



Tecnologie per l'uso razionale delle risorse:

Un'opportunità per la crescita sostenibile

Alberto Bellini

DEI – Università di Bologna

a.bellini@unibo.it

Ravenna, 27 settembre 2013



Ciclo integrato di gestione rifiuti: verso la gestione delle risorse

- Realizzare un uso efficiente delle risorse, privilegiando il recupero di materia a quello di energia
- Realizzare un doppio disaccoppiamento:
(1) tra l'uso delle risorse e la crescita economica,
(2) tra l'utilizzo delle risorse e gli impatti ambientali.
- Realizzare un sistema di gestione rifiuti flessibile: fabbrica dei materiali
- Promuovere eco-design dei prodotti attraverso ri-definizione del contributo ambientale CONAI (CAC)
- Separazione tra i gestori della raccolta e dello smaltimento dei rifiuti



Progetto Life+ RELS

Il progetto analizza il caso dei parchi naturali, perché questi sono uno strumento ideale per sensibilizzare sui temi della sostenibilità ambientale e per dimostrare che esistono soluzioni efficienti, a ridotto impatto ambientale, che possono essere installate, anche all'interno di aree naturalistiche.

Il progetto si è sviluppato attraverso due principali azioni:

- Educazione ambientale
- Definizione delle tecnologie ottimali per la gestione del ciclo integrato dei rifiuti, attraverso il confronto quantitativo di diversi scenari.



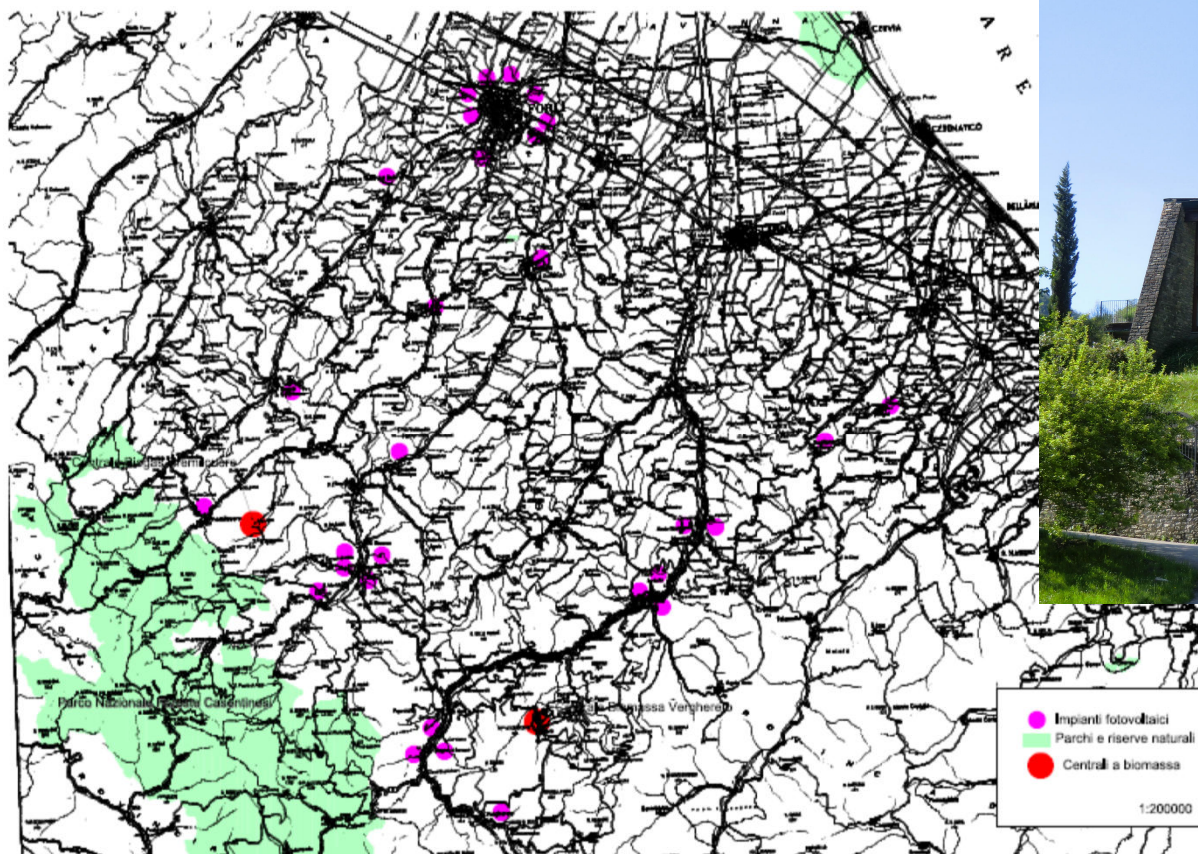


Parco Nazionale della Sila (Provincia di Cosenza)



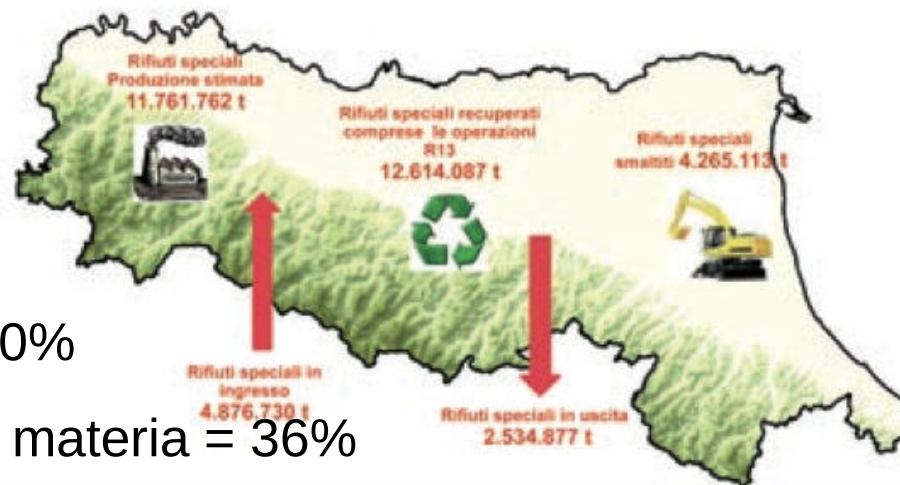


Parco delle Foreste Casentinesi (Provincia di Forlì-Cesena)



Gestione dei rifiuti solidi urbani stato di fatto

- Produzione Italia (2009): 532 kg/ab; (2008): 541 kg/ab
- Emilia-Romagna (2011): 673 kg/ab; (2010); 698 kg/ab; (2009); 682 kg/ab;
- Italia (2009): RD = 33,6 % (Nord 48 %)
- Emilia-Romagna (2011): RD = 52.9%; (2009): RD = 47,4 %



- Italia (2009): recupero di materia = 20%
- Emilia-Romagna (2009): recupero di materia = 36%



Educazione ambientale

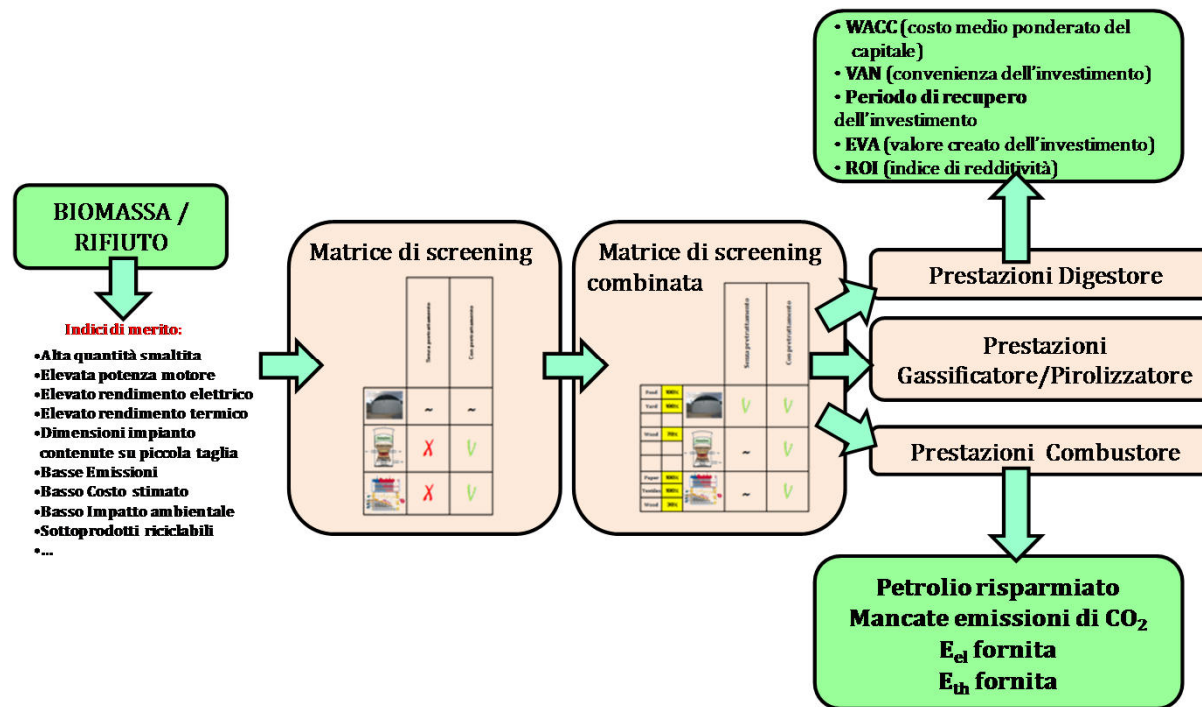
<http://www.eco-ambiente.unimore.it>

Corso on-line gestione rifiuti: 920 utenti, 34 attestati

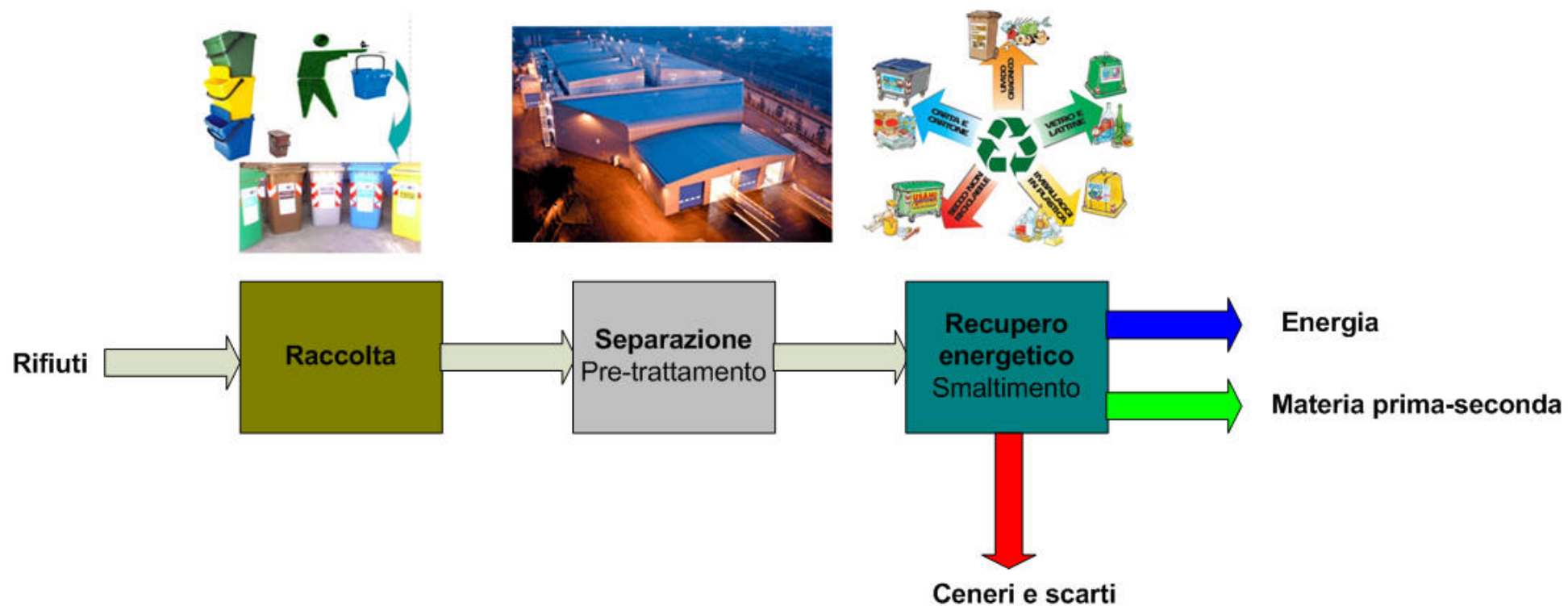


Biomass management tool [®]

