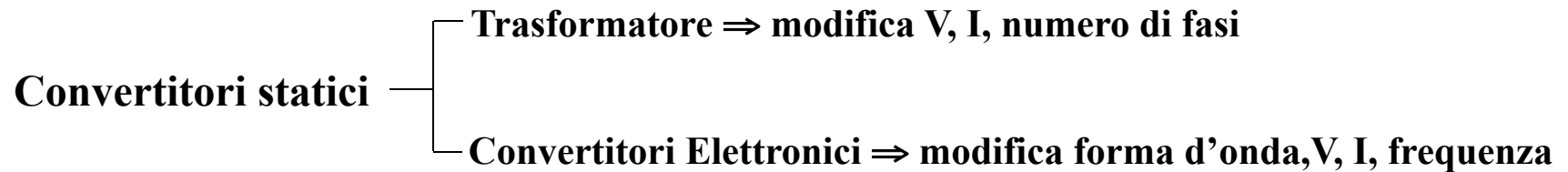
# Classificazione delle Macchine Elettriche

Una prima classificazione delle M.E. viene condotta in base al tipo di conversione energetica effettuata e al tipo di costruzione



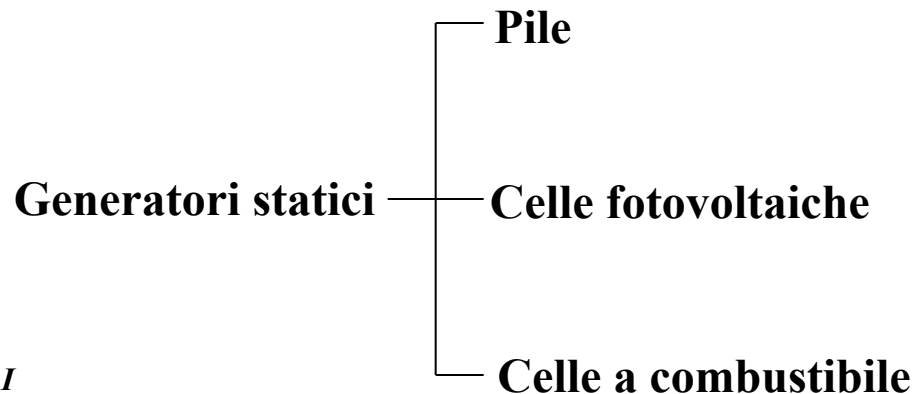
## Classificazione delle Macchine Elettriche

**Convertitori:** M.E. che eseguono la trasformazione di proprietà caratteristiche di sistemi elettrici. ( forma d'onda, numero di fasi, valore della tensione e/o della corrente)



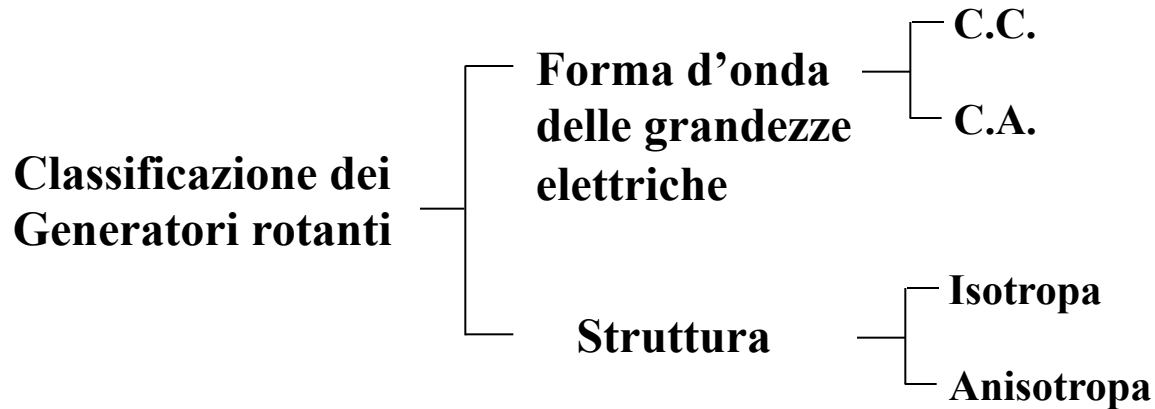
**Convertitori rotanti**  $\longrightarrow$  Motore a cc + Generatore asincrono  $\Rightarrow$  conversione DC\AC trifase

**Generatori:** M.E. che eseguono la trasformazione di altre forme di energia in energia elettrica

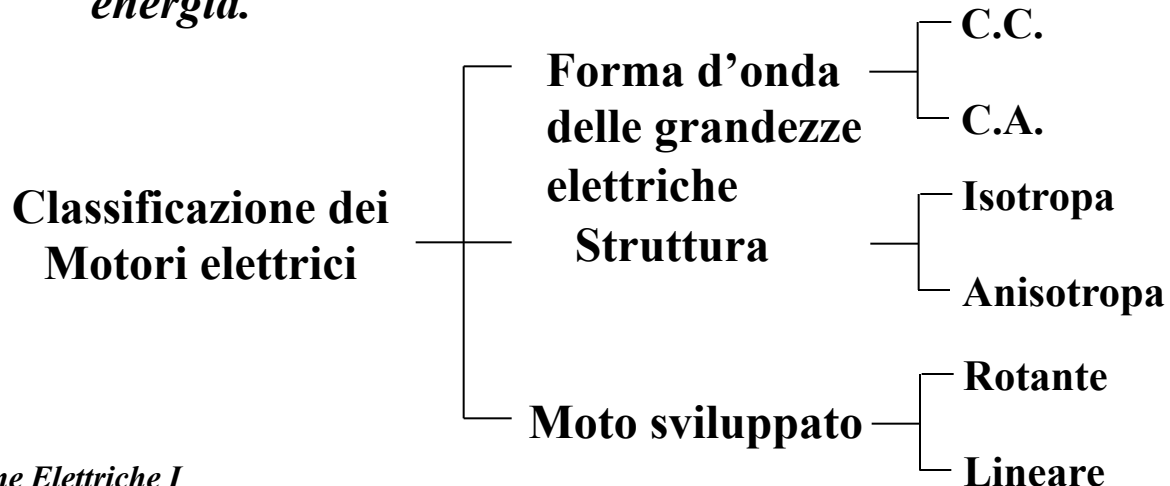


# Classificazione delle Macchine Elettriche

*I generatori rotanti eseguono una conversione dell'energia meccanica in elettrica.*

