

# Principi di conversione elettromeccanica

dott. ing. Lucia FROSINI



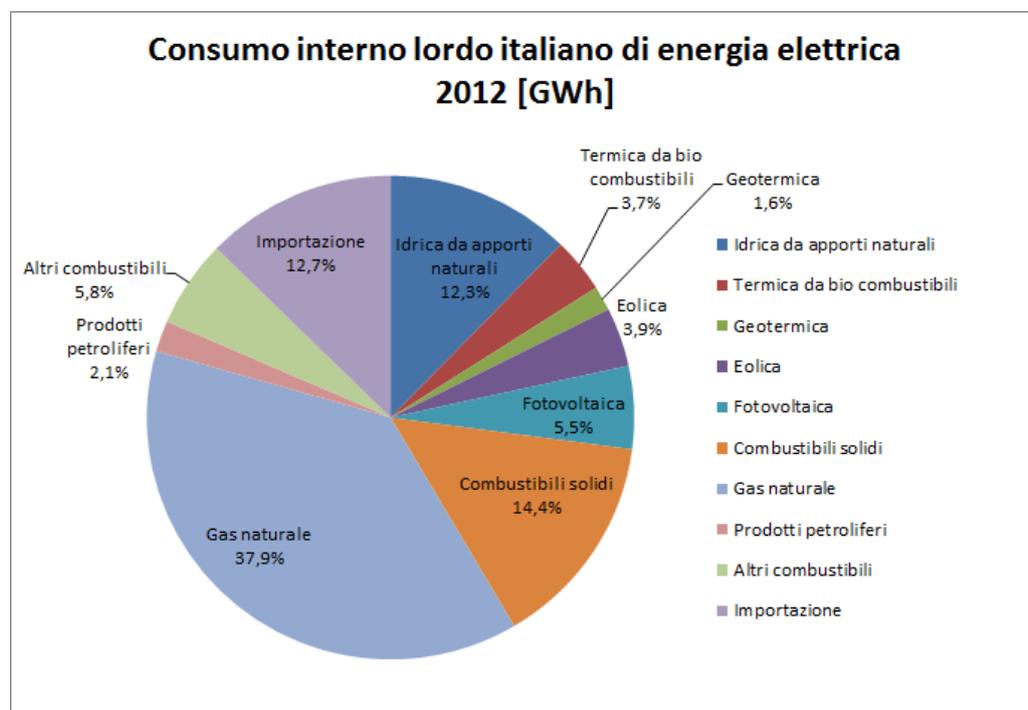
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: [lucia@unipv.it](mailto:lucia@unipv.it)

1

L. Frosini

## Produzione e consumi energia elettrica

L'Italia nel 2012 ha avuto consumi per circa 340.400 GWh di energia elettrica: tale dato è il cosiddetto “consumo interno lordo di energia elettrica”.

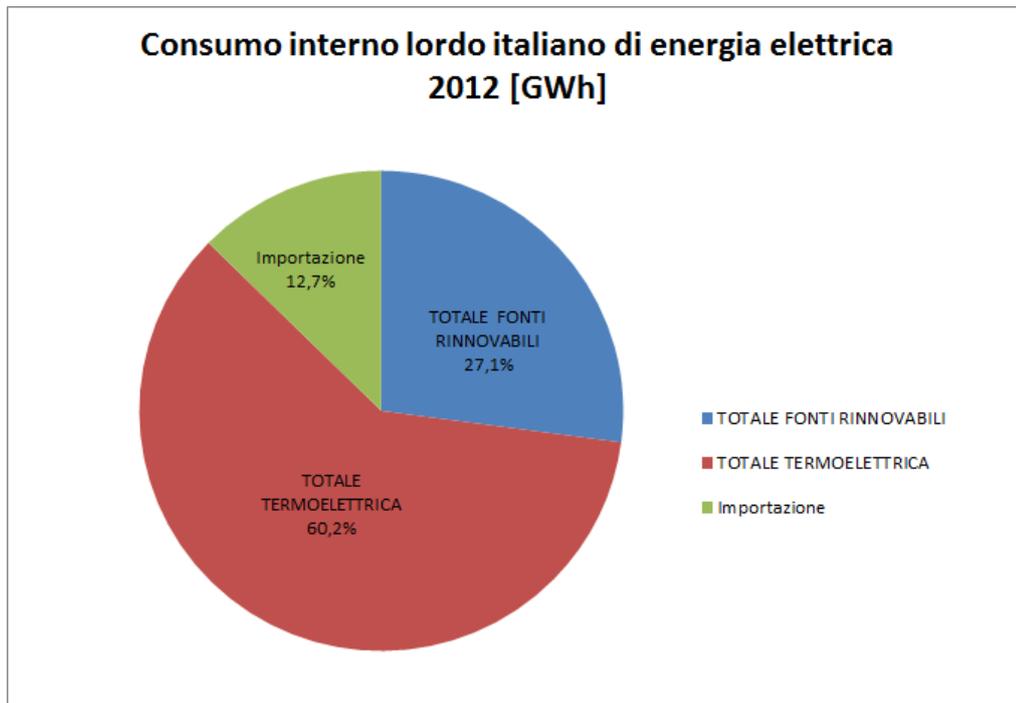


Fonte TERNA  
[www.terna.it](http://www.terna.it)

2

## Produzione e consumi energia elettrica

Sinteticamente:



Fonte TERNA  
[www.terna.it](http://www.terna.it)

3

## Produzione e consumi energia elettrica

Nonostante il parco centrali italiano sia in grado di coprire il fabbisogno interno, l'Italia importa una quantità consistente di energia elettrica.