Strumento per il confronto di tecnologie per la gestione dei rifiuti



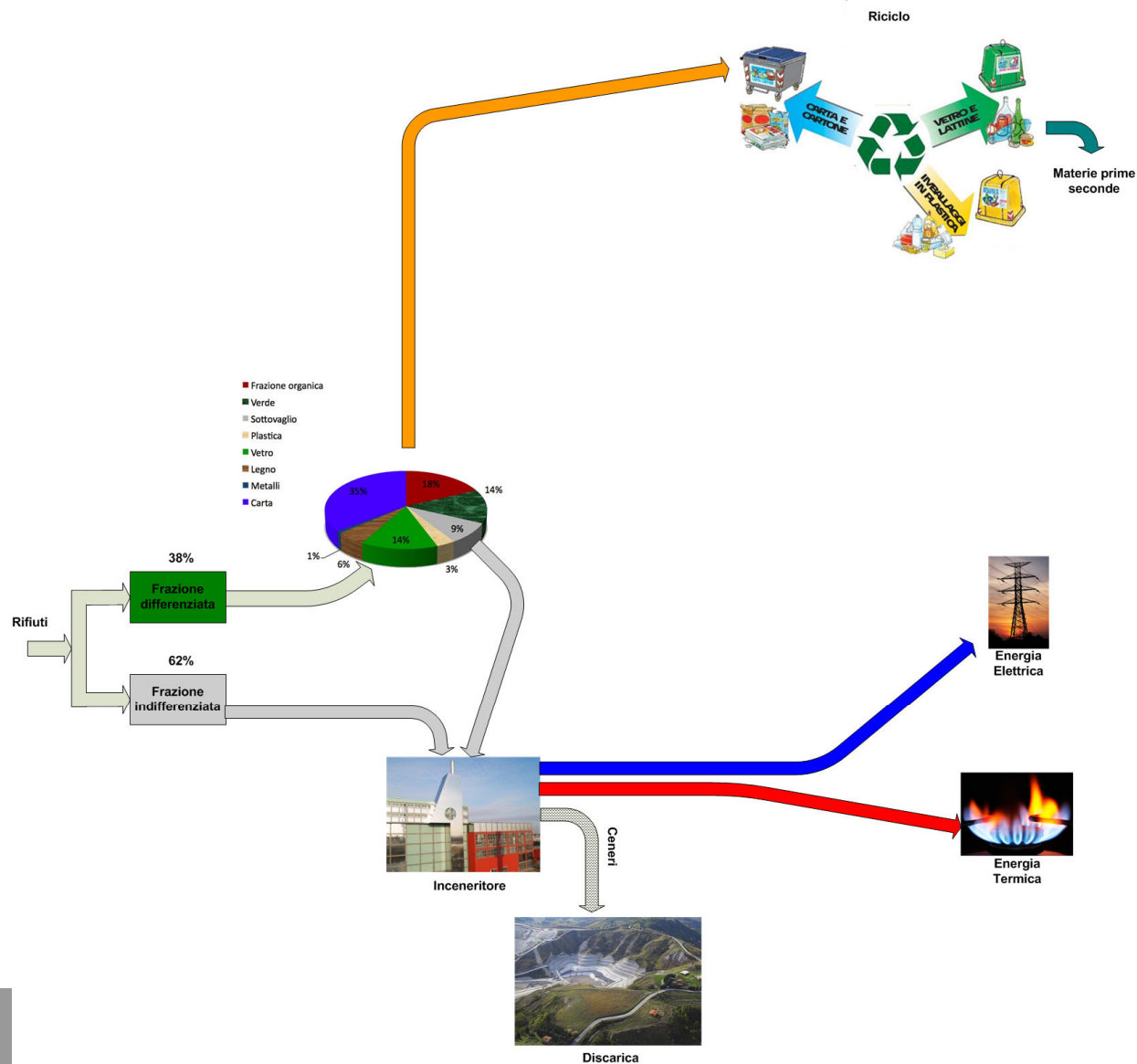
Ciclo integrato gestione rifiuti





Scenari per la gestione dei rifiuti

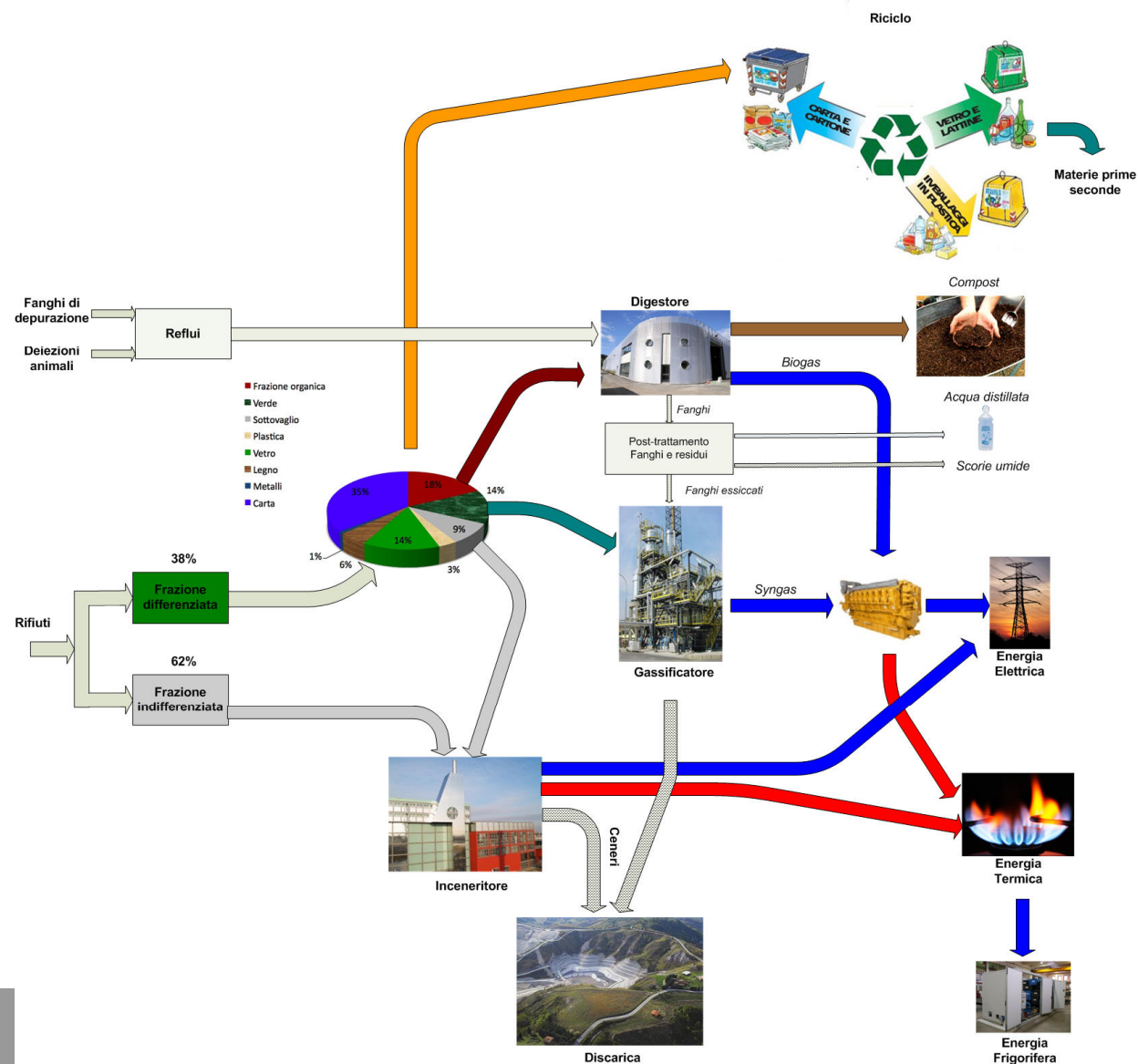
Scenario A





Scenari per la gestione dei rifiuti

Scenario B



Risultati analisi LCA: confronto scenario A e B

PARCO DELLE FORESTE CASENTINESI, COMUNI CONSIDERATI NELL'ANALISI

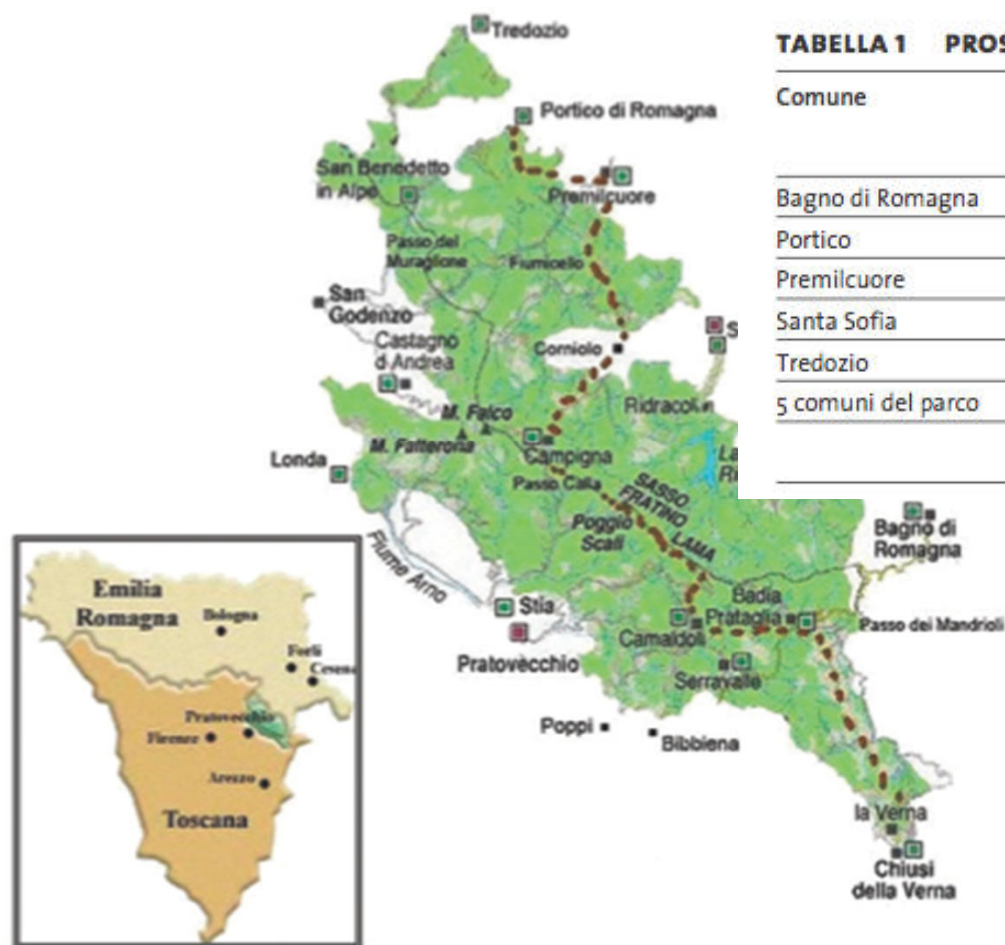


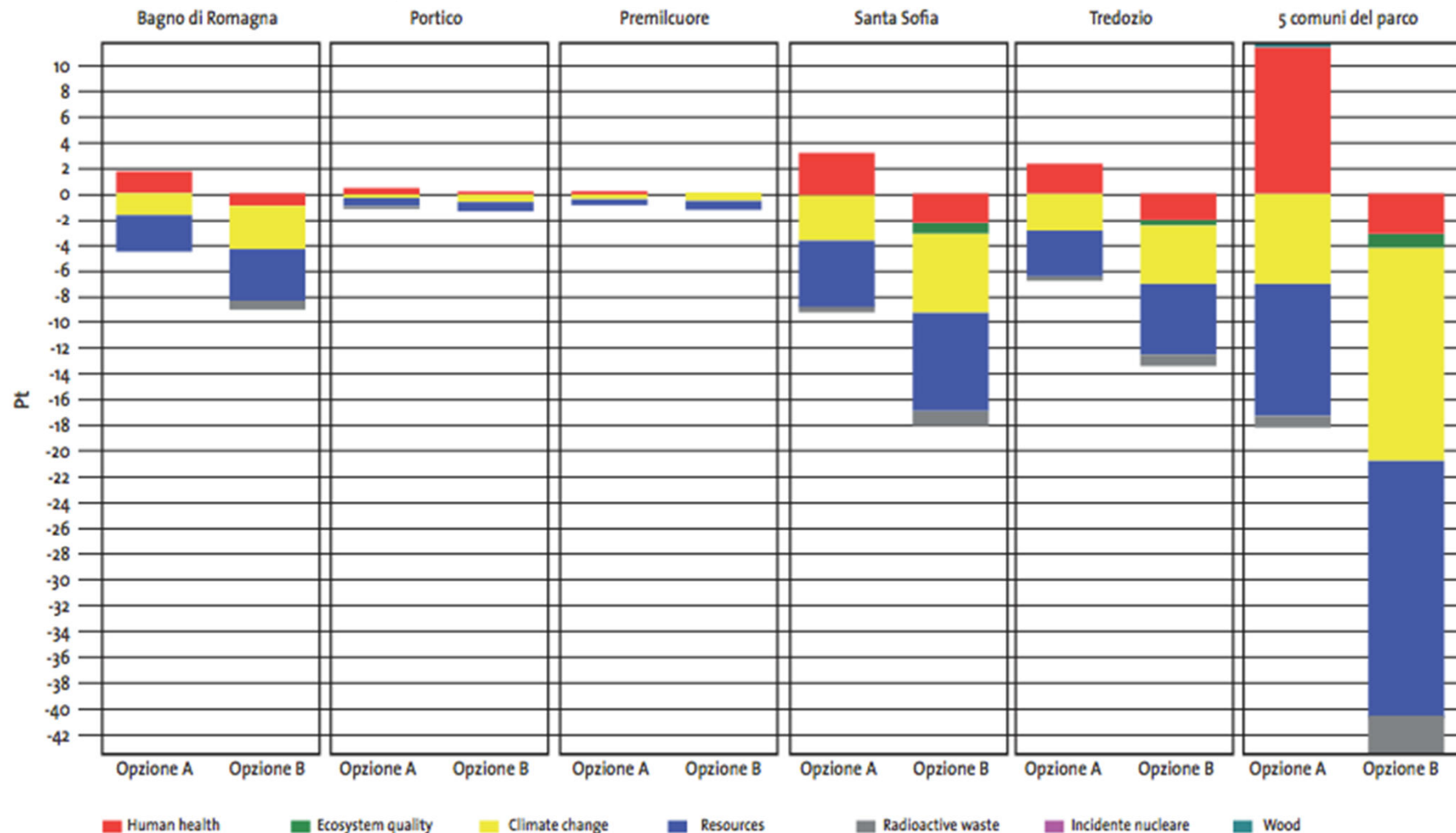
TABELLA 1 PROSPETTO SULLA PRODUZIONE DI RIFIUTI NEI 5 COMUNI DEL PARCO

Comune	Abitanti Istat	Abitanti serviti	Produzione totale [t/anno]	Produzione pro capite [kg/(anno*ab)]
Bagno di Romagna	6.212	6.212	3.532,5	568,6
Portico	801	801	513,8	641,5
Premilcuore	824	824	660,1	801,1
Santa Sofia	4.240	4.240	3.092,7	729,4
Tredozio	1.283	1.283	830	647
5 comuni del parco	13.360	13.360	8.629,2	645,9