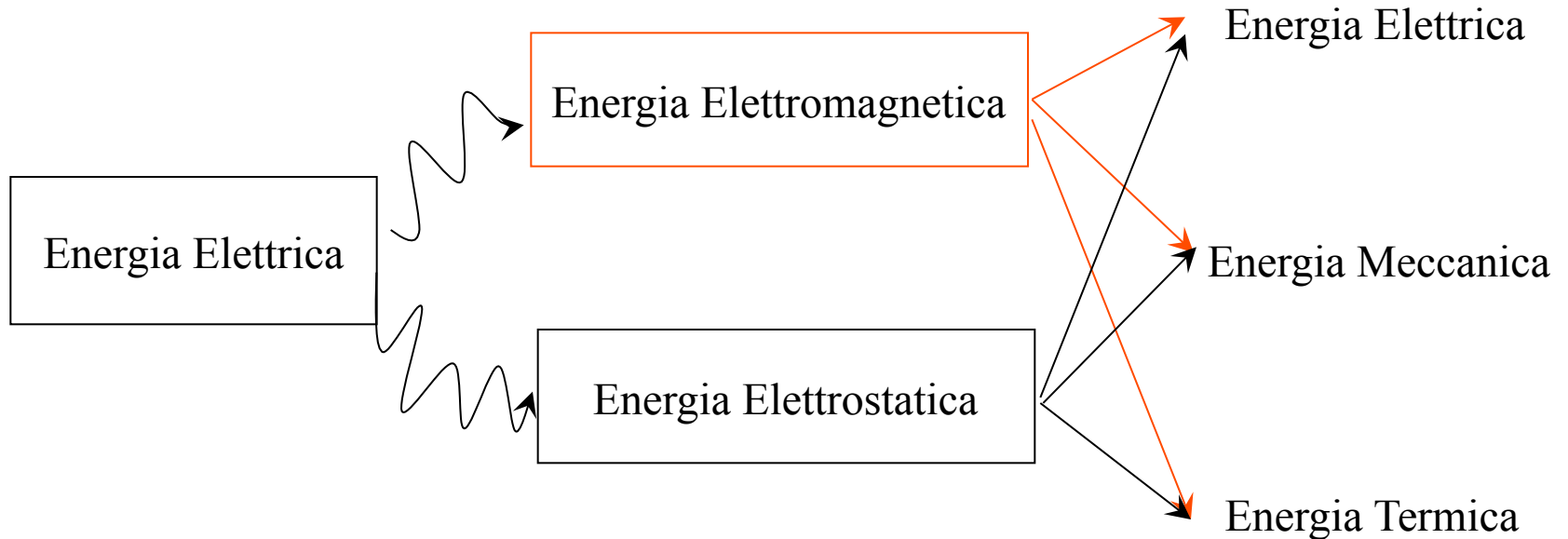


*Motori: M.E. che eseguono la trasformazione dell'energia elettrica in altre forme di energia.*



## Processi di conversione dell'Energia Elettrica

*La conversione dell'energia elettrica avviene attraverso una conversione intermedia in energia elettrostatica o elettromagnetica.*



# Processi di conversione dell'Energia Elettrica

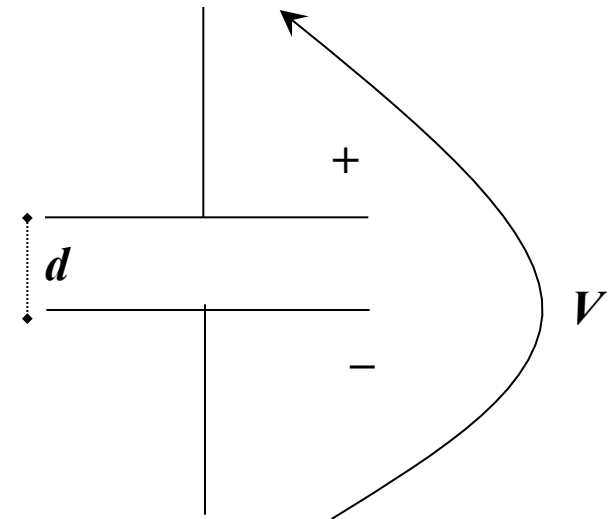
*Analisi del processo di conversione dell'energia elettrica in energia meccanica attraverso la conversione intermedia in energia elettrostatica.*

*Calcolo dell'energia fornita dal generatore elettrico*

$$W_e = \int_0^t V i_c dt = V \int_0^t i_c dt = VC \int_0^V \frac{dV_c}{dt} dt = CV^2;$$

*Calcolo dell'energia immagazzinata nel campo elettrostatico*

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow W_c = \int_0^t V_c i_c dt = C \int_0^V V_c dV_c = \frac{1}{2} CV^2$$





# Processi di conversione dell'Energia Elettrica

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}; \quad V = Kd; \quad W_c = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \varepsilon K^2 Ad$$

$$w_c = \frac{1}{2} \varepsilon K^2; \quad \Delta = Ad;$$

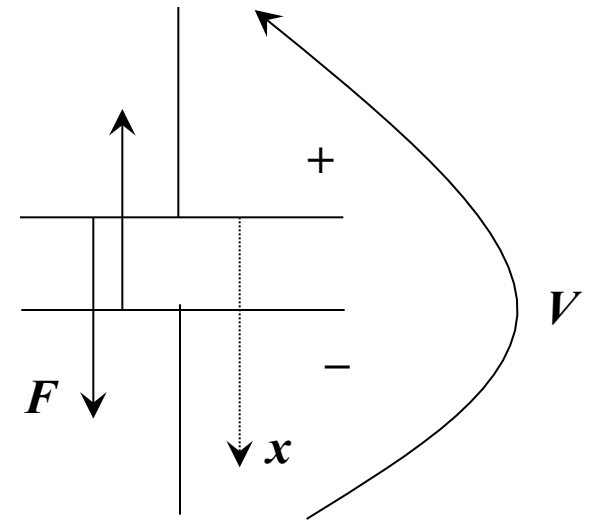
$$W_c = w_c \Delta;$$

***Sulle superfici del condensatore piano sono presenti cariche di segno opposto.***

***Le forze di attrazione sviluppate, di tipo Coulombiano, possono essere determinate applicando il principio dei lavori virtuali. La valutazione può essere effettuata o considerando costante la tensione o il campo tra le armature***

$$F = \left. \frac{\partial W_c}{\partial x} \right|_{K=\text{cost}} \quad F \Big|_{K=\text{cost}} = \frac{1}{2} \frac{\partial \varepsilon K^2 Ax}{\partial x} = \frac{1}{2} \varepsilon K^2 A = w_e A$$

$$F = \left. \frac{\partial W_c}{\partial x} \right|_{V=\text{cost}} \quad F \Big|_{V=\text{cost}} = \frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{1}{2} V^2 \frac{\varepsilon A}{x^2} = -w_e A$$