L'importazione non è sempre proporzionale alla richiesta: il fabbisogno energetico italiano viene sostenuto da energia prodotta all'estero per un'aliquota che può oscillare tra meno del 10% in fase diurna fino a punte massime del 25% durante la notte.

Tale importazione avviene da quasi tutti i paesi confinanti, anche se le quote maggiori sono quella proveniente dalla Svizzera e, a seguire, dalla Francia. È da notare, tuttavia, che attraverso la Svizzera viene veicolata anche parte dell'energia francese richiesta dall'Italia, vista l'insufficienza degli elettrodotti diretti. Considerando questi due Paesi insieme, da Francia e Svizzera proviene quasi l'80% di tutta l'importazione italiana di energia elettrica.

Parte di questa energia viene prodotta con centrali nucleari (in particolare, quasi il 37% di quella svizzera e l'87% di quella francese) .

4

## Produzione e consumi energia elettrica

In effetti l'importazione notturna è percentualmente molto più importante di quella diurna proprio a causa della natura della produzione elettrica con centrali nucleari: queste infatti hanno limitate possibilità di modulare in economia la potenza prodotta e quindi l'energia prodotta durante la notte (in cui l'offerta supera la domanda) ha basso costo di mercato.

Ciò consente di fermare in Italia durante la notte le centrali termoelettriche meno efficienti e le centrali idroelettriche a bacino e di attivare le stazioni di pompaggio idriche, che poi possono rilasciare nuovamente energia durante il giorno.

Questo meccanismo ha reso economicamente conveniente l'importazione di energia dall'estero, da cui il grande sviluppo del commercio di energia negli ultimi anni.

Si osserva che, rispetto al 2011, il consumo interno lordo italiano di energia elettrica si è ridotto dell'1,7% e che l'energia elettrica importata è diminuita del 5,7%.

## Produzione e consumi energia elettrica

Secondo dati riferiti al gennaio 2007, in Italia l'energia elettrica per uso domestico ha il costo medio, al netto della tassazione, più alto di tutta l'Unione Europea. Includendo la tassazione, l'Italia passa - sempre in media - al secondo posto, preceduta solo dalla Danimarca.

Le ragioni di tale costo sono dovute a molti fattori, in parte produttivi ed in parte relativi ai meccanismi di mercato e alla distribuzione: va infatti sottolineato che il puro "costo di produzione" (già inclusi i guadagni del produttore) incide per poco più della metà del costo finale all'utente.

Il costo di produzione è determinato da diversi aspetti; tra questi va tenuto in conto il "mix energetico" (cioè il tipo di fonte utilizzata dalla centrale: gas naturale, carbone, nucleare, idroelettrica, ecc.), ma anche l'età e l'efficienza delle centrali e il tasso d'utilizzo degli impianti hanno impatti significativi.

## Produzione e consumi energia elettrica

Per quanto riguarda le fonti, l'idroelettrico è una delle modalità di produzione più economiche.

Viceversa il gas viene spesso considerato fra le fonti più costose, mentre carbone e nucleare sarebbero più economiche: tuttavia non esiste unanimità di vedute in ambito tecnologico e tali valutazioni possono essere smentite da diversi studi. Ad esempio, riguardo alla convenienza della generazione da fonte nucleare, si nota che anche paesi privi di centrali nucleari hanno costi dell'energia elettrica inferiori all'Italia, pertanto, la presenza o meno di impianti nucleari non influirebbe in maniera sostanziale sul prezzo finale al pubblico.

A tal proposito, uno studio del MIT ha evidenziato che gas e carbone hanno costi piuttosto simili ed inferiori a quelli della fonte nucleare, a meno che quest'ultima fonte non venga favorita con prestiti agevolati e tassando gas e carbone, situazione in cui i costi delle tre modalità produttive si avvicinano.

## Produzione e consumi energia elettrica

Ciò vale per impianti nuovi, in linea con le esigenze di sicurezza e tutela ambientale odierne: l'uso di carbone in vecchi impianti risulta più economico del metano a fronte però di un aumento dell'inquinamento.

In Europa la percentuale d'uso del carbone è significativamente superiore a quella italiana, avendo molti stati europei (in primis Germania e Polonia) notevoli riserve di carbone: questo spiega in parte il maggior costo di produzione italiano (ma anche la minor produzione di CO<sub>2</sub>).

Anche il tasso d'utilizzo delle centrali ha sicuramente un impatto sul costo di produzione. Come già detto, il parco centrali italiano è sfruttato solamente per circa la metà: le rimanenti centrali, costituiscono di fatto un costo in termini di capitale investito ma improduttivo, che viene dunque "spalmato" sui costi produttivi delle altre centrali.

## Produzione e consumi energia elettrica

Rientra nella formazione del costo anche l'inefficienza del sistema trasmissivo, concepito negli anni sessanta come monodirezionale e "passivo": ciò significa che non è in grado di gestire flussi produttivi provenienti da tanti piccoli impianti né di gestire dinamicamente i carichi (riducendo quindi la differenza fra carico di punta e di base). È inoltre particolarmente insufficiente e congestionato, specie al sud.

Considerando sia i combustibili sia l'energia elettrica importata, l'Italia dipende dall'estero per circa il 75,7% della propria energia elettrica per l'anno 2012.

Tale valore è costituito dalla quota di generazione termoelettrica (esclusi i contributi relativi a combustibile nazionale, combustione di biomasse e rifiuti), più gli scambi di energia con l'estero.