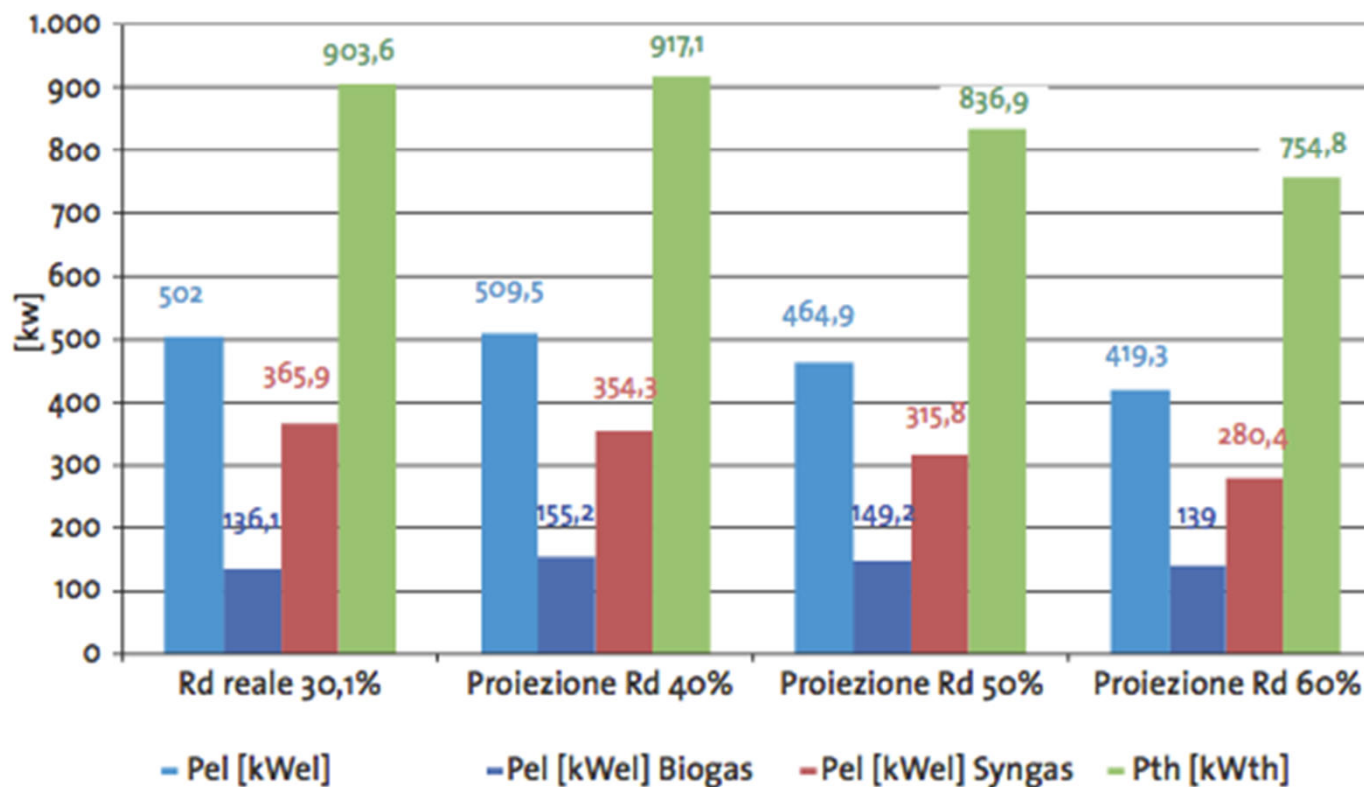
Risultati analisi LCA: confronto scenario A e B

CONFRONTO TRA OPZIONE A) E OPZIONE B) NEL CASO SI STUDINO I DATI REALI RELATIVI ALLA RACCOLTA DIFFERENZIATA NEI COMUNI DISLOCATI NELL'AREA DEL PARCO DELLE FORESTE CASENTINESI. IL DANNO AMBIENTALE È ESPRESSO CON PUNTEGGI POSITIVI, MENTRE IL VANTAGGIO È ESPRESSO CON PUNTEGGI NEGATIVI



Risultati analisi LCA: variazione raccolta differenziata

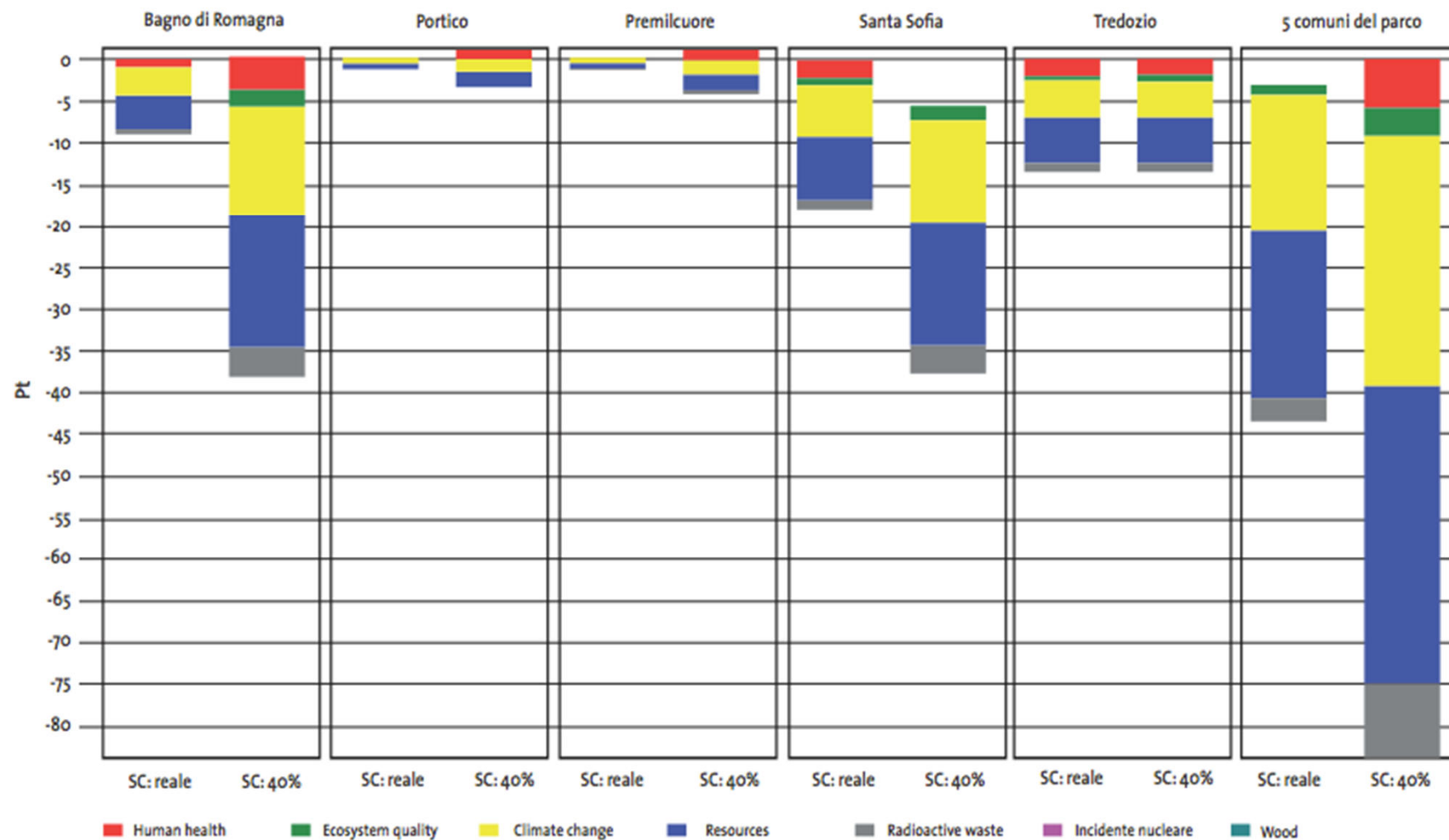
DATO AGGREGATO PER I 5 COMUNI DEL PARCO: CONTRIBUTO DEL BIOGAS E DEL SYNGAS NELLA GENERAZIONE DI POTENZA ELETTRICA E POTENZA TERMICA EROGATA DALL'IMPIANTO INTEGRATO





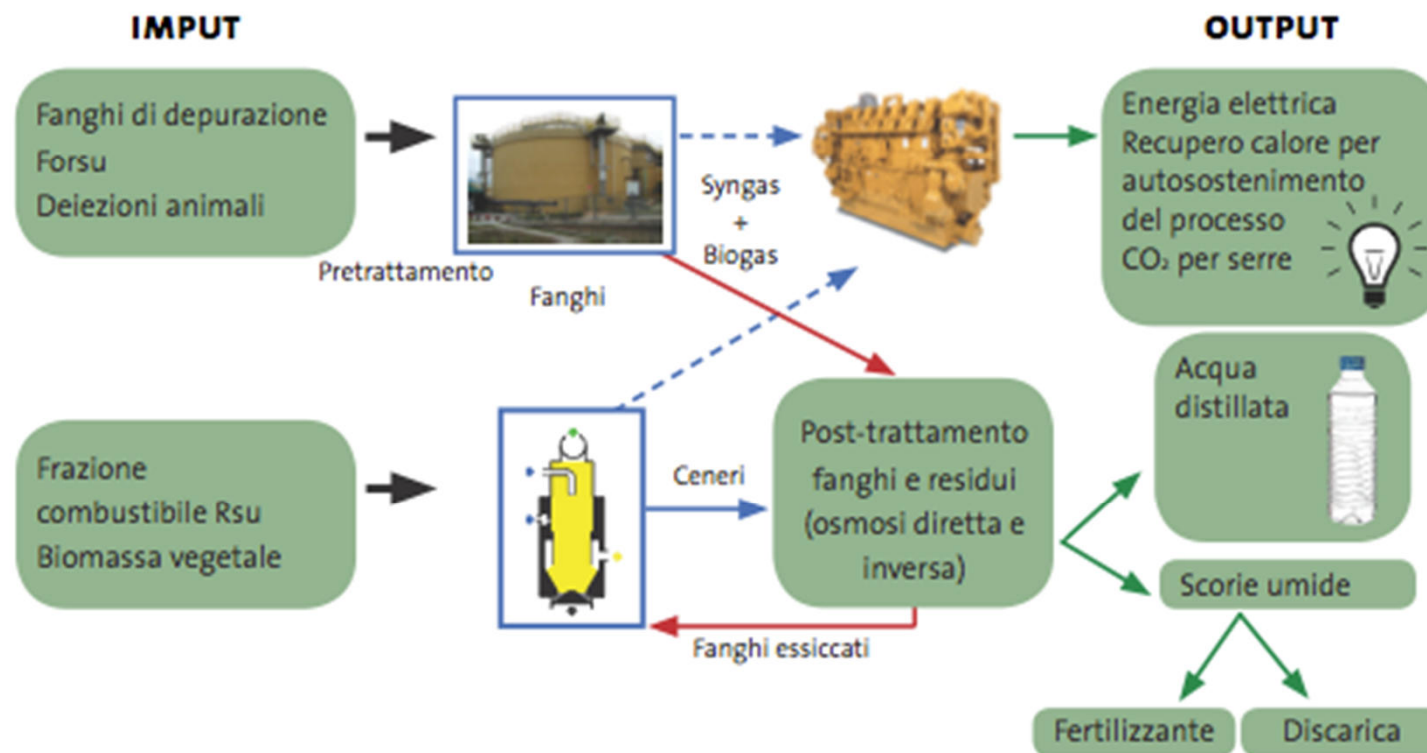
Risultati analisi LCA: variazione raccolta differenziata

OPZIONE B (UTILIZZO DELL'IMPIANTO INTEGRATO OGGETTO DEL PROGETTO RELS).
VALUTAZIONE DEL CONFRONTO TRA LO SCENARIO REALE E UNA PROIEZIONE AL 40% DI RACCOLTA DIFFERENZIATA



Sistema integrato per la gestione dei rifiuti

SCHEMA DELL'IMPIANTO INTEGRATO DIGESTIONE – GASSIFICAZIONE – RECUPERO ACQUE REFLUE





Sistema integrato per la gestione dei rifiuti



- Potenza elettrica prodotta (syngas+biogas): 8 kW
- 0.66 kg/giorno biomassa umida
- 215.6 kg/giorno biomassa secca



Dimostratori tecnologie recupero





Conclusioni

- La gestione dei rifiuti a livello nazionale è ancora lontana dagli obiettivi della 2008/98/CE (50 % di recupero entro il 2020). Sono necessarie soluzioni tecnologiche e processi culturali
- Risultati RELS:
 - ✓ Strumenti di educazione ambientale per promuovere il cambiamento culturale
 - ✓ Strumento previsionale per la progettazione del ciclo integrato dei rifiuti (Biomass management tool®)
 - ✓ Confronto tra due architetture per la gestione dei rifiuti nei parchi naturali
 - ✓ Realizzazione del parco delle energie e di un prototipo di gestione integrata per i parchi naturali