## Processi di conversione dell'Energia Elettrica

*Analisi del processo di conversione dell'energia elettrica in energia meccanica attraverso la conversione intermedia in energia elettromagnetica.*

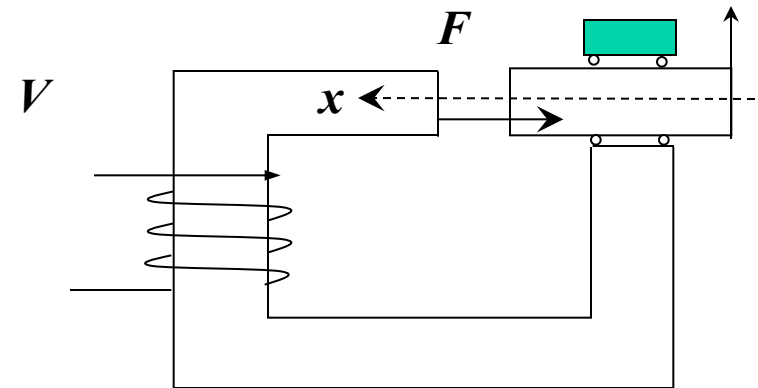
$$v + e = Ri;$$

$$vi dt + ei dt = Ri^2 dt$$

$$W_e = R \int_0^t i^2 dt - \int_0^t ei dt = W_j + \int_0^\lambda i d\lambda;$$

$$\lambda = L i \Rightarrow W_m = \int_0^\lambda i d\lambda = L \int_0^I i di = \frac{1}{2} LI^2;$$

$$NI = Hl \Rightarrow W_m = \frac{1}{2} N^2 I^2 \Gamma = \frac{1}{2} H^2 l^2 \mu \frac{S}{l} = \frac{1}{2} \mu H^2 v;$$

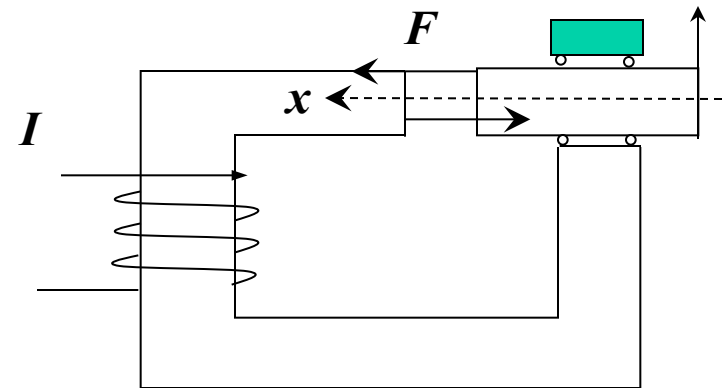


## Processi di conversione dell'Energia Elettrica

*Le forze sviluppate possono essere determinate considerando o la corrente costante o il flusso costante.*

$$F = \left. \frac{\partial W_m}{\partial x} \right|_{I=\text{kost}}$$

$$F = \left. \frac{\partial W_m}{\partial x} \right|_{\lambda=\text{kost}}$$



$$F = \frac{1}{2} (NI)^2 \frac{\partial \Gamma}{\partial x} = -\frac{1}{2} \left( \frac{B}{\mu} x \right)^2 \mu \frac{S}{x^2} = -w_m S$$

$$F = \frac{1}{2} \lambda^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{L} \right) = \frac{1}{2} \phi^2 \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} S = w_m S$$

# Processi di conversione dell'Energia Elettrica

## Confronto dei due processi di conversione

$$F_M = w_m S$$

$$F_E = w_e S$$

*Le forze nei due sistemi considerati sono proporzionali alle rispettive energie specifiche. Confrontiamo queste quantità in due condizioni considerabili limite da un punto di vista ingegneristico*

### Sistema elettrostatico

### Sistema elettromagnetico

*Mezzo: aria*

*Condizione limite elettrostatica:*

*Potere di rottura del dielettrico  $\Rightarrow$  Aria 30kV/cm*

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon K^2 \quad \epsilon_0 = 8.85 \text{ pF} / \text{m}$$

$$w_e \cong 0.4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}$$

*Condizione limite elettromagnetica:*

*Legato alla fmm  $\Rightarrow$  in aria  $B=1 \text{ T}$   $H \cong 8 \cdot 10^5 \text{ A/m}$*

$$w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} / \text{m}$$

$$w_m \cong 0.4 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}$$

## *Processi di conversione dell'Energia Elettrica*

$$\frac{w_m}{w_e} \cong 10^4$$

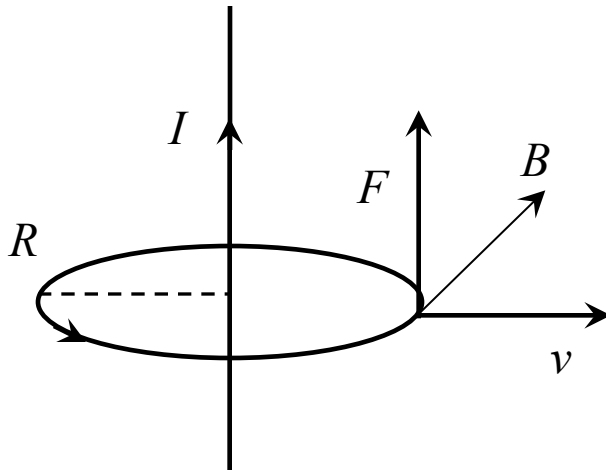
*Il confronto evidenzia come l'energia specifica dei sistemi elettromagnetici sia all'incirca 10000 volte quella dei sistemi elettrostatici. Ciò evidenzia il motivo per cui la maggior parte dei dispositivi di conversione dell'energia elettrica siano di tipo elettromagnetico.*

## *Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica*

- Legge della circuitazione del campo magnetico;
- Legge di Faraday Lenz;
- Relazioni per la determinazione delle forze nei sistemi elettromagnetici;
- Leggi di Kirchhoff.