## Produzione e consumi energia elettrica

Si osserva che, anche modificando il mix energetico, non sono possibili sostanziali variazioni di questa percentuale: che sia carbone, petrolio, uranio o metano, le riserve italiane sono comunque molto inferiori al reale fabbisogno, per cui l'approvvigionamento avverrebbe comunque principalmente dall'estero.

In pratica, l'unica modalità di generazione dell'energia che potrebbe realmente considerarsi "interna" è quella che fa affidamento sulle fonti rinnovabili.

Questa situazione è comune alla gran parte dei paesi europei, dipendenti comunque da paesi extraeuropei per l'importazione di idrocarburi o uranio.

## Trasmissione di energia elettrica

La **trasmissione** di energia elettrica è il passaggio intermedio tra la **produzione** e la **distribuzione** agli utilizzatori dell'energia elettrica.

In Italia, la società responsabile della trasmissione e del dispacciamento dell'energia elettrica sulla rete ad alta e altissima tensione su tutto il territorio nazionale è TERNA.

Oltre agli elettrodotti, operanti a tensioni dell'ordine delle centinaia di kV, per lo più in corrente alternata, la rete di trasmissione comprende interruttori, trasformatori e strumenti di misura.

Lo scopo è di portare l'energia dalle centrali elettriche ai luoghi di utilizzo, che possono essere distanti centinaia di chilometri.

La rete di trasmissione ha anche la funzione di interconnettere i centri di produzione non solo nazionali, ma anche transnazionali, al fine di ottimizzare la produzione e l'utilizzazione.

## Trasmissione di energia elettrica

La convenienza del trasporto dell'energia elettrica aumenta con l'aumentare della tensione.

Le perdite di energia in un elettrodotto sono dovute principalmente all'effetto Joule: la corrente elettrica che scorre nei cavi produce calore.

Poiché la potenza trasferita dalla linea è uguale al prodotto di tensione per corrente, si intuisce che, a parità di potenza, è sufficiente aumentare la tensione per ridurre la corrente e quindi le perdite.

L'uso di tensioni elevate presenta dei limiti, dovuti principalmente al problema dell'isolamento: se viene superata la rigidità dielettrica dell'aria, si innesca una scarica elettrica che, oltre a disperdere energia, danneggia conduttori e isolanti.

Nelle linee a centinaia di kV la lunghezza degli elementi isolanti che sostengono i cavi e tutte le distanze cavo-cavo e cavo-traliccio sono dell'ordine dei metri.

## Trasmissione di energia elettrica

In caso di pioggia l'acqua che si deposita sulla superficie degli isolanti rappresenta un percorso a bassa impedenza per la corrente: per questo gli isolatori sospesi a “cappa e perno” sono costituiti da una serie di piatti con la parte concava rivolta verso il basso, in modo che ciascun elemento rimanga parzialmente asciutto.

Nei sistemi in corrente alternata diventano rilevanti la capacità e l'induttanza: questi elementi determinano una trasmissione di potenza reattiva, che richiede una maggiore corrente (a parità di potenza attiva trasmessa) e quindi ulteriori perdite per effetto Joule. Nella rete vengono introdotti sistemi automatici di compensazione della potenza reattiva, come condensatori o speciali trasformatori (Phase Shifting Transformer, PST), che contribuiscono inoltre a stabilizzare la tensione.

La rete italiana di trasmissione disperde circa il 6,4% dell'energia elettrica richiesta (dato del 2012).

## Conversione dell'energia

L'energia elettrica ha un ruolo di “intermediario”.

Infatti, nonostante generalmente l'energia si presenti sotto altre forme, sia come disponibilità che come utilizzo (es. meccanica, termica), risulta conveniente il passaggio intermedio alla forma elettrica, in quanto l'energia elettrica è facilmente trasportabile e controllabile con relativa affidabilità ed efficienza.

Si definisce **macchina elettrica** un dispositivo in grado di convertire l'energia elettrica tramite l'interposizione, a livello macroscopico, di un campo elettromagnetico.

Secondo questa definizione, esempi di macchine elettriche sono:

- i trasformatori (conversione da energia elettrica ad energia elettrica);
- i motori e i generatori (conversione dell'energia elettrica ad energia meccanica e viceversa).

## Conversione dell'energia

Attualmente è possibile convertire l'energia elettrica in energia elettrica anche tramite dispositivi che utilizzano componenti a semiconduttori.

In tal caso, esiste ancora l'interposizione di campi elettrici e magnetici di accoppiamento, ma a livello microscopico, per cui si parla di conversione statica dell'energia e di convertitori statici o convertitori elettronici di potenza.

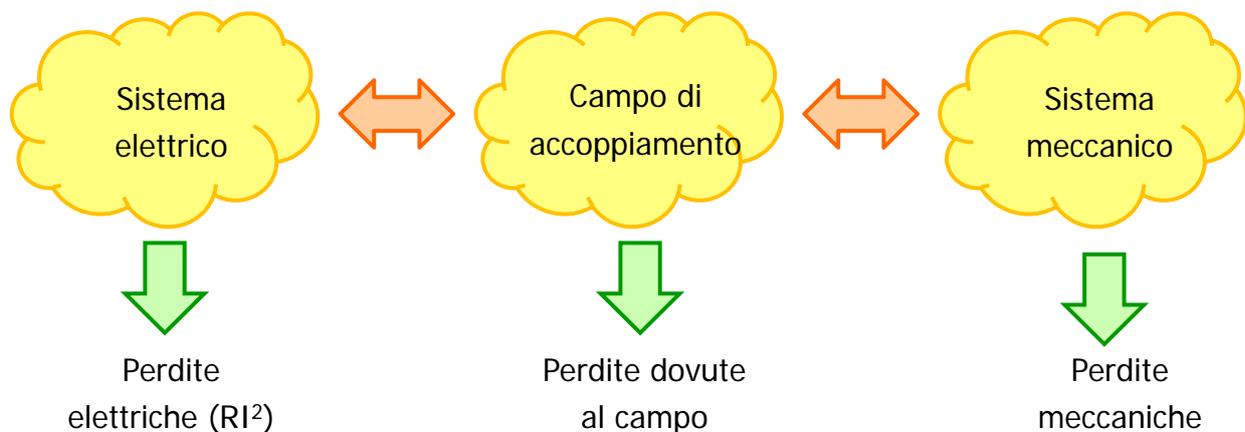
La conversione elettromeccanica dell'energia comporta la trasformazione tra due sistemi di energia elettrica in energia meccanica o viceversa.