<http://www.life-rels.org>

<http://www.life-rels.eu>



GESTIRE I RIFIUTI NEI PARCHI NAZIONALI

**STRATEGIE INNOVATIVE
PER LA REALIZZAZIONE
DI SISTEMI INTEGRATI
PER IL RECUPERO DA BIOMASSA**



Grazie per l'attenzione

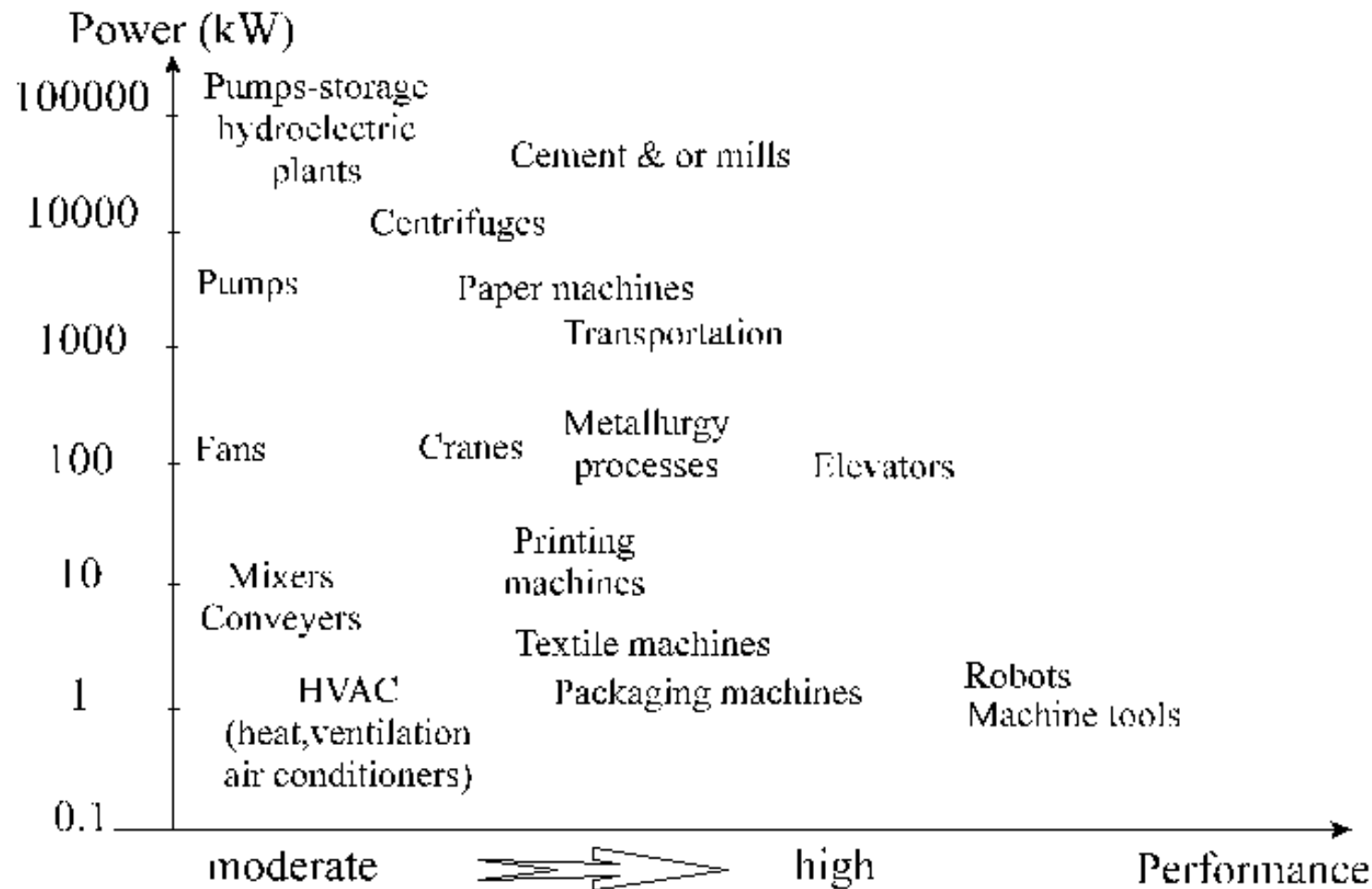


Energia Elettrica

- Il ruolo dell'energia elettrica nella moderna tecnologia è quello di un intermediario estremamente versatile. Raramente l'energia è disponibile o è utilizzata direttamente sotto forma elettrica, tuttavia quasi sempre è convertita in tale forma.
- L'energia elettrica, infatti, può essere trasmessa e regolata facilmente.
- Nella forma elettrica una piccola potenza può essere utilizzata per controllarne una molto maggiore.
- Esistono dispositivi ad elevato rendimento per la conversione da energia elettrica a meccanica (motori) o viceversa (generatori).
- Esistono dispositivi a elevato rendimento per la conversione di livello e di forma di energia elettrica.



Campi di applicazione delle macchine elettriche



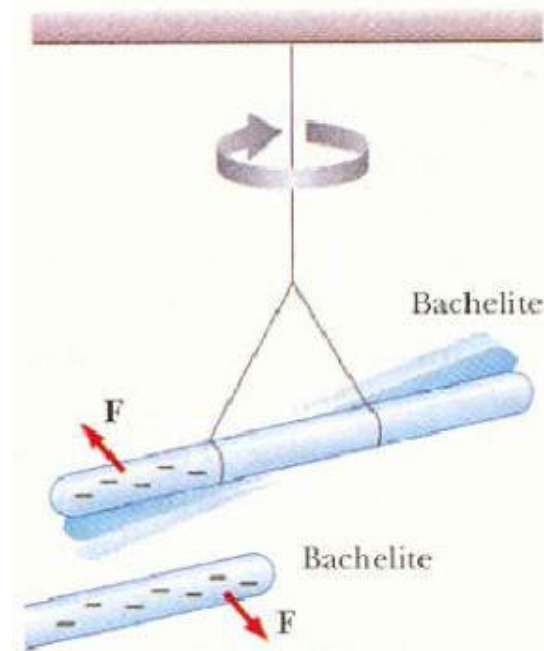
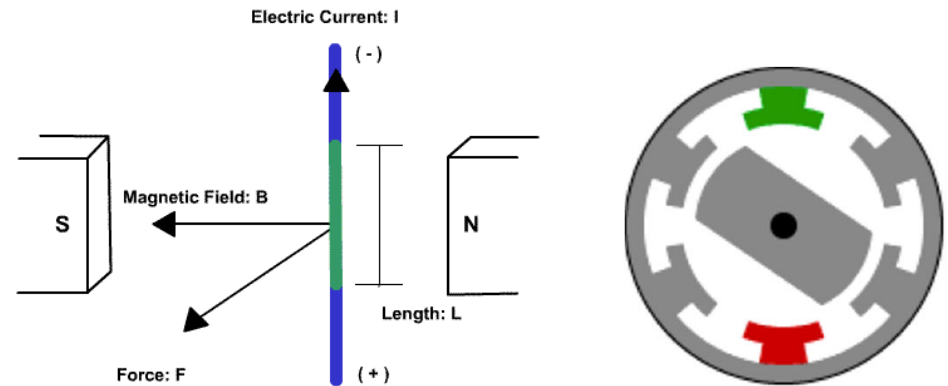


Energia Elettrica

- Limiti: densità di potenza “serbatoi” per applicazioni mobili
 - o Benzina: 12-13.000 W/kg
 - o Li-Ion: 1.800 W/kg
 - o Li-Poly: 2.800 W/kg
 - o Piombo: 100-200 W/kg
- Minore potenza e densità di potenza rispetto ad attuatori oleodinamici
- Maggior costo a parità di velocità rispetto ad attuatori pneumatici

Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

- ① Forza di Lorentz
- ② Coppia di riluttanza.
- ③ Forza elettrostatica
- ④ Effetto piezoelettrico
- ⑤ Magnetostrizione



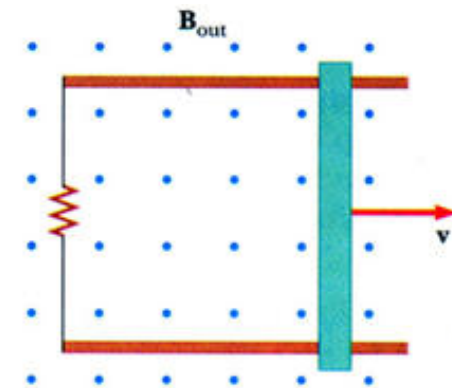
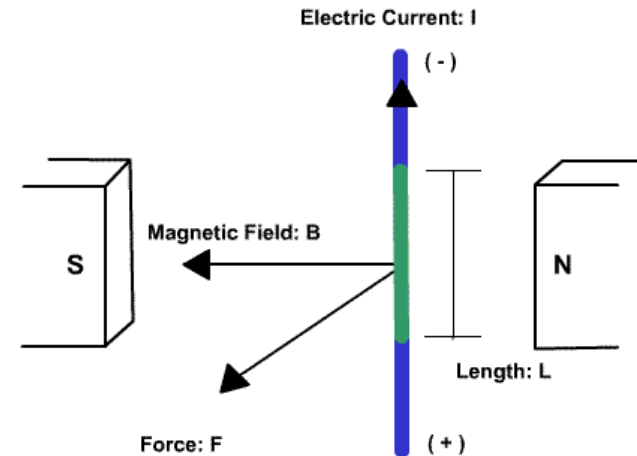


Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

① Forza di Lorentz

Una forza meccanica viene esercitata su conduttore percorso da corrente, immerso in un campo magnetico.

Il processo è reversibile: una tensione elettrica viene indotta in un circuito in moto in un campo magnetico.

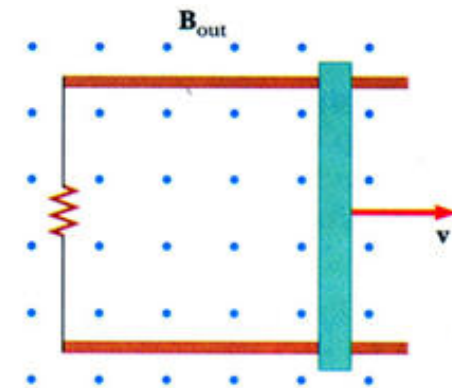
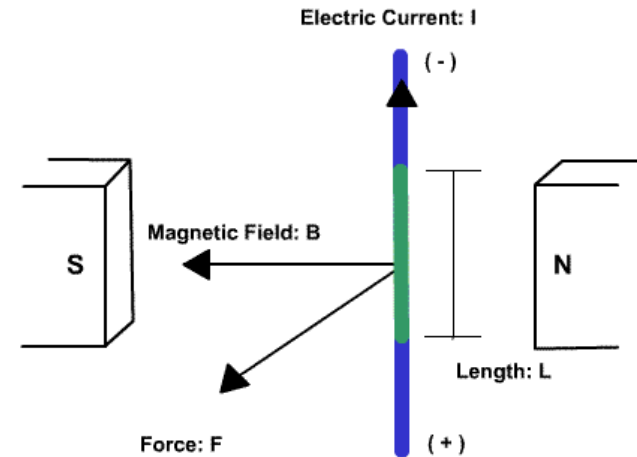
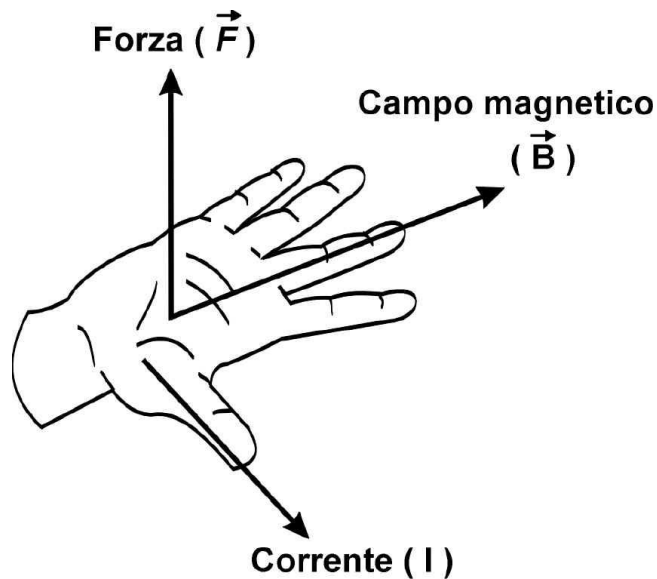




Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

① Forza di Lorentz

$$\vec{F} = i \vec{l} \wedge \vec{B}$$



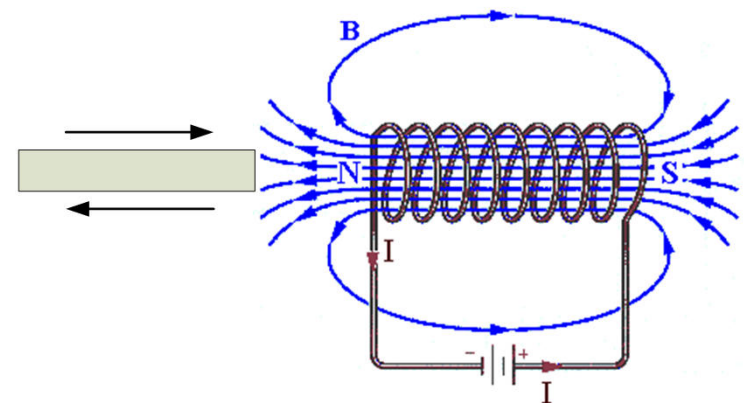
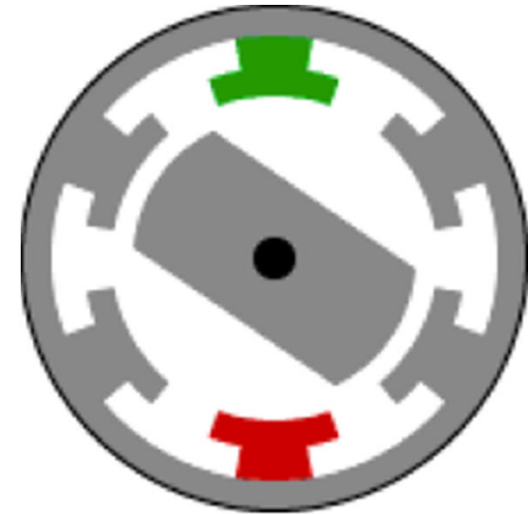
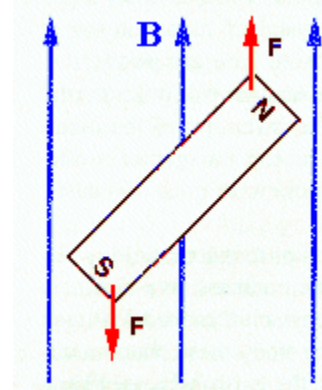
Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

② Forza di riluttanza.