### *Legge della circuitazione del campo magnetico*

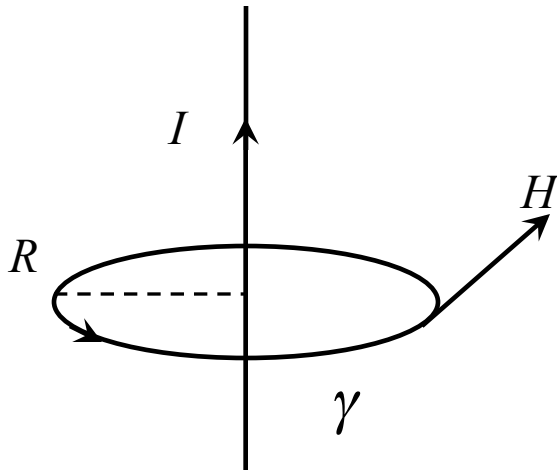
Su una carica in moto  $Q$  con velocità pari a  $v$  si sviluppa una forza  $F$



$$\bar{F} = (\bar{v} \wedge \bar{B})Q$$

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R}$$

## Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica



$$\bar{B} = \mu \bar{H} \qquad H = \frac{I}{2\pi R}$$

L'intensità di campo magnetico  $H$  dipende esclusivamente dalle caratteristiche geometriche del sistema e dalla corrente  $I$ .

$$\oint_{\gamma} \bar{H} \circ d\bar{l} = I$$

Generalizzando si ottiene la legge sulla circuitazione del campo magnetico

$$\Rightarrow \oint_{\gamma} \bar{H} \circ d\bar{l} = NI = \int_{\Sigma(\gamma)} \bar{J} \circ \bar{d}s$$

Il confronto con la legge sulla circuitazione del campo elettrico evidenzia le analogie tra la f.e.m e la quantità  $NI$  che per tal ragione tale quantità viene anche definita forza magneto motrice (f.m.m.)

$$\oint_{\gamma} \bar{K} \circ d\bar{l} = e$$

***Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica***

Le linee di flusso di campo magnetico non presentano né inizio né fine ciò è indicativo della assenza di monopoli magnetici e quindi della solenoidalità del campo magnetico.

$$\oint_{\Sigma} \bar{B} \circ \bar{d}s = 0$$

La conoscenza puntuale della corrente e della permeabilità magnetica assoluta consente di determinare la distribuzione di B ed H.



## Legge di Faraday Lenz

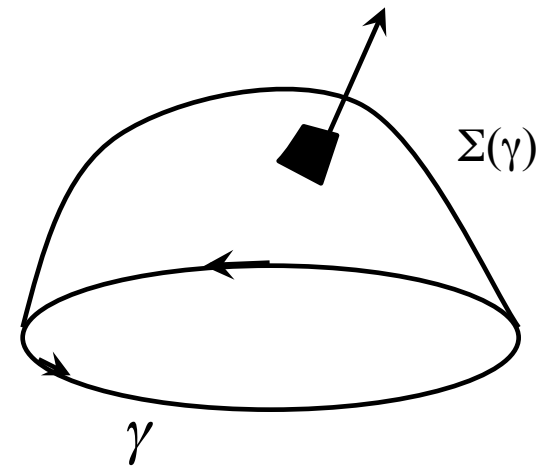
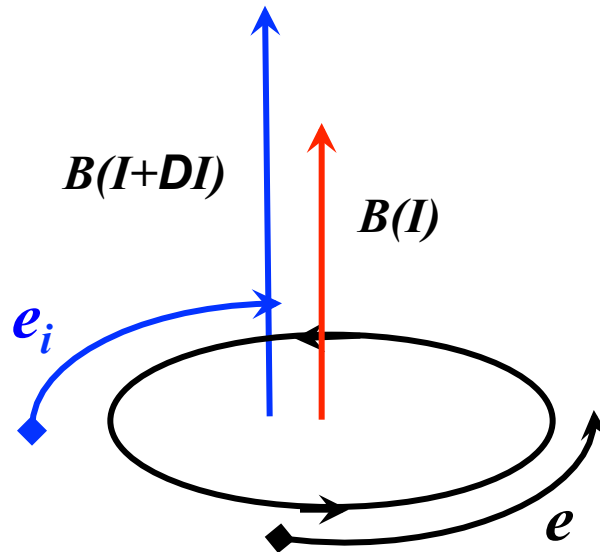
Spira chiusa immersa in un campo magnetico tempo variante

$$e = \oint_{\gamma} \bar{K} \circ \bar{dl}$$

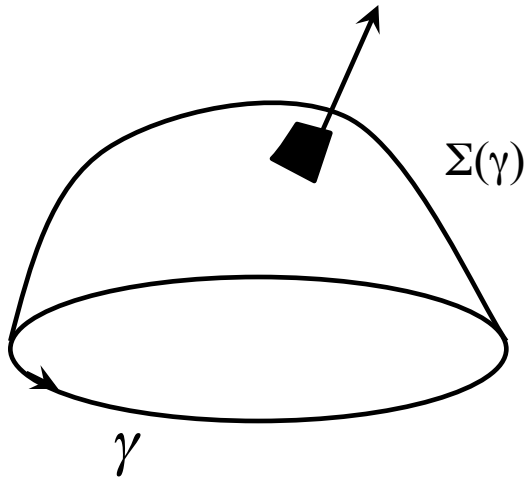
Per valutare il segno della tensione indotta è necessario quindi fissare un verso di percorrenza alla curva  $\gamma$

$$\phi = \int_{\Sigma(\gamma)} \bar{B} \circ \bar{ds}$$

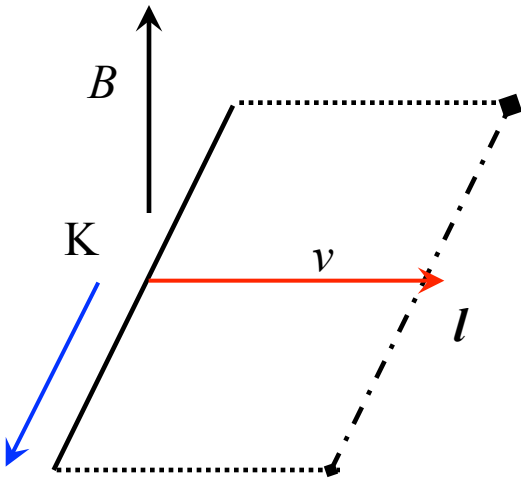
$$e_i = -\frac{d\phi}{dt}$$



# Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica



$$e = -\frac{d\phi(x,t)}{dt} = -\left(\frac{d\phi(x,t)}{dx}v + \frac{d\phi(x,t)}{dt}\right)$$