L'accoppiamento tra i due sistemi avviene tramite un campo elettromagnetico.

In generale, sono presenti sia il campo magnetico che quello elettrico ed è proprio l'energia immagazzinata in tali campi, o meglio, la sua tendenza a liberarsi e a compiere lavoro, che permette la conversione.

## Conversione dell'energia

Una rappresentazione schematica della conversione elettromeccanica dell'energia è la seguente, dove le frecce rappresentano i flussi di energia:



Ovviamente il rendimento della trasformazione non è unitario a causa delle perdite.

Si osserva la reversibilità della conversione (frecce bidirezionali), consentita attraverso generatori elettrici e motori elettrici.

## Conversione dell'energia

La conversione elettromeccanica dell'energia risulta possibile grazie all'esistenza in natura di fenomeni fisici che legano i campi elettromagnetici e le forze meccaniche.

I principali fenomeni utilizzati in pratica sono i seguenti:

■ Forza meccanica agente su un conduttore percorso da corrente quando questo è immerso in un campo magnetico (forza di Lorentz). La conversione è reversibile poiché in un conduttore in movimento in un campo magnetico nasce una tensione indotta.

■ Forza meccanica agente su un materiale ferromagnetico quando questo è immerso in un campo magnetico (forza di Maxwell, che tende a “chiudere” il traferro tra due blocchi di materiali ferromagnetici). Tale forza tende ad allinearlo con il campo e a spostarlo dove il campo è più intenso. Anche questa conversione è reversibile in quanto lo spostamento del materiale produce una variazione del flusso magnetico.

## Conversione dell'energia

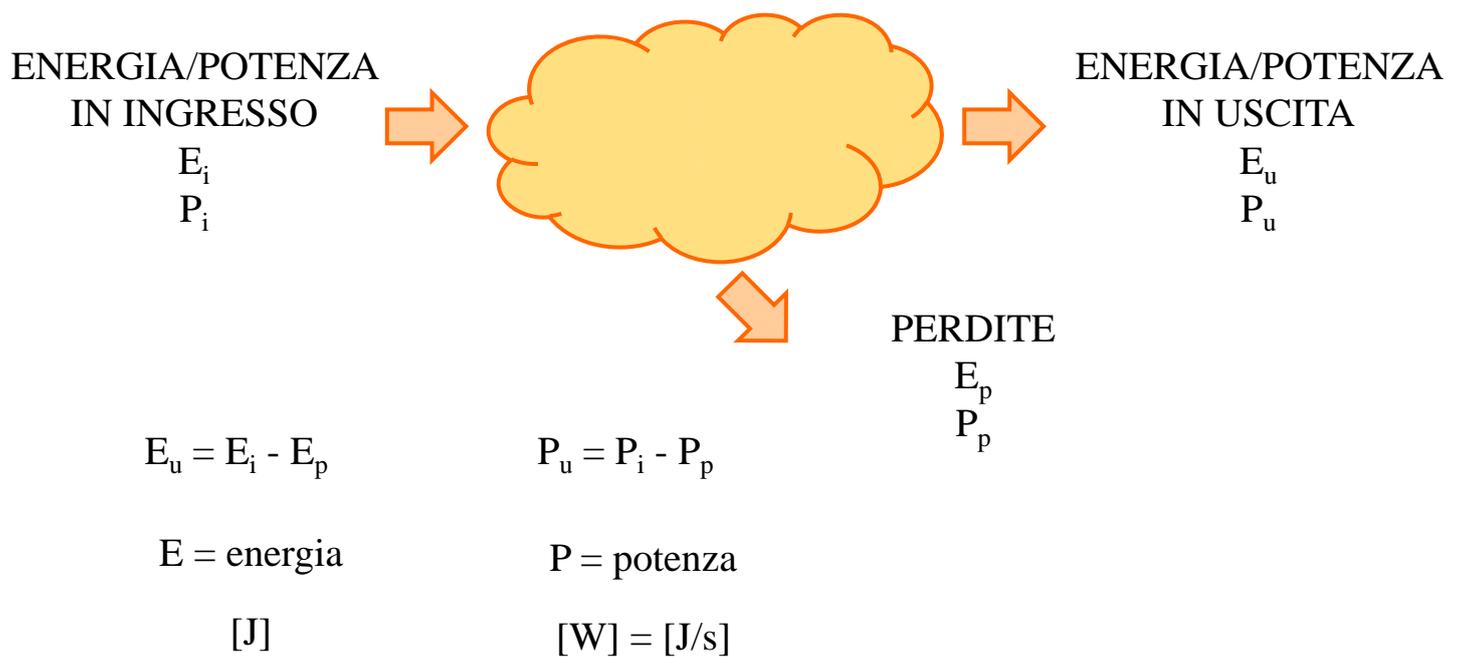
Il trasferimento dell'energia dalle fonti primarie (petrolio, metano, risorse idriche, eoliche, solari, ecc.) agli utilizzatori passa attraverso molteplici trasformazioni (elettrica/elettrica, elettrica/meccanica, meccanica/elettrica).