Una forza meccanica viene esercitata su materiale ferromagnetico immerso

in un campo magnetico. Essa tende ad allinearlo con il campo e a portarlo in regioni dove il campo è più intenso.

Il processo è reversibile. Il moto di un avvolgimento percorso da corrente elettrica causa un cambiamento del flusso concatenato con l'avvolgimento e questo induce una tensione nell'avvolgimento stesso.

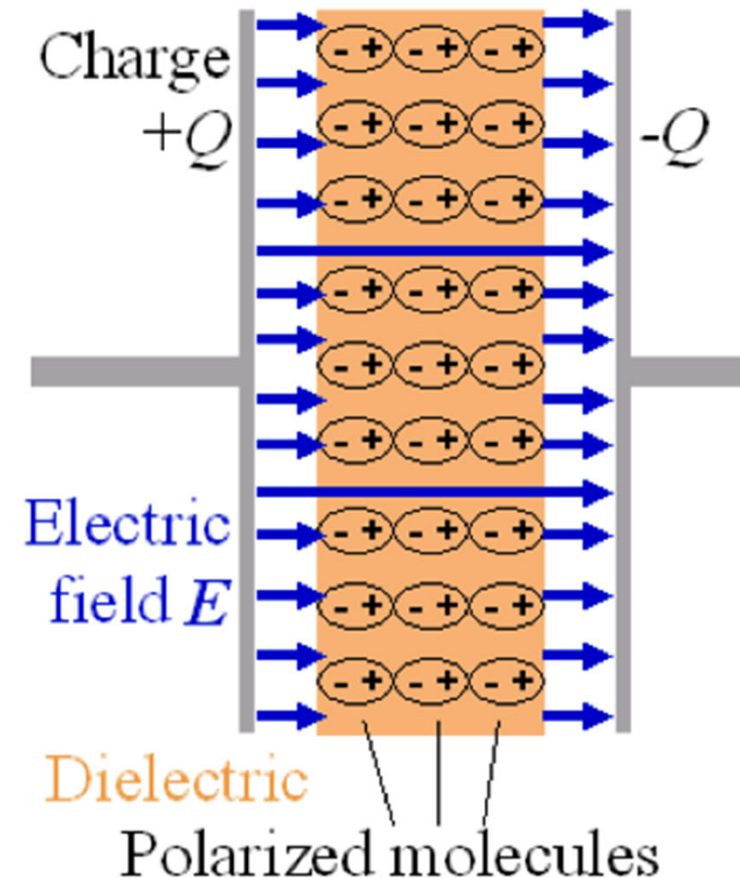


Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

③ Forza elettrostatica

Una forza meccanica viene esercitata sulle armature di un condensatore carico e sul materiale dielettrico immerso nel campo elettrico.

Il processo è reversibile: un moto relativo delle armature o del dielettrico si traduce in un cambiamento della carica o della tensione tra le armature o di entrambe.



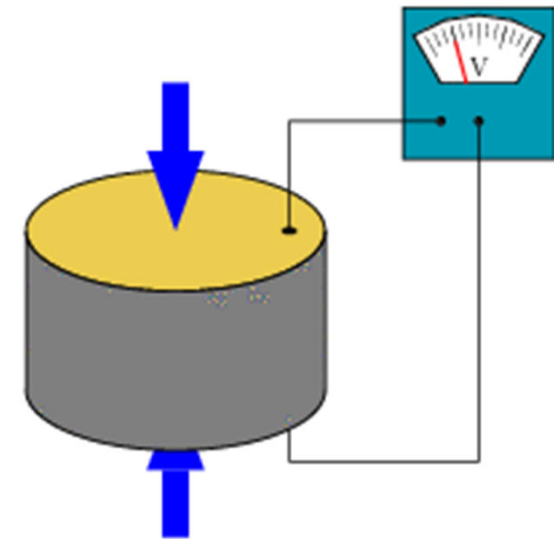
Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

④ Effetto piezoelettrico

Certi cristalli si deformano se campi elettrici vengono applicati in determinate direzioni.

Il processo è reversibile.

La forza è molto grande in proporzione alla dimensione della deformazione.



Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

⑤ Magnetostrizione

La gran parte dei materiali ferromagnetici mostrano una deformazione sotto l'azione di un campo magnetico.

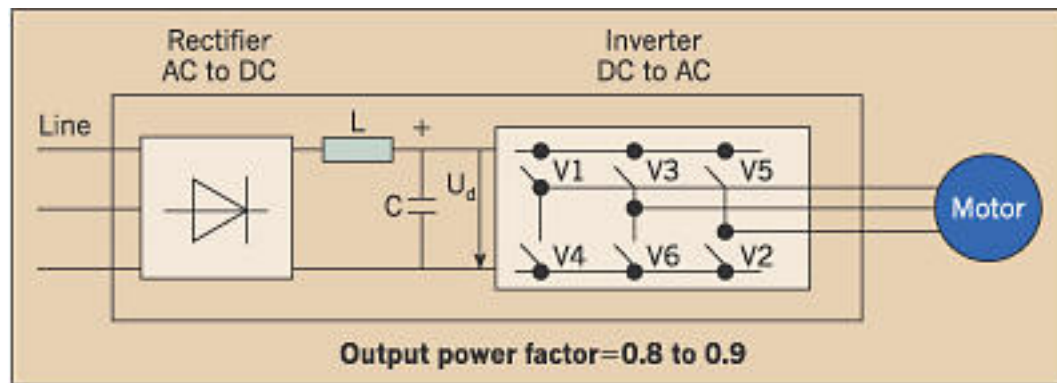
Viceversa, le proprietà magnetiche del materiale sono influenzate da sollecitazioni meccaniche ad esso applicate.

Anche con piccole deformazioni le forze sono proporzionalmente molto elevate.



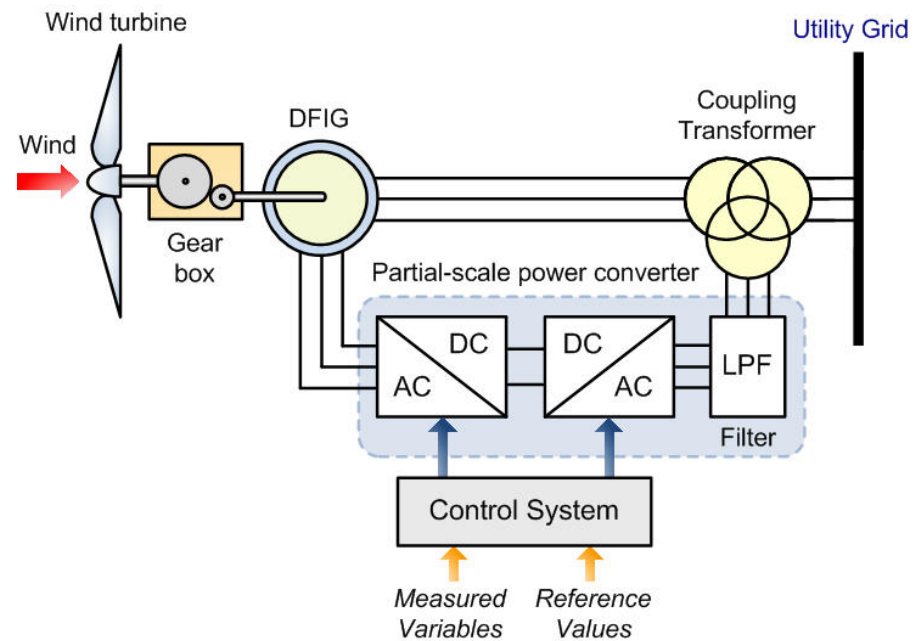
Evoluzioni e prospettive

- Macchine elettriche a velocità variabile (VSD)



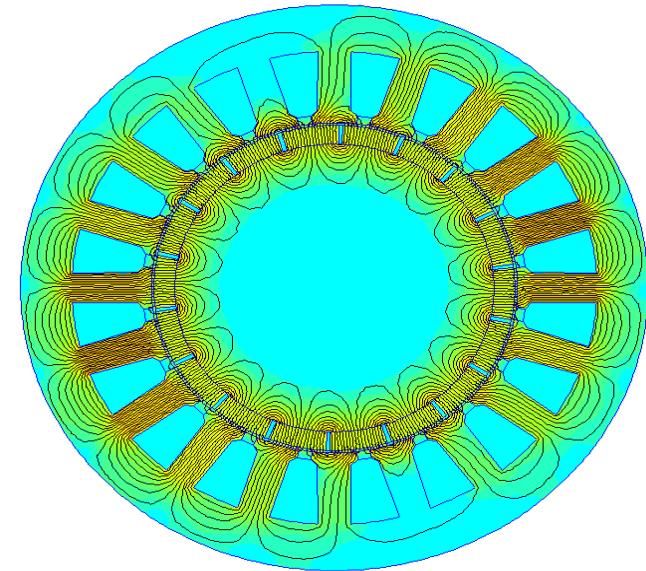
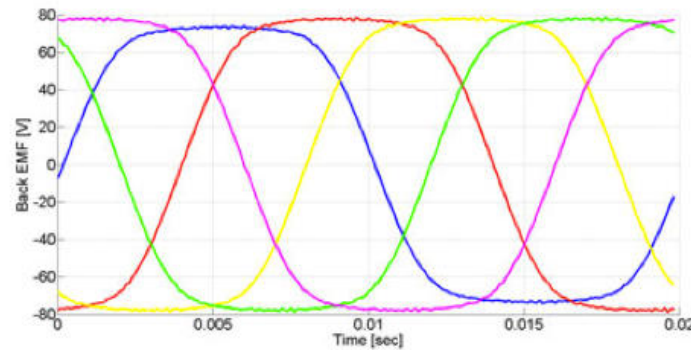
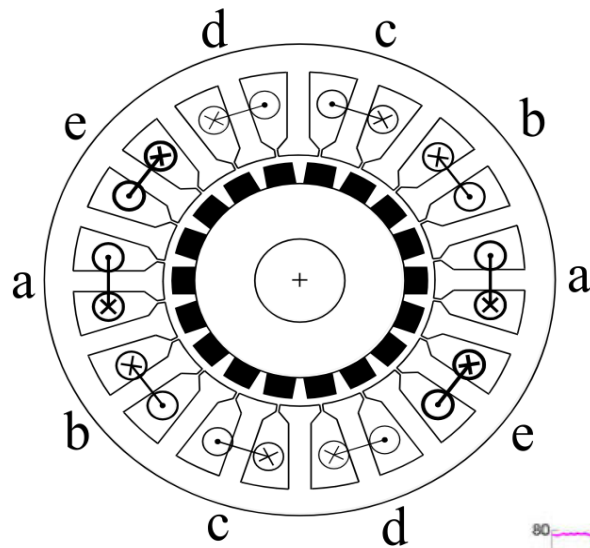
Evoluzioni e prospettive

- Generatori elettrici per sistemi eolici



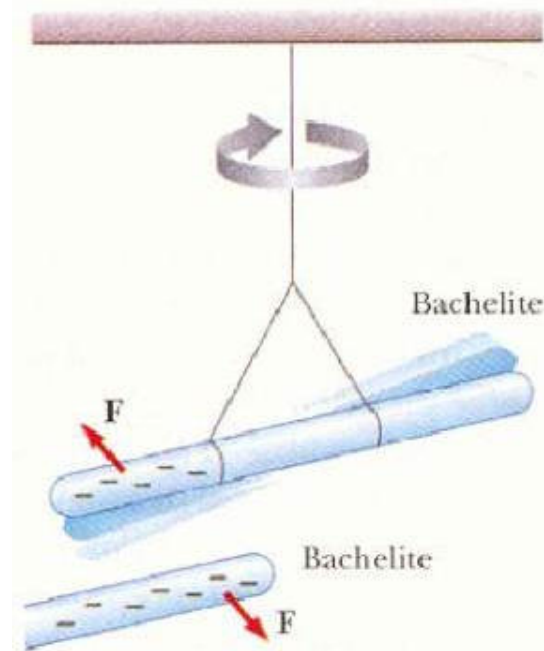
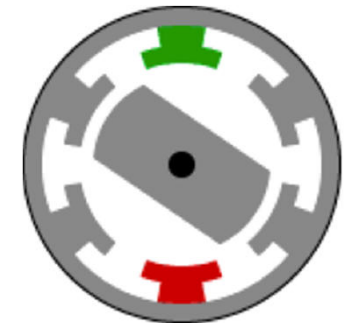
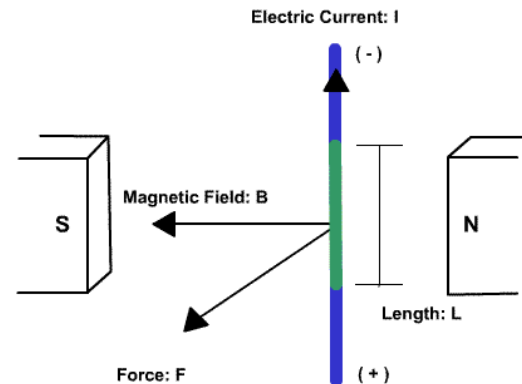
Evoluzioni e prospettive