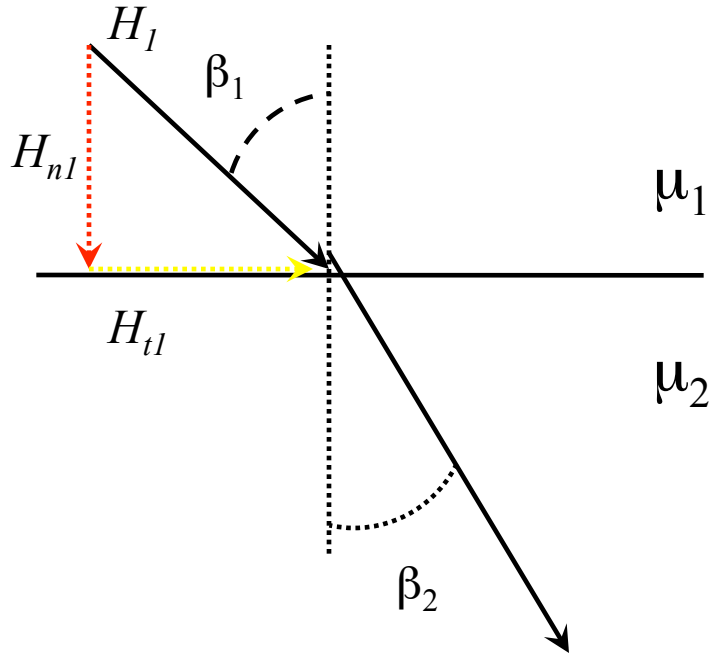


$$\bar{F} = (\bar{v} \wedge \bar{B})Q \quad \Rightarrow \quad \bar{K} = \frac{\bar{F}}{Q}; \quad e = \bar{K} \circ \bar{l}$$

$$e = \bar{v} \wedge \bar{B} \circ \bar{l}$$

# Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica

## Legge di rifrazione delle linee di campo magnetico



Applicando la legge sulla circuitazione

$$H_{t1} = H_{t2}$$

Applicando la condizione di solenoidalità

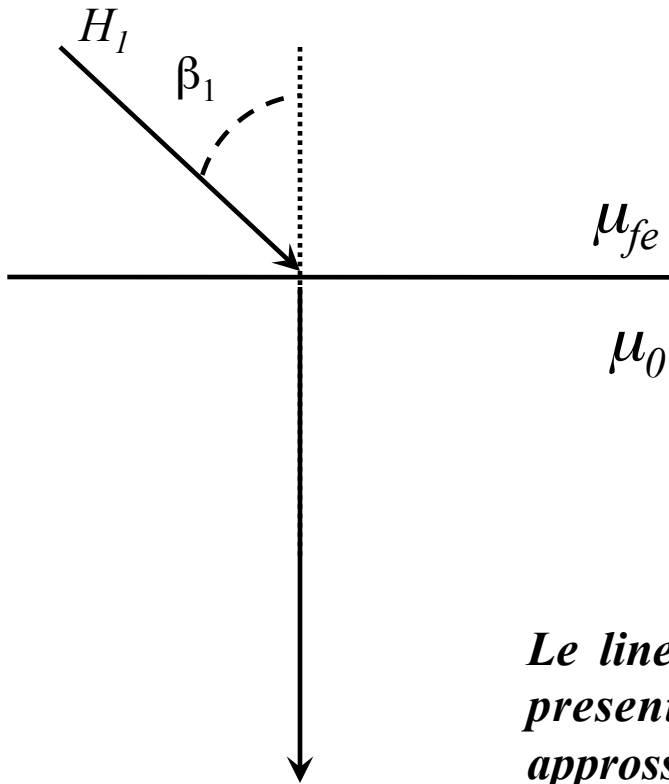
$$B_{n1} = B_{n2} \implies H_{n1} = \mu_2 H_{n2} / \mu_1$$

*Il campo magnetico  $H$  presenta, nella componente normale alla superficie di separazione tra due mezzi a permeabilità magnetica differente, una discontinuità.*

$$\tan \beta_1 = \frac{B_{t1}}{B_{n1}} = \frac{\mu_1 H_{t1}}{B_{n2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{H_{t2}}{H_{n2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \tan \beta_2$$

$$\frac{\tan \beta_1}{\tan \beta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

## Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica



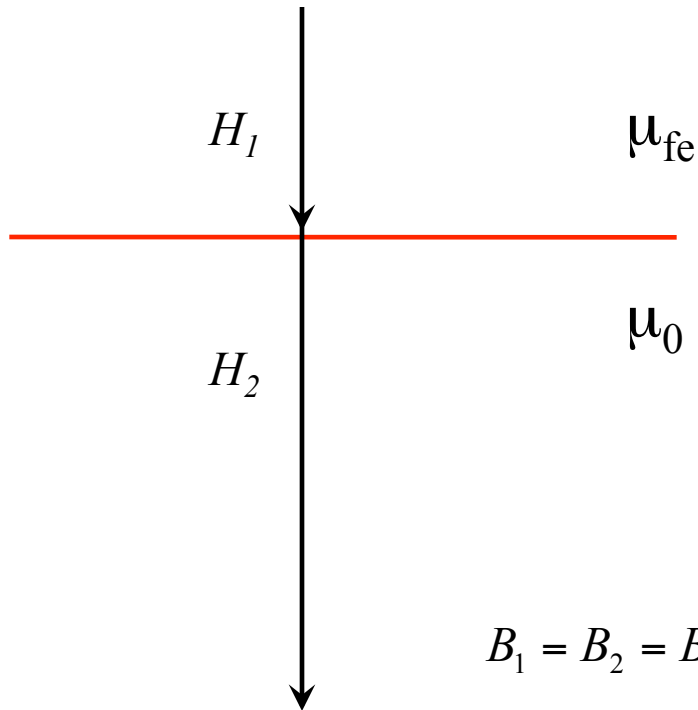
Es: mezzo 1 ferro  $\mu_1 = 8\pi \cdot 10^{-4} \text{ H/m}$ ;  
 mezzo 2 aria  $\mu_2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  ;  
 $\beta_1 = 40^\circ$

$$\tan \beta_1 = 2000 \tan \beta_2$$

$$\beta_2 = 0.024^\circ$$

*Le linee di flusso in aria sulla superficie di separazione presentano una direzione che può, con sufficiente approssimazione, considerarsi ortogonale.*

## Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica



Alla discontinuità di campo magnetico  $H$  corrisponde una discontinuità nella energia magnetica specifica  $w$ .