È fondamentale il ruolo dell'energia elettrica grazie alla facilità di trasporto anche su lunghe distanze e con basse perdite.

Ogni trasformazione è sempre accompagnata da perdite e quindi ad ogni trasformazione è associato un valore di rendimento.

$$\text{RENDIMENTO DELLA TRASFORMAZIONE} = \frac{\text{ENERGIA IN USCITA (E}_u\text{)}}{\text{ENERGIA IN INGRESSO (E}_i\text{)}} < 1$$

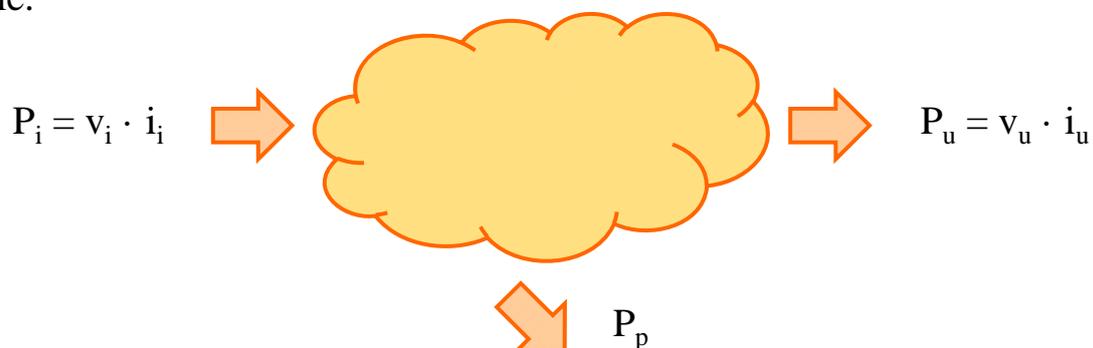
## Conversione dell'energia



19

## Conversione elettrica/elettrica

La trasformazione elettrica/elettrica consente di variare i parametri **tensione** e **corrente** con apparecchiature statiche (trasformatori), generalmente in modo reversibile.



$$\eta = \frac{v_u \cdot i_u}{v_i \cdot i_i} < 1$$

Se  $P_p = 0$  (caso ideale):  $v_u \cdot i_u = v_i \cdot i_i$   $\Rightarrow$   $\frac{v_u}{v_i} = \frac{i_i}{i_u}$