- Macchine elettriche multifase e “fault-tolerant”



Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

- ① Forza di Lorentz
- ② Coppia di riluttanza.
- ③ Forza elettrostatica
- ④ Effetto piezoelettrico
- ⑤ Magnetostrizione





Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

- I primi tre fenomeni fisici descritti possono essere utilizzati per creare macchine elettriche rotanti. I primi due sono largamente prevalenti.
- La densità di energia elettrostatica immagazzinabile in un'unità di volume è decisamente inferiore rispetto a quella immagazzinata da un'energia magnetica.

$$w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$



Fisica della Conversione Elettromeccanica dell'energia

- L'induzione massima è determinata dal fenomeno della saturazione dei nuclei ferromagnetici
- Il campo elettrico massimo nell'aria è 3 MV/m

$$B_{\max} \simeq 1 \text{ T}$$

$$E_{\max} \simeq 3 \text{ MV/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\epsilon_0 = 8.86 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$w_m \simeq 40 \text{ J/m}^3$$

$$w_e \simeq 0.4 \text{ J/m}^3$$



Principi di elettromagnetismo



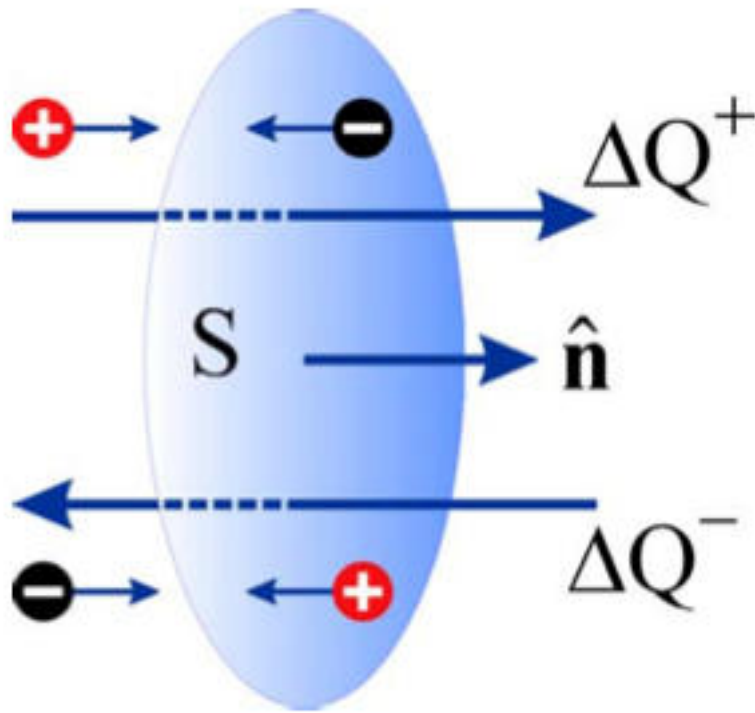
Densità volumetrica di carica

- Se si considerano fenomeni osservabili su scala macroscopica si può prescindere dalla natura granulare della carica e assumere che la stessa sia distribuita con continuità nello spazio

Δq carica contenuta in un volume ΔV

$$\rho_c = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V}$$

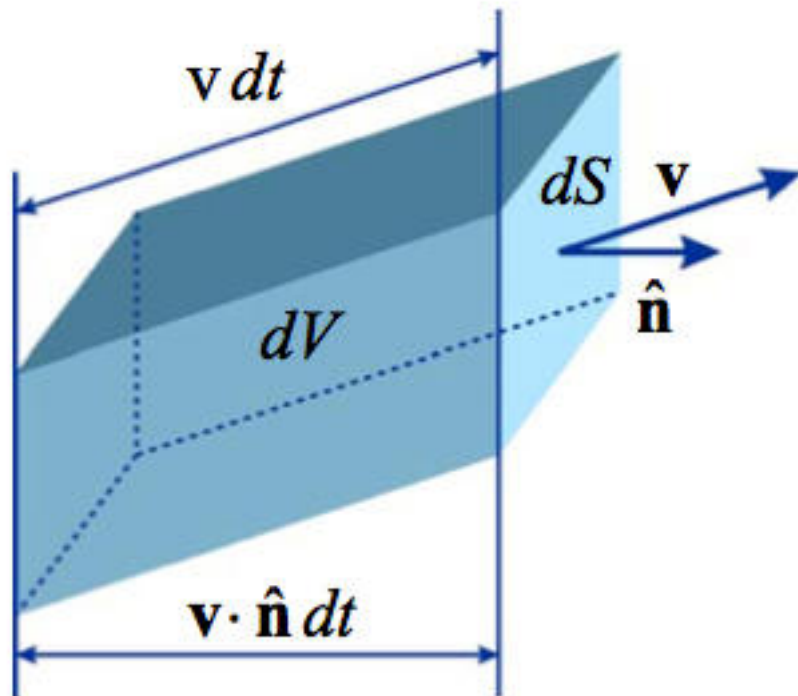
Corrente elettrica



$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$$

- $Q(t)$ rappresenta la carica che transita attraverso la superficie S dall'istante iniziale all'istante t . Non si identifica con la carica presente in una data superficie all'istante t

Densità di corrente



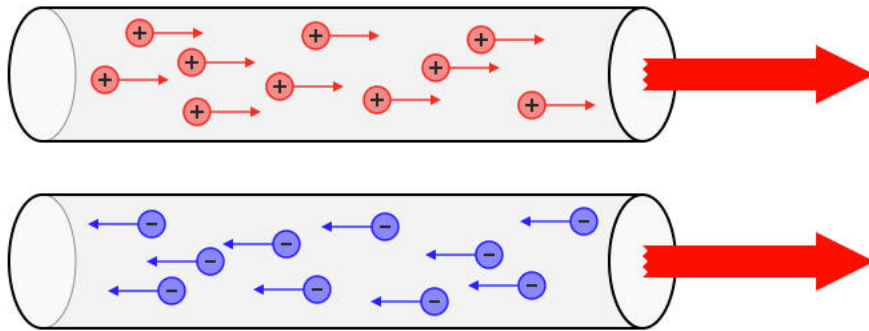
$$\vec{J} = \rho_c \vec{v}$$

- Dove $\vec{v}$ rappresenta la velocità delle cariche in movimento in una superficie “orientata” dS . La densità volumetrica delle cariche è

$$\rho_c$$

$$dQ = \rho_c dV = \rho_c \vec{v} \cdot \hat{n} dt dS$$

Corrente elettrica



La corrente elettrica che attraversa una superficie orientata S è pari al flusso del vettore $\vec{J}$ sulla stessa superficie

$$di = \frac{dQ}{dt} = \rho_c \vec{v} \cdot \hat{n} dS = \vec{J} \cdot \hat{n} dS$$

$$i = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS$$



Campo elettrico e magnetico

- Una carica puntiforme q in moto con velocità v in una regione sede di un campo elettromagnetico è soggetta a una forza:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Campo elettrico $\vec{E}$ (unità di misura V/m)

Induzione magnetica $\vec{B}$ (unità di misura tesla, T)

- Questa relazione può essere assunta come definizione del campo elettrico e dell'induzione magnetica



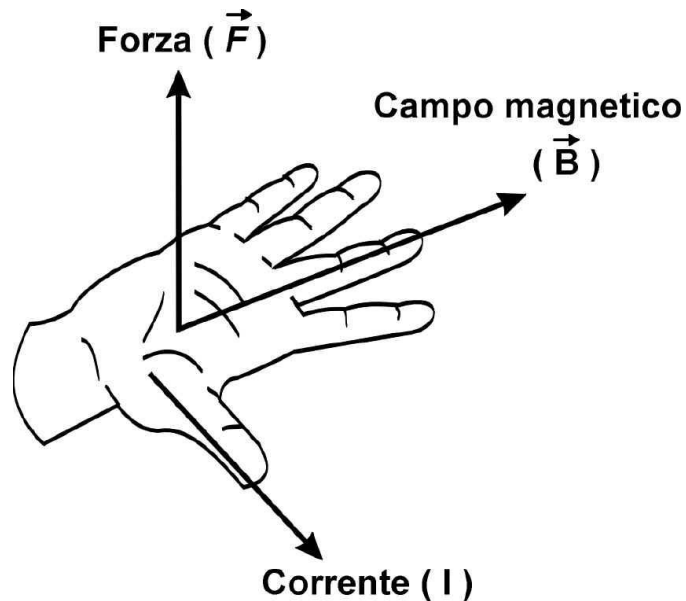
Campo elettrico

- Una regione è sede di un campo elettrico se una carica di prova puntiforme posta in quiete in un punto della regione è soggetta ad una forza proporzionale al valore della carica il vettore campo elettrico è definito come:

$$\vec{E} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_e}{\Delta q}$$

- Il passaggio al limite indica che la carica di prova deve essere sufficientemente piccola da non perturbare il campo presente nella regione considerata

Induzione magnetica



- Una regione è sede di un **campo magnetico** se una **carica di prova puntiforme** in moto con **velocità istantanea v** in tale regione è soggetta (oltre alla eventuale forza dovuta al campo elettrico) ad una forza proporzionale alla **velocità della carica** all'intensità dell'induzione magnetica e al valore della carica. La forza ha una direzione tale per forma una terna destra con velocità e induzione magnetica. La forza è ortogonale al piano composto da velocità della carica e induzione magnetica. L'induzione magnetica si può definire:

$$\vec{B} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_{m \max}}{\Delta q v}$$

- Dove $\vec{F}_{m \max}$ indica il valore massimo del modulo della forza, che si ottiene quando il moto della carica e l'induzione sono ortogonali.



Induzione elettrica e campo magnetico

- Induzione elettrica D
- Campo magnetico H

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m costante dielettrica

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m permeabilità magnetica



Equazioni di Maxwell

- Leggi primarie
- Leggi secondarie
(derivate dalle primarie)

$$\operatorname{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho_c}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_c$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$



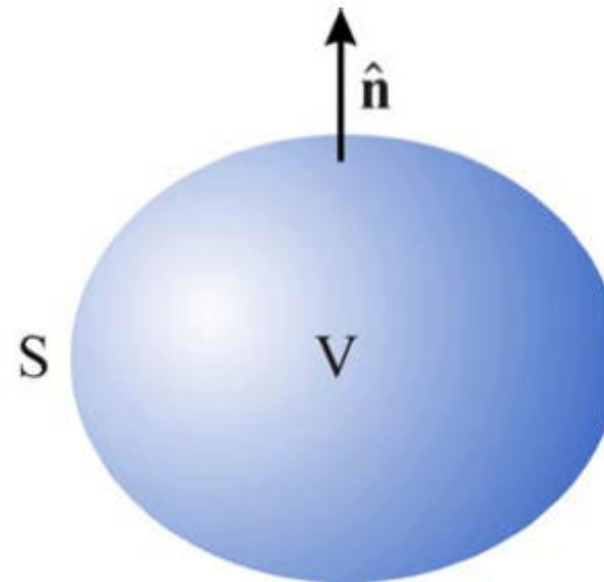
Legge di conservazione della carica

- Forma locale
- Forma integrale

$$\text{div } \vec{J} = -\frac{\partial \rho_c}{\partial t}$$

$$\oint_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = -\frac{d}{dt} \int_V \rho_c dV = -\frac{dQ}{dt} = i$$

- La corrente uscente da una superficie chiusa è uguale alla diminuzione nell'unità di tempo della carica elettrica contenuta all'interno della superficie stessa



Legge di Ampere-Maxwell

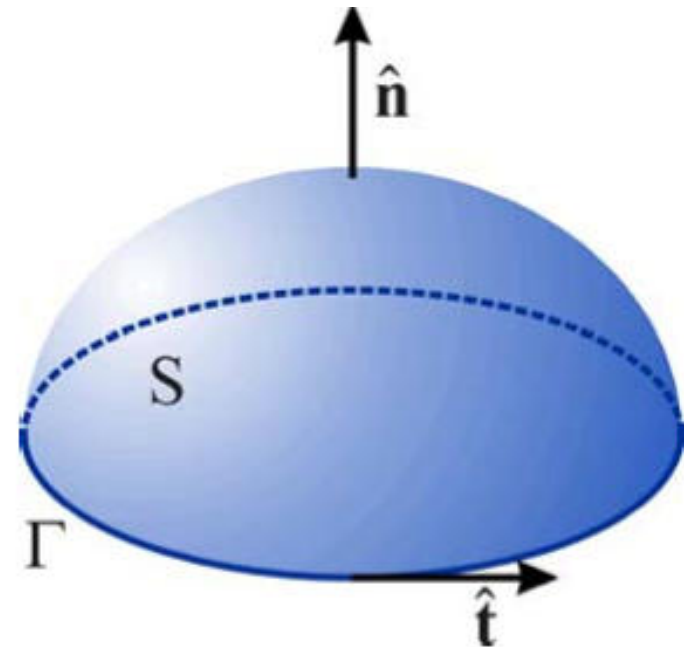
- Forma locale

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

- Forma integrale

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot \hat{t} dl = \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot \hat{n} dS + \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = i_c$$

- La circuitazione del vettore campo magnetico lungo una linea chiusa è uguale alla corrente totale concatenata con la linea stessa