Consideriamo un tubo di flusso ortogonale alla superficie di separazione. L'energia specifica sulle due facce opposte della superficie assume il valore:

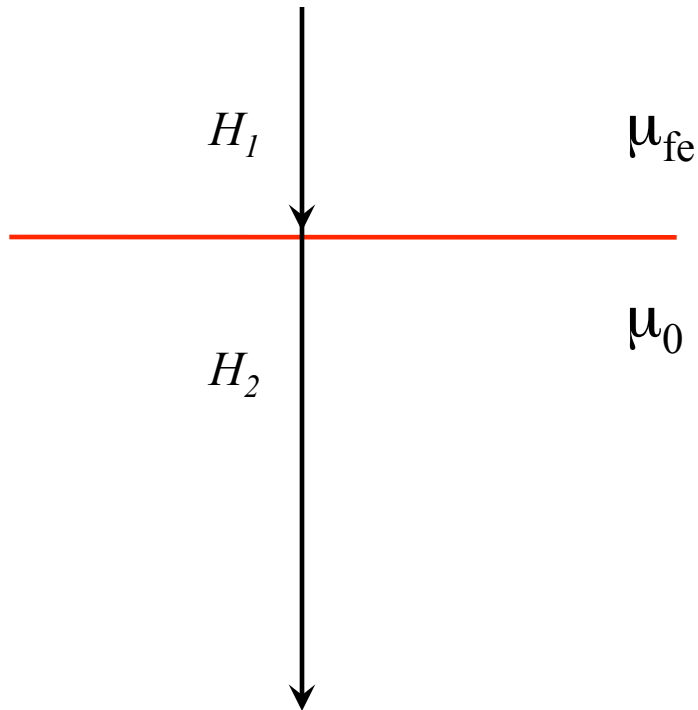
$$w_1 = \frac{1}{2} H_1 B_1 \quad w_2 = \frac{1}{2} H_2 B_2$$

$$B_1 = B_2 = B \quad \Rightarrow \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad w_1 = \frac{1}{2} H_1 B = \frac{1}{2} \frac{\mu_2}{\mu_1} H_2 B = \frac{\mu_2}{\mu_1} w_2$$

$$w_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1} w_2 \Rightarrow w_{fe} = \frac{1}{\mu_r} w_0$$

$$F dx = dL \Rightarrow F = \frac{dW}{dx}$$

## Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica



### Pressione sulla superficie di separazione

$$\frac{F}{S} = \frac{1}{2} [\mu_2 - \mu_1] \left[ H_{t1}^2 + \frac{\mu_1}{\mu_2} H_{n1}^2 \right]$$

Forza esercitata dal mezzo a permeabilità  $\mu_2$  al mezzo a permeabilità  $\mu_1$

**Es: mezzo 1 ferro  $\mu_1 = 8\pi \cdot 10^4$  H/m;**

**mezzo 2 aria  $\mu_2 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m ;**

**$B = 1$  T;**

$$p = \frac{1}{2} [\mu_{fe} - \mu_0] \left[ \frac{\mu_0}{\mu_{fe}} H_0^2 \right] = \frac{1}{2} [\mu_r - 1] \left[ \frac{B_0^2}{\mu_{fe}} \right]$$

$$p = \frac{1}{2} [2000 - 1] \left[ \frac{10^4}{8\pi} \right] \cong 800 \text{ kPa} = 8 \text{ kg/cm}^2$$

## *Richiami delle leggi fondamentali dell'Elettrotecnica*

### *1ª legge di Kirchhoff: principio di conservazione della quantità di carica*

*Data un nodo nel quale confluiscono  $n$  rami, scelto convenzionalmente positivo il verso delle correnti entranti nel nodo, la somma delle correnti confluenti nel nodo è  $= 0$*

$$\sum_i i_i = 0$$

### *2ª legge di Kirchhoff: Estensione del principio di conservazione dell'energia.*

*Data una maglia chiusa, la somma delle energie erogate dai generatori deve essere uguale a quelle dissipate e/o immagazzinate per via elettrostatica e/o elettromagnetica*

$$dW_g = dW_j + dW_m + dW_e$$

$$vidt = Ri^2 dt + id\varphi + u_c dQ$$

$$vidt = Ri^2 dt - iedt + u_c idt$$

$$v = Ri - e + u_c$$

generalizzando

$$\sum_i v_i + \sum_j e_j = \sum_{\xi} R_{\xi} i_{\xi} + \sum_{\chi} u_{\chi}$$

## *Analisi dei fenomeni termici nel M.E.*

*Le ME di tipo elettromagnetico sono delle strutture piuttosto complesse*

*Sistema elettrico* → avvolgimenti

*Sistema dielettrico* → isolanti

*Integrazione*

*Sistema magnetico*

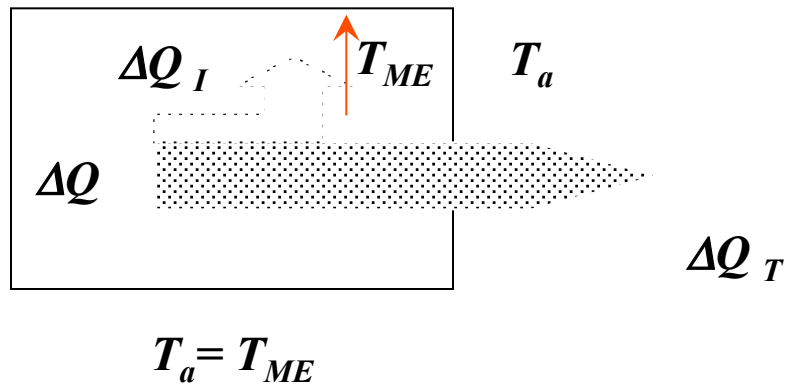
*Sistema meccanico* → dispositivi di supporto, movimento  
dispersione del calore



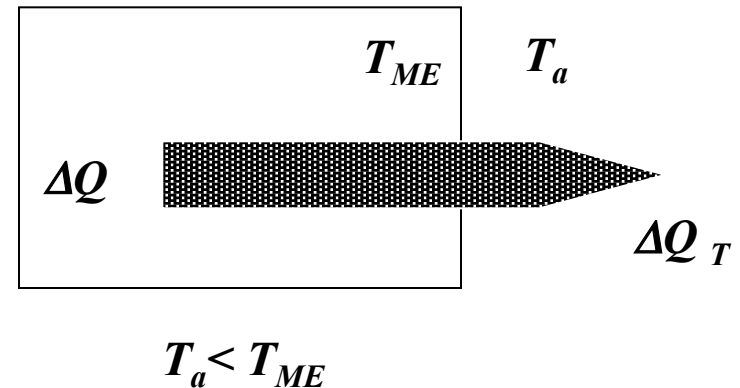
## Analisi dei fenomeni termici nel M.E.