20

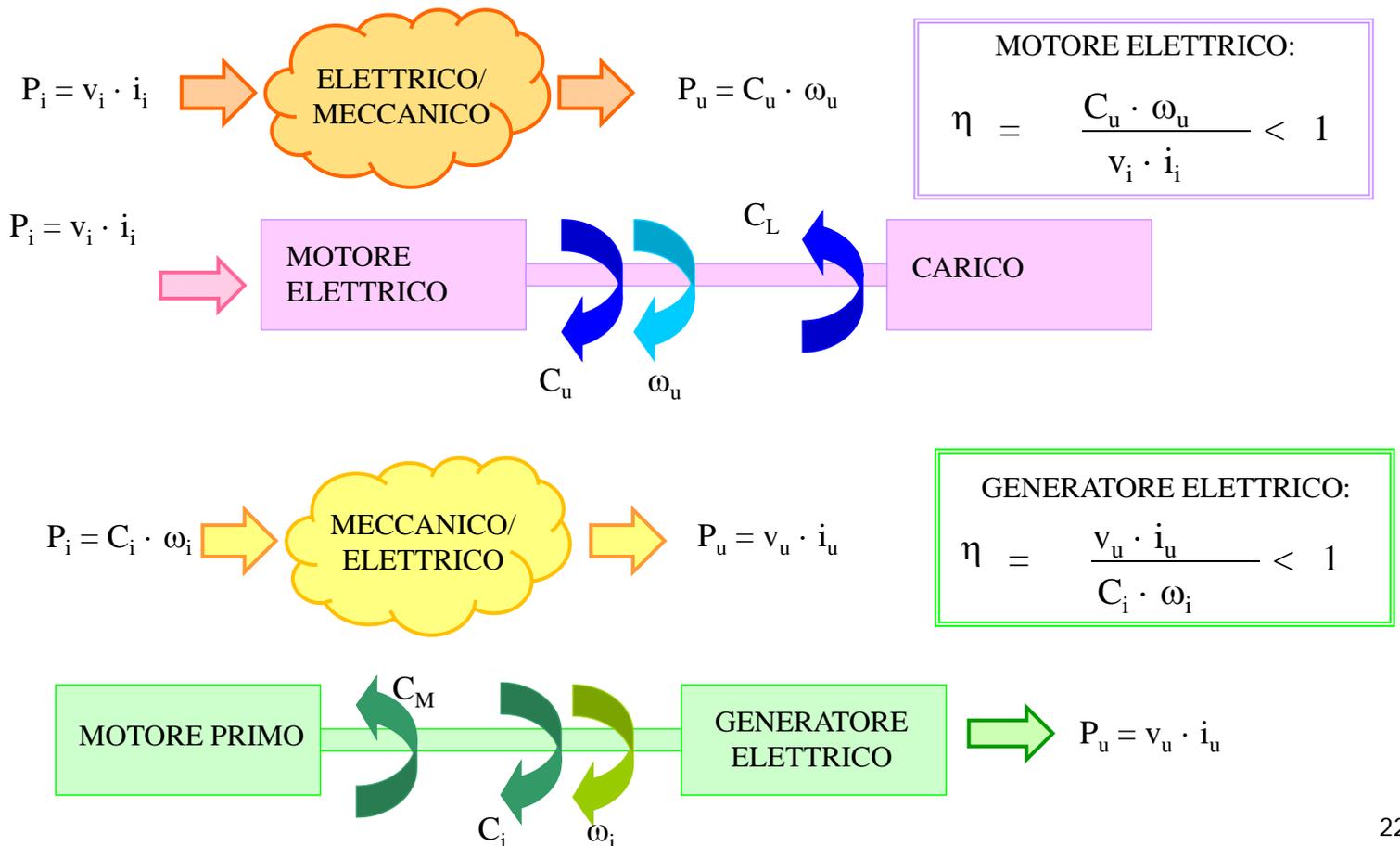
## Conversione elettrica/meccanica

La trasformazione elettrica/meccanica consente di trasformare energia elettrica (che può essere trasportata vicino ai luoghi di utilizzo) in energia meccanica (albero rotante che trascina un carico) mediante motori elettrici (sistemi costituiti da avvolgimenti elettrici e strutture magnetiche in moto relativo tra loro).

La trasformazione è sempre **reversibile**: è quindi possibile trasformare energia meccanica (turbine, ecc.) in energia elettrica mediante generatori elettrici (sistemi costituiti da avvolgimenti elettrici e strutture magnetiche in moto relativo tra loro).

Si parla genericamente di macchine elettriche con funzionamento da motore e da generatore.

## Conversione elettrica/meccanica

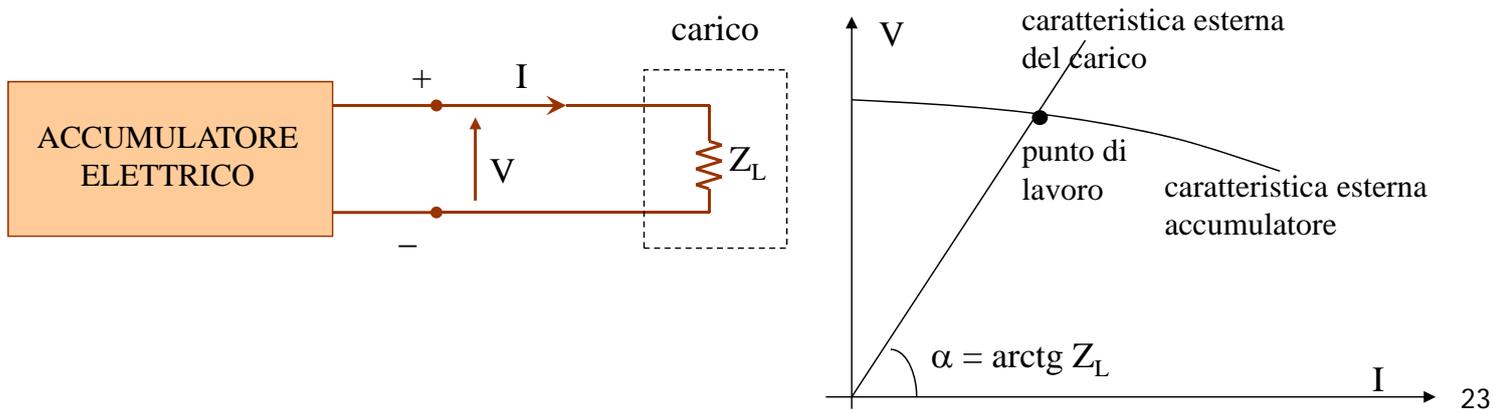


## Punto di lavoro – funzionamento di regime

Il punto di lavoro è sempre dato dall'intersezione della caratteristica esterna dell'apparato di generazione e/o conversione di energia elettrica o meccanica con la caratteristica esterna del carico.

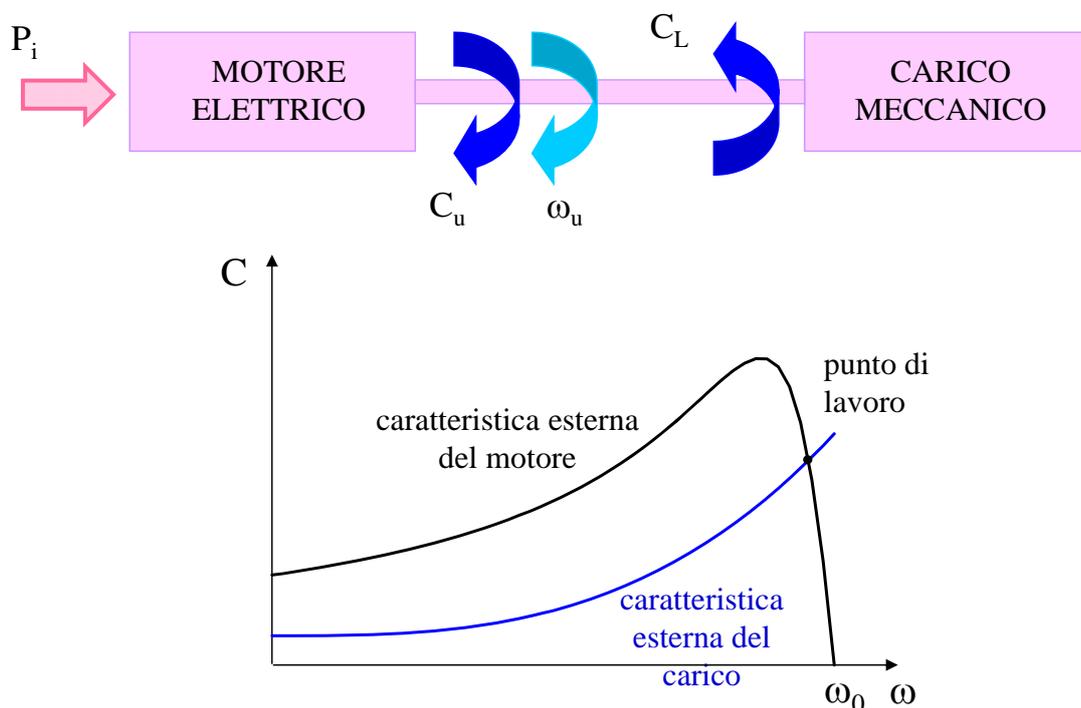
La caratteristica esterna è sempre rappresentata in un piano X, Y ove X e Y sono i parametri il cui prodotto rappresenta la potenza.