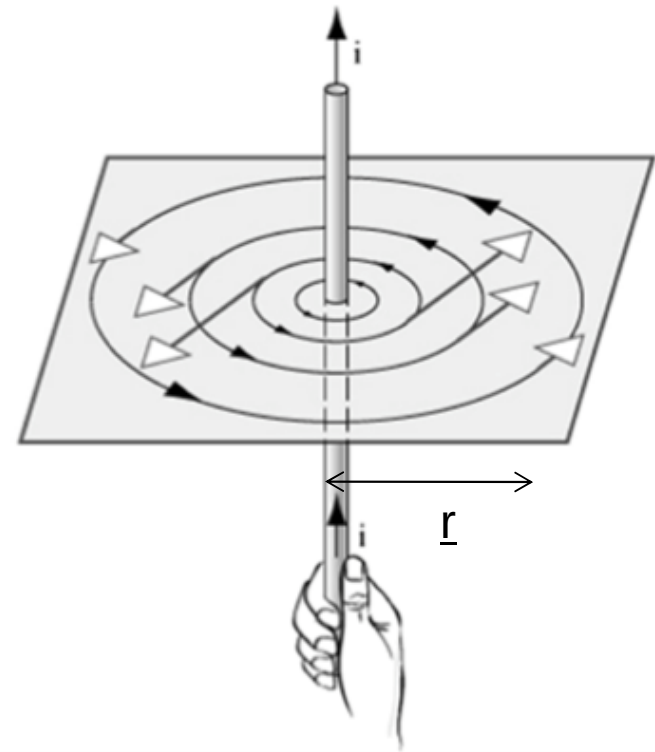
Legge di Ampere-Maxwell

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot \hat{t} dl = \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot \hat{n} dS + \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = i_c$$

- Conduttore rettilineo:

$$H l = i_c \quad l = 2\pi r$$

$$B = \mu \frac{i_c}{2\pi r}$$





Legge di Faraday-Neumann-Lenz

- Forma locale

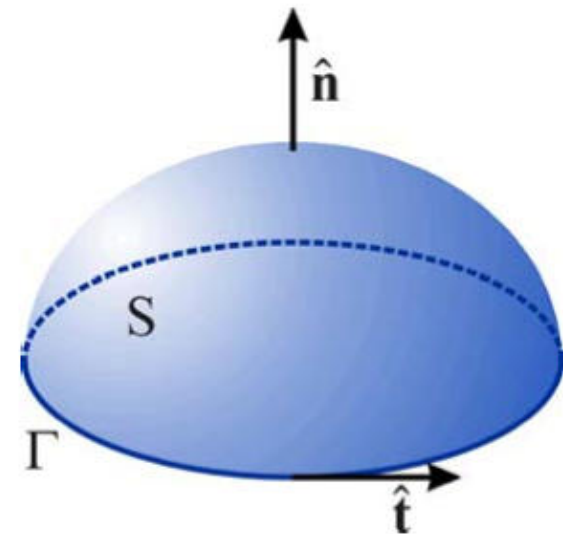
$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- La forza elettromotrice indotta in una linea chiusa è uguale alla derivata del flusso di induzione magnetica concatenato con la linea stessa. La forza elettromotrice indotta si oppone alla causa che l'ha generata

- Forma integrale

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS$$

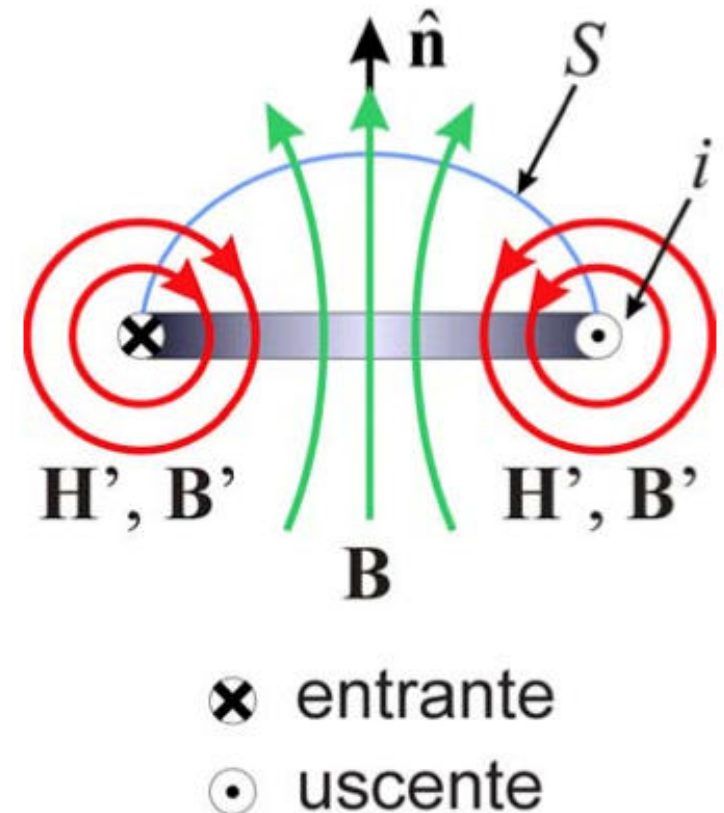
$$e = \frac{d\lambda}{dt}$$



Legge di Faraday-Neumann-Lenz

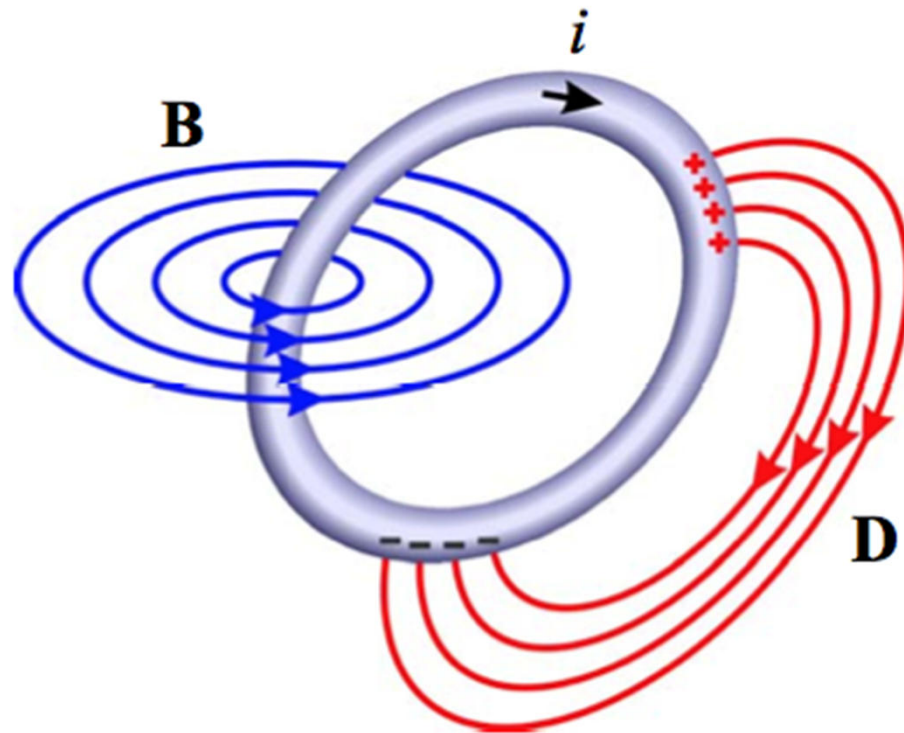
$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} dl = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS \quad e = \frac{d\lambda}{dt}$$

- Nel caso in cui la linea coincida con un conduttore. La presenza di induzione magnetica B variabile induce f.e.m. e , che induce corrente i nel conduttore. La corrente induce (Ampere) un campo magnetico H' e una induzione B' opposta alla induzione B .

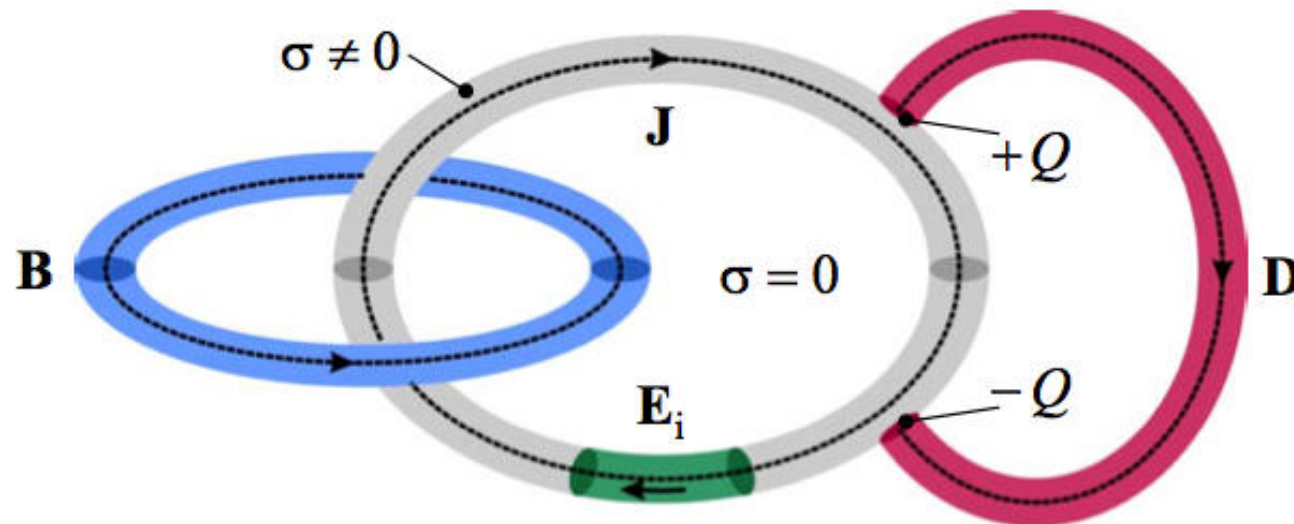


Elettromagnetismo quasi stazionario

- Condizioni non stazionarie: campo elettromagnetico
- Condizioni stazionarie: disaccoppiamento tra le equazioni di campo elettrico e campo magnetico



Elettromagnetismo stazionario



$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$



**Legge di
Hopkinson**

$$\mathcal{R}\Phi = i_c$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_i)$$



**Legge
di Ohm**

$$Ri = e$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$



$$\frac{Q}{C} = V$$

**Equazione del
condensatore**

Elettromagnetismo stazionario

- Resistenza**

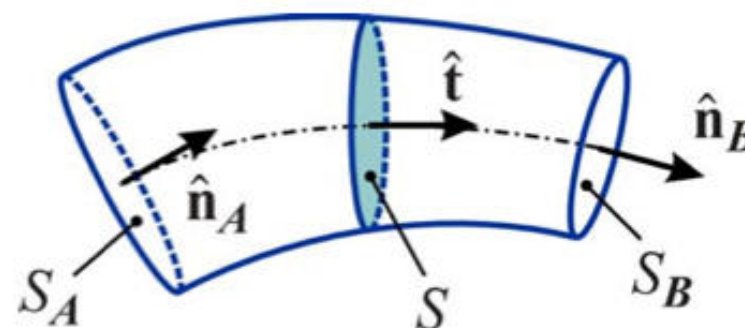
$$R_{AB} = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{\int_{\Gamma_{AB}} E dl}{\int_S J dS} = \int_0^l \frac{dx}{\sigma(x) A(x)}$$

- Riluttanza**

$$\mathcal{R}_{AB} = \frac{\Psi_{AB}}{\Phi} = \frac{\int_{\Gamma_{AB}} H dl}{\int_S B dS} = \int_0^l \frac{dx}{\mu(x) A(x)}$$

- Capacità**

$$\frac{1}{C_{AB}} = \frac{V_{AB}}{Q} = \frac{\int_{\Gamma_{AB}} E dl}{\int_S D dS} = \int_0^l \frac{dx}{\epsilon(x) A(x)}$$

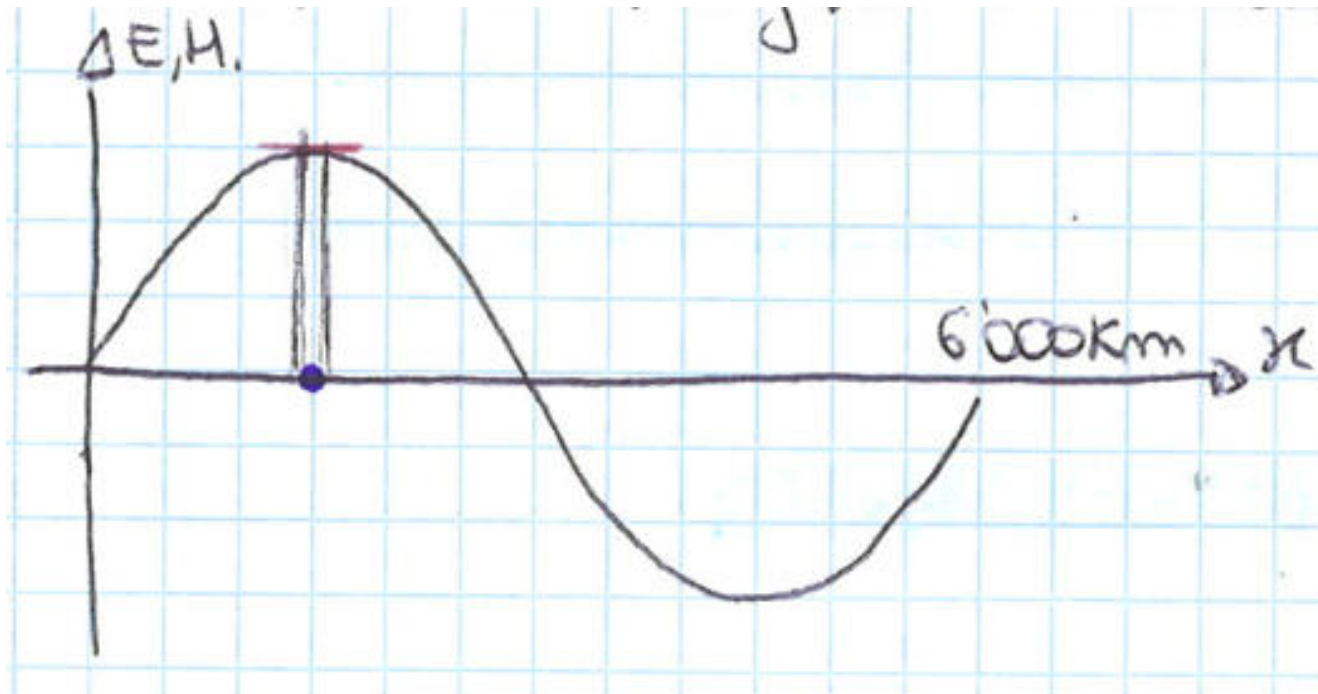


Le ultime uguaglianze valgono nel caso di tubi di flusso "filiformi"