*Durante il processo di conversione dell'energia elettrica sono presenti processi di conversione secondaria di tipo dissipativo caratterizzati dalla produzione di calore.*

*Condizione di transitorio termico*



*Condizione di regime termico*



*La sovratemperatura a cui può essere soggetta la macchina è strettamente legata ai materiali utilizzati nella realizzazione della ME*

*I materiali più sensibili alla temperatura tra quelli utilizzati nelle ME sono i materiali isolanti.*

*Perdita delle caratteristiche isolanti.*



- *perforazione del dielettrico*
- *corto circuiti*
- *Riduzione della vita media della ME*

## *Analisi dei fenomeni termici nel M.E.*

### *Determinazione delle curva di riscaldamento della ME.*

*Ipotesi di studio:*

*ME corpo omogeneo ed isotropo;*

*Funzionamento a potenza assorbita  $P$  costante*

*$P_d$  potenza dissipata ;*

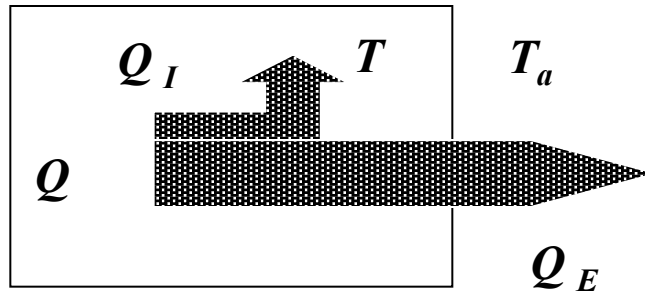
*$E$  equivalente elettrico del calore;*

$$Q = \frac{P_d \Delta t}{E}$$

$$Q = Q_E + Q_I$$

$$Q_E = \alpha S_t (T - T_a) \Delta t$$

*Condizione di transitorio termico*



*$\alpha$  Coefficiente di emissione termica equivalente;*

*$S_t$  Superficie totale di dispersione;*

*$\Delta t$  intervallo di tempo considerato.*

$$Q_I = Mc\Delta T$$

*$M$  massa equivalente della ME*

*$c$  calore specifico*

*$\Delta T$  incremento di temperatura della macchina*

$$\frac{P_d \Delta t}{E} = \alpha S_t (T - T_a) \Delta t + Mc\Delta T$$

## *Analisi dei fenomeni termici nel M.E.*

*Determinazione delle curva di riscaldamento della ME.*

$$\frac{P_d \Delta t}{E} = \alpha S_t (T - T_a) \Delta t + Mc \Delta T$$

$$\frac{P_d}{E} dt = \alpha S_t (T - T_a) dt + Mc dT$$

$$\frac{P_d}{E} = \alpha S_t \vartheta + Mc \frac{d\vartheta}{dt}$$

$$\frac{P_d}{E} = \alpha S_t (T - T_a) + Mc \frac{dT}{dt}$$

$$(T - T_a) = \vartheta \Rightarrow T = \vartheta + T_a \quad \frac{dT}{dt} = \frac{d\vartheta}{dt}$$

$$\frac{(1 - \eta)P}{\alpha S_t E} = \vartheta + \tau \frac{d\vartheta}{dt}$$

$$P_d = (1 - \eta)P$$

$$\tau = \frac{Mc}{\alpha S_t}$$

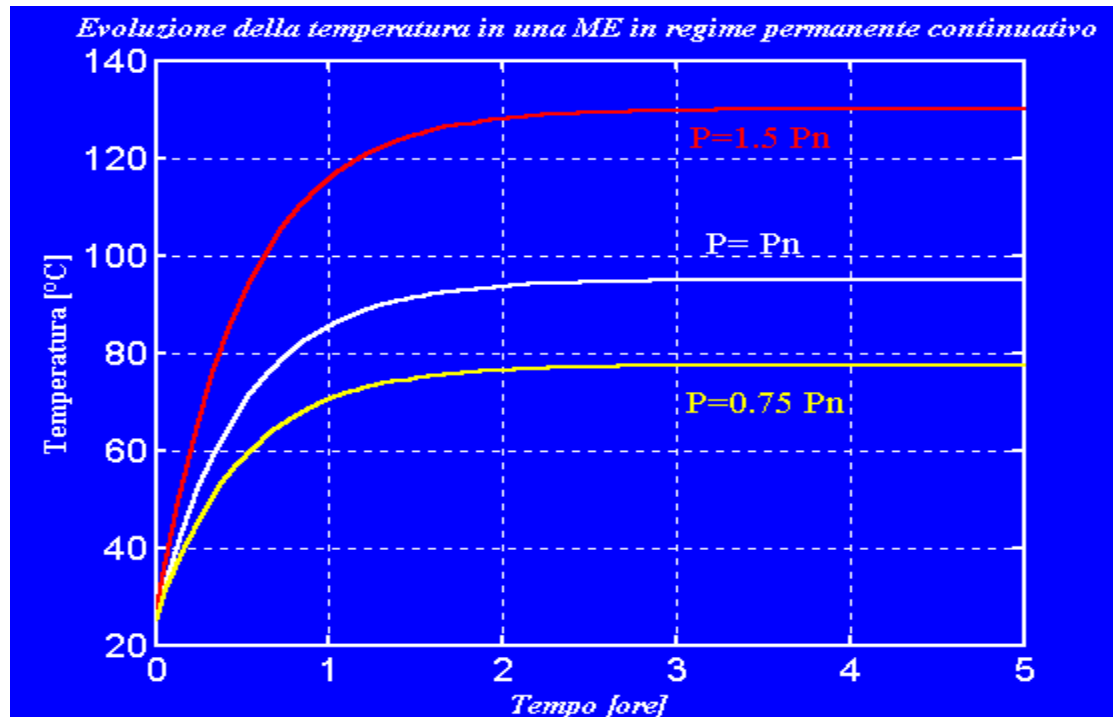
$$\vartheta = \frac{(1 - \eta)P}{\alpha S_t E} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