Esempio: **Generatore elettrochimico**



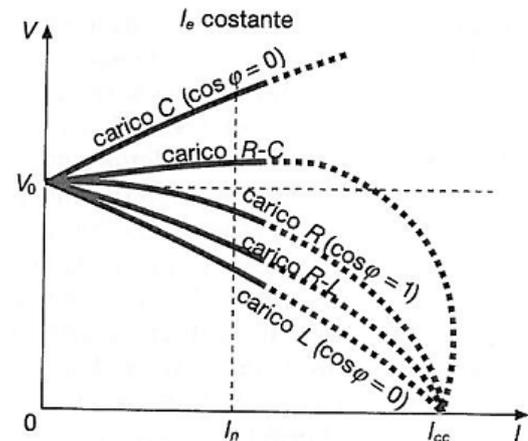
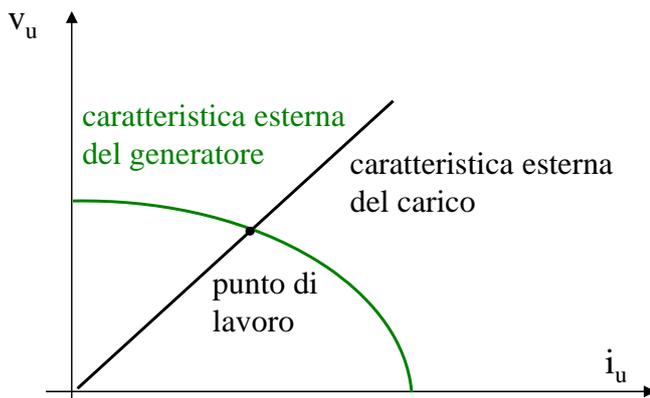
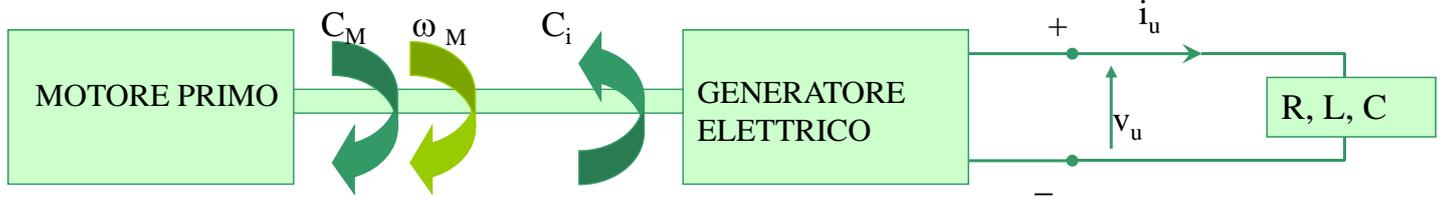
## Punto di lavoro – funzionamento di regime