## Analisi dei fenomeni termici nel M.E.

### Determinazione delle curva di riscaldamento della ME.

$$\vartheta = \frac{(1-\eta)P}{\alpha S_t E} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$\vartheta_{\infty} = \frac{(1-\eta)P}{\alpha S_t E}$$



## *Analisi dei fenomeni termici nel M.E.*

*La Potenza che una ME può erogare è strettamente legata alla massima temperatura a cui i materiali isolanti possono essere sottoposti.*

*La massima temperatura a cui un isolante può essere sottoposto viene indicata dalla classe di isolamento.*

*Le norme CEI assegnano, tramite la classe di isolamento, la massima temperatura a cui ciascun materiale isolante può essere sottoposto.*

Classe di isolamento	Temp. Max Ammissibile °C	Materiali isolanti
Y	95	Materiali organici (Cotone, seta, carta) non impregnati in olio
A	105	Materiali organici impregnati in olio
E	120	Smalti sintetici non immersi un olio; materie plastiche.
B	130	Mica, amianto, bitumi, ecc
F	155	Amianto, fibre e tessuti di vetro con resine epossidiche
H	180	Amianto, fibre e tessuti di vetro con resine siliconiche
C	Oltre 180	Mica, porcellana, vetro, eventualmente con leganti inorganici

*In condizioni di funzionamento nominale la massima temperatura presente nella ME non deve superare il valore limite imposto dalla classe di isolamento.*

## *Analisi dei fenomeni termici nel M.E.*

*La temperatura di regime è strettamente legata alla potenza assorbita dalla ME e alla superficie di scambio.*

$$P = \frac{\partial W_m}{\partial t} = \frac{\partial (w_m V)}{\partial t} = V \frac{\partial w_m}{\partial t}$$

$$\vartheta_{\infty} = \frac{(1-\eta)P}{\alpha S_t E}$$

*La potenza di una ME è direttamente proporzionale al suo volume; la temperatura di regime della macchina è inversamente proporzionale alla superficie. La temperatura di regime a parità di rendimento e di  $\alpha$  aumenta linearmente con l'aumentare della potenza.*

*All'aumentare della potenza della ME i sistemi di raffreddamento diventano sempre più complessi ed efficienti.*

## *Analisi dei fenomeni termici nel M.E.*

### *Classificazione dei sistemi di raffreddamento*

#### *ME Statiche*

- *Con aria a ventilazione naturale;*
- *Con aria a ventilazione forzata;*
- *Con olio a circolazione naturale;*
- *Con olio a circolazione forzata;*
- *Con gas .*

#### *ME rotanti*

- *Ventilazione naturale;*
- *Autoventilate;*
- *Ventilazione forzata;*
- *Ventilazione a circuito chiuso;*
- *Refrigerazione dei conduttori con  $H_2O$  o  $H_2$ .*

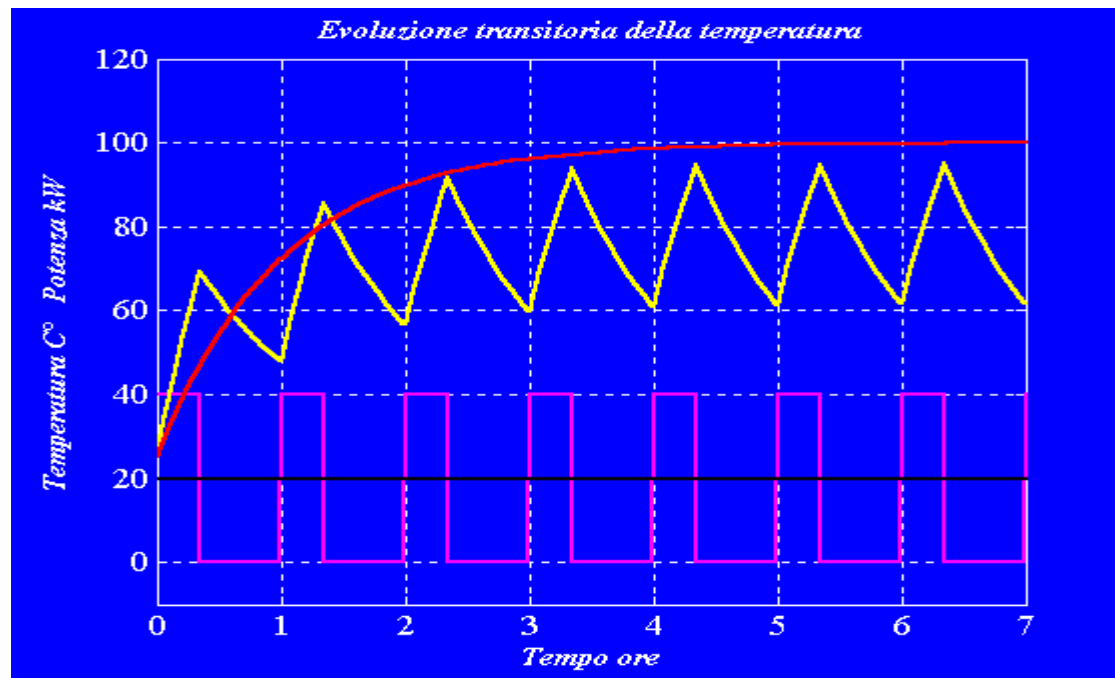
## Analisi dei fenomeni termici nel M.E.

*L'evoluzione termica di una ME viene influenzata anche dal tipo di servizio*

*Servizio permanente continuativo: Funzionamento a carico costante di durata sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico*

*Servizio intermittente di breve durata: Funzionamento a carico costante, minore di quello necessario a raggiungere l'equilibrio termico, seguito da un tempo di riposo sufficiente a ristabilire nella ME la temperatura ambiente.*

*Servizio intermittente periodico: Funzionamento secondo una serie di cicli identici, ciascuno comprendente un periodo di carico e uno di riposo.*





## *Analisi dei fenomeni termici nel M.E.*

*I valori nominali di tensione e frequenza corrente potenza di una ME sono determinati tenendo in grossa considerazione i fenomeni termici.*

### *DATI di TARGA*

*I dati che definiscono le caratteristiche di funzionamento di una ME vengono generalmente riportati su una targa fissata sulla ME , per tal ragione vengono denominati dati di targa.*

*Tipo di macchina;*

*Tipo di servizio; (se assente servizio continuo)*

*Potenza nominale;*

*Corrente nominale;*

*Frequenza nominale;*

*Tensione Nominale;*

*Tipo di corrente;*

*Numero di fasi;*

*Classe di isolamento;*

*Collegamento delle fasi; ecc.*