Esempio: **Motore elettrico asincrono**



# Punto di lavoro – funzionamento di regime

Esempio: **Generatore elettrico sincrono**



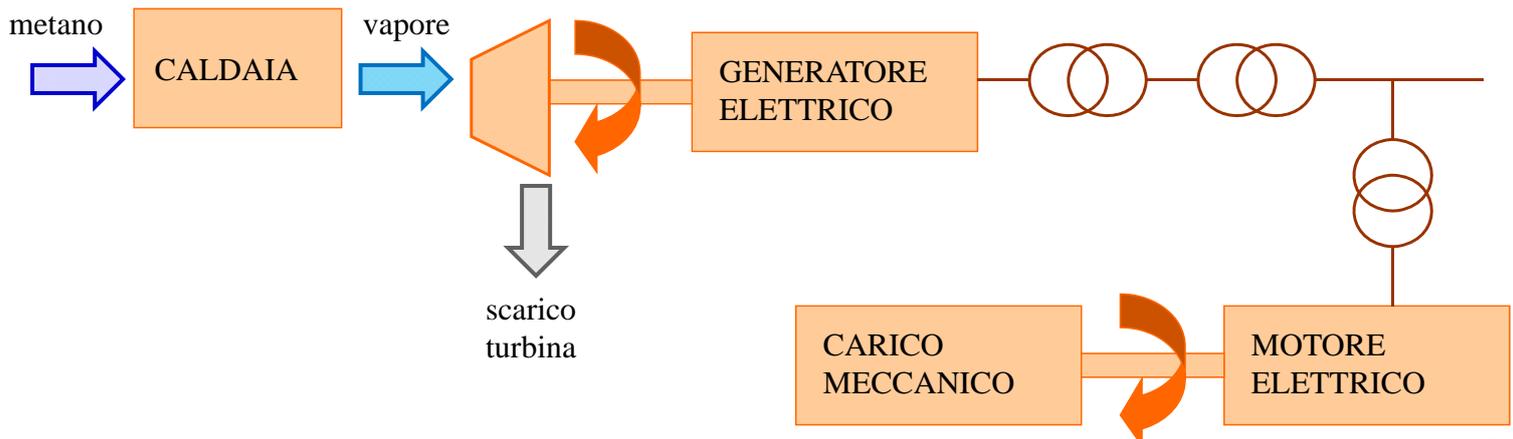
25

## Conversione elettromeccanica

Quindi, l'energia contenuta nelle fonti primarie subisce una serie di conversioni di tipo elettromeccanico fino all'utilizzatore finale, ossia fino a compiere il lavoro utile svolto dal carico trascinato da un albero rotante.

Ad ogni conversione è associato un rendimento con valore  $< 1$ . Il rendimento totale è pari al prodotto dei singoli rendimenti.

Esempio di una serie di conversioni elettromeccaniche:



26

# Macchine elettriche

I principali tipi di macchine elettriche sono:

Macchine elettriche rotanti:

Generatori:

a poli lisci (turboalternatori)

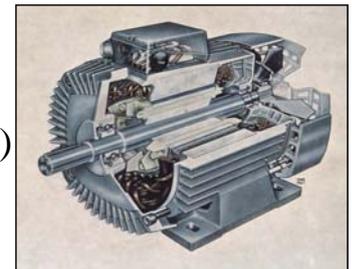
a poli salienti (idro-generatori)

Motori:

asincroni (a induzione)

brushless (a magneti permanenti)

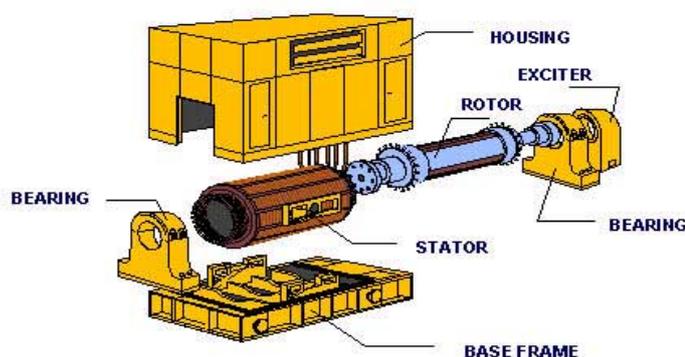
in corrente continua



Trasformatori: in olio  
in resina

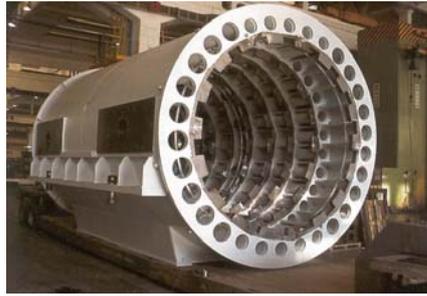
## Di quali parti sono composte le macchine elettriche?

- MECCANICA: carcassa, supporti, cuscinetti;
- MAGNETICA: nucleo (lamierini);
- ELETTRICA: avvolgimenti;
- ISOLAMENTO: nastrature, resine, vernici, olio;
- RAFFREDDAMENTO: gas (aria, idrogeno), liquidi (acqua, olio).



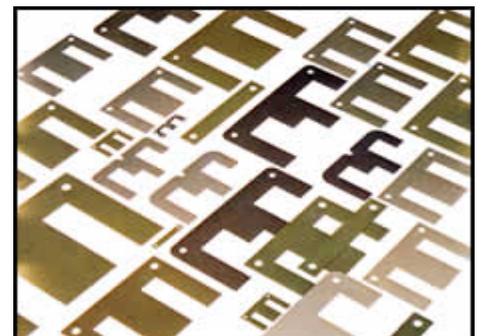
## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche?

**Ferro** di tipo “strutturale” (acciaio):  
carcasse, corpo del rotore, alberi, cuscinetti, flange, ecc.



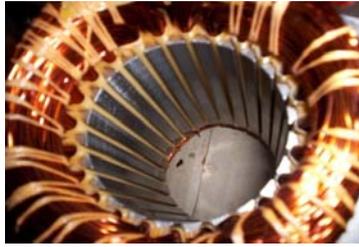
## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche?

**Ferro** di tipo magnetico (ferro-silicio): lamierini per il nucleo.

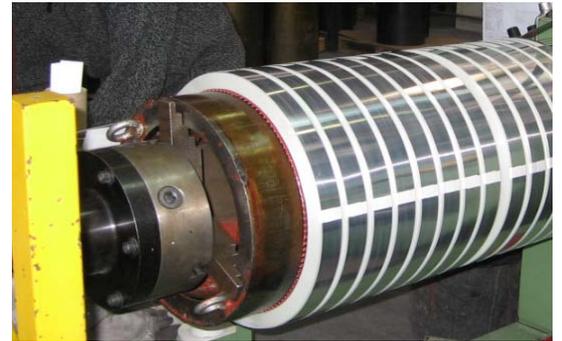


## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche?

**Rame:**  
avvolgimenti.



**Alluminio:**  
avvolgimenti,  
barre di rotore.



## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche?

**Materiali isolanti:**  
carta, resine, mica, poliammide, ...