Elettromagnetismo quasi stazionario

- Condizioni quasi stazionarie



$$d \ll \lambda$$



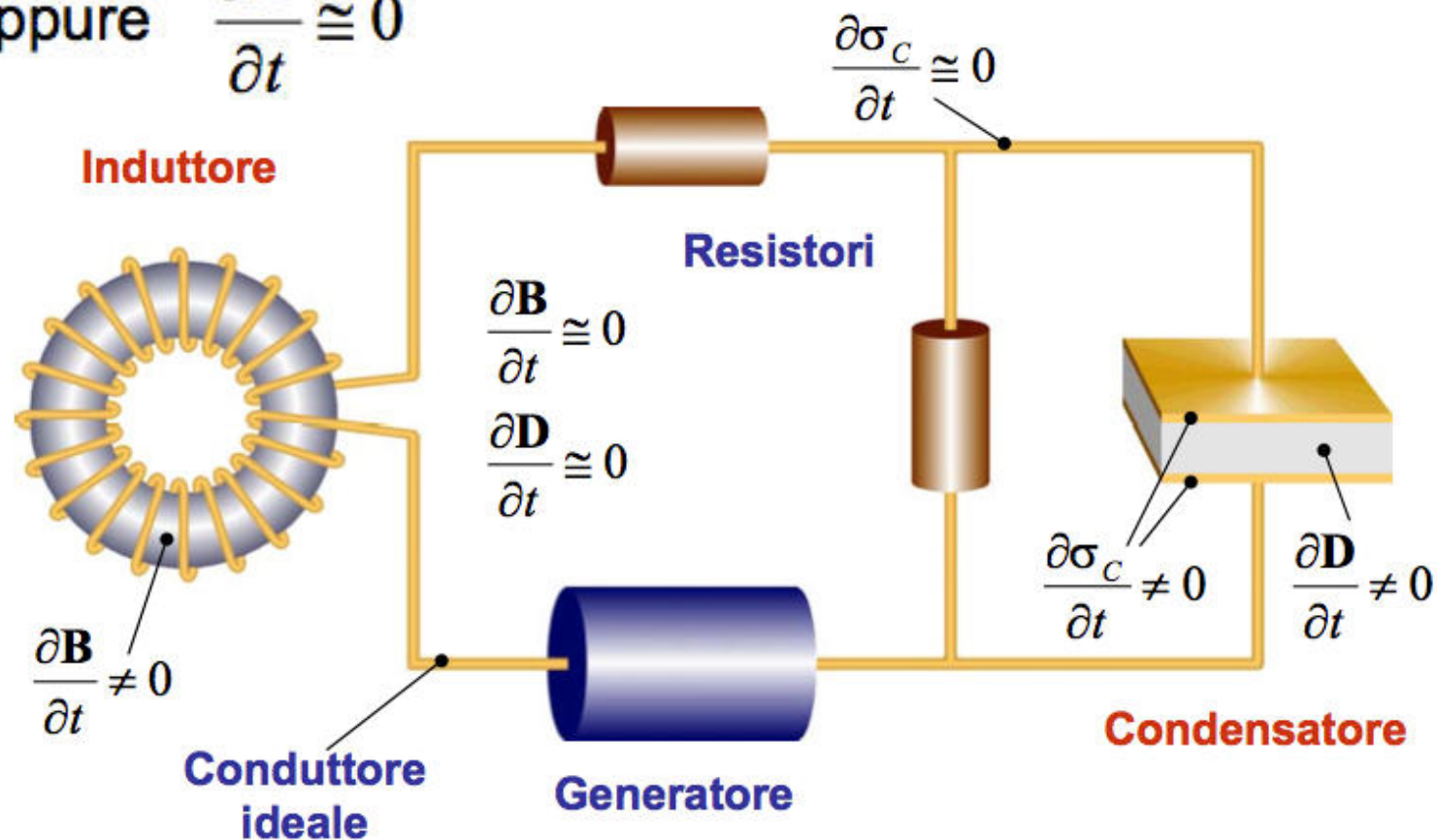
Elettromagnetismo quasi stazionario

Limiti di validità

f	T	$\lambda = c_0 T$
50 Hz	20 ms	6000 km
100 Hz	10 ms	3000 km
1 kHz	1 ms	300 km
10 kHz	100 μ s	30 km
20 kHz	50 μ s	15 km
100 kHz	10 μ s	3 km
1 MHz	1 μ s	300 m
10 MHz	100 ns	30 m
100 MHz	10 ns	3 m
1 GHz	1 ns	300 mm
10 GHz	100 ps	30 mm

Condizioni quasi stazionarie

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cong 0 \quad \text{oppure} \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cong 0$$





Condizioni quasi stazionarie

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \neq 0 \quad \text{negli induttori}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cong 0 \quad \text{nelle rimanenti regioni}$$

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \neq 0 \quad \text{nei condensatori}$$

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cong 0 \quad \text{nelle rimanenti regioni}$$

In queste condizioni il sistema può essere ancora descritto mediante un modello circuitale a condizione che le superfici limite dei componenti siano definite in modo che derivate di $\mathbf{B}$ e di $\mathbf{D}$ possano essere diverse da zero solo al loro interno

(Ad esempio, non si può racchiudere in una superficie limite una sola armatura di un condensatore)

Circuiti magnetici ad elevata permeabilità

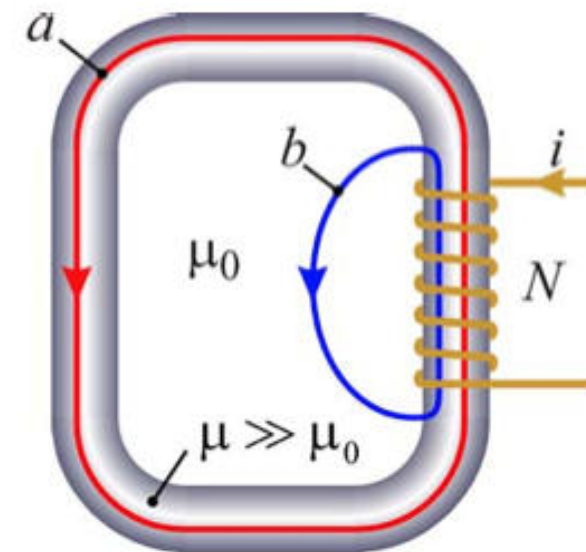
- Si considerano due tubi di flusso filiformi aventi assi coincidenti con le linee a e b
- Dalla legge di Hopkinson si ottiene

$$\Phi_a = \frac{Ni}{\mathcal{R}_a} \quad \Phi_b = \frac{Ni}{\mathcal{R}_b}$$

- Dato che il tubo di flusso b comprende un tratto a bassa permeabilità risulta

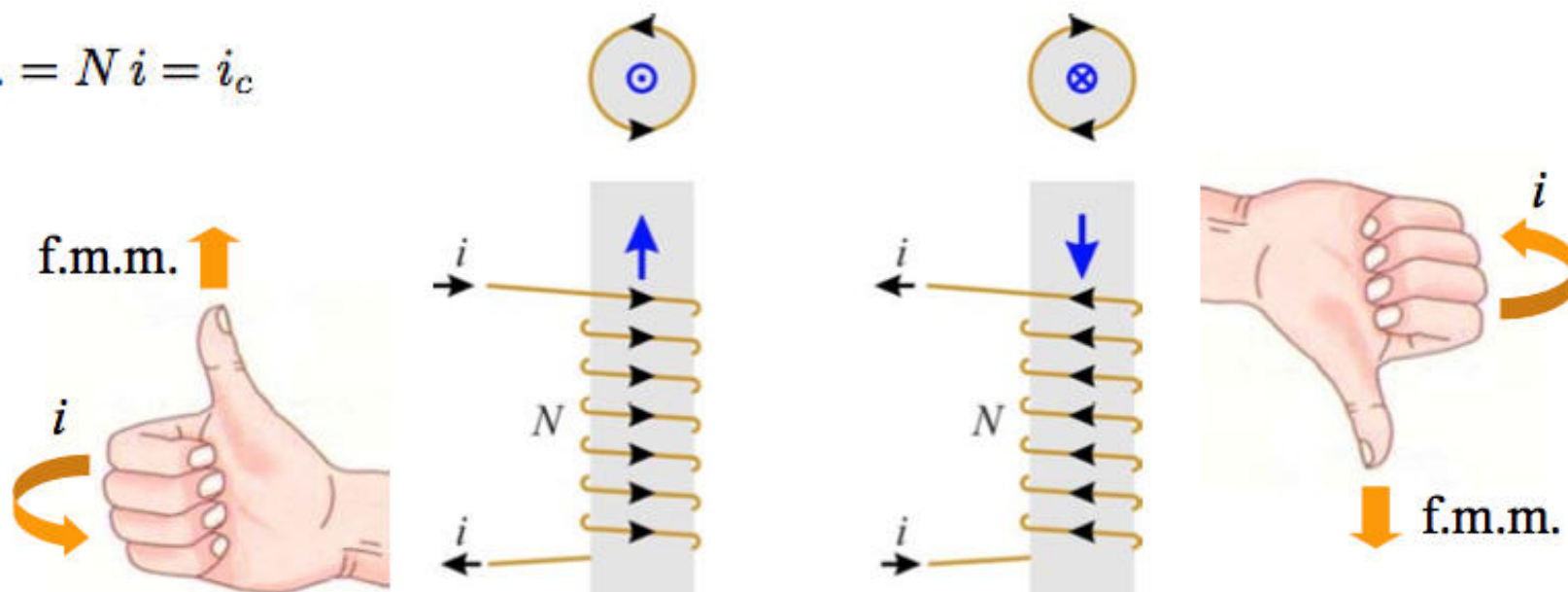
$$\mathcal{R}_b \gg \mathcal{R}_a \quad \Rightarrow \quad \Phi_b \ll \Phi_a$$

- ➔ E' possibile trascurare il flusso dovuto a linee del tipo b e considerare l'anello di materiale ad elevata permeabilità come un tubo di flusso di $\mathbf{B}$



Circuiti magnetici ad elevata permeabilità

$$f.m.m. = N i = i_c$$



- Alle f.m.m. degli avvolgimenti si associano versi di riferimento orientati relativamente ai versi delle correnti secondo la regola della mano destra
- A secondo membro dell'equazione di una maglia, alla f.m.m. di un avvolgimento si attribuisce segno + se il suo verso di riferimento è concorde con il verso della maglia, segno – se è discorde



Analogia circuiti elettrici e magnetici

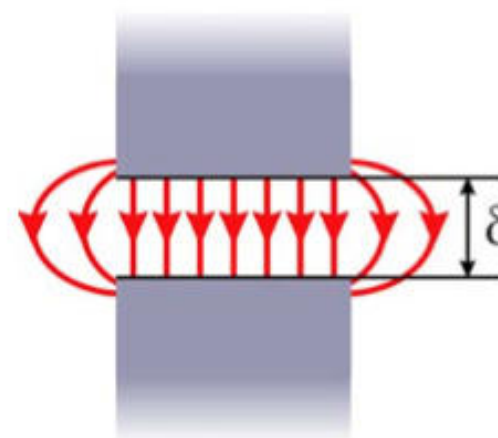
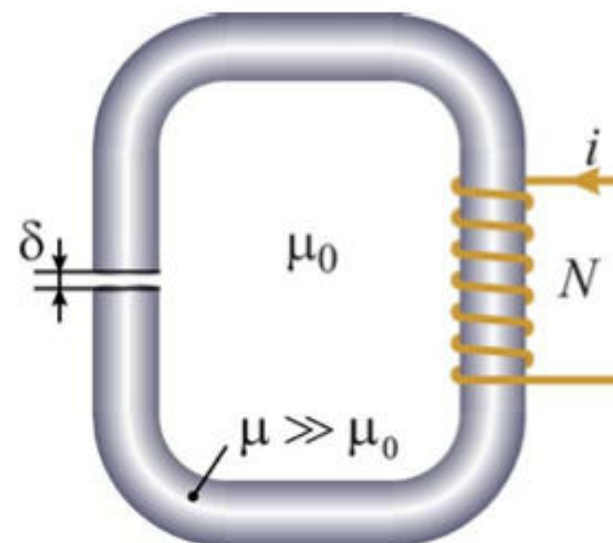
Circuiti elettrici	Circuiti magnetici
R	$\mathcal{R}$
i	Φ
v	ψ
(f.e.m.) e	(f.m.m.) Ni
$v_k = R_k i_k$	$\psi_k = \mathcal{R}_k \Phi_k$
$\sum_k \pm i_k = 0$	$\sum_k \pm \Phi_k = 0$
$\sum_k \pm R i_k = \sum_k \pm e_k$	$\sum_k \pm \mathcal{R}_k \Phi_k = \sum_k \pm N_k i_k$

Traferri nei circuiti magnetici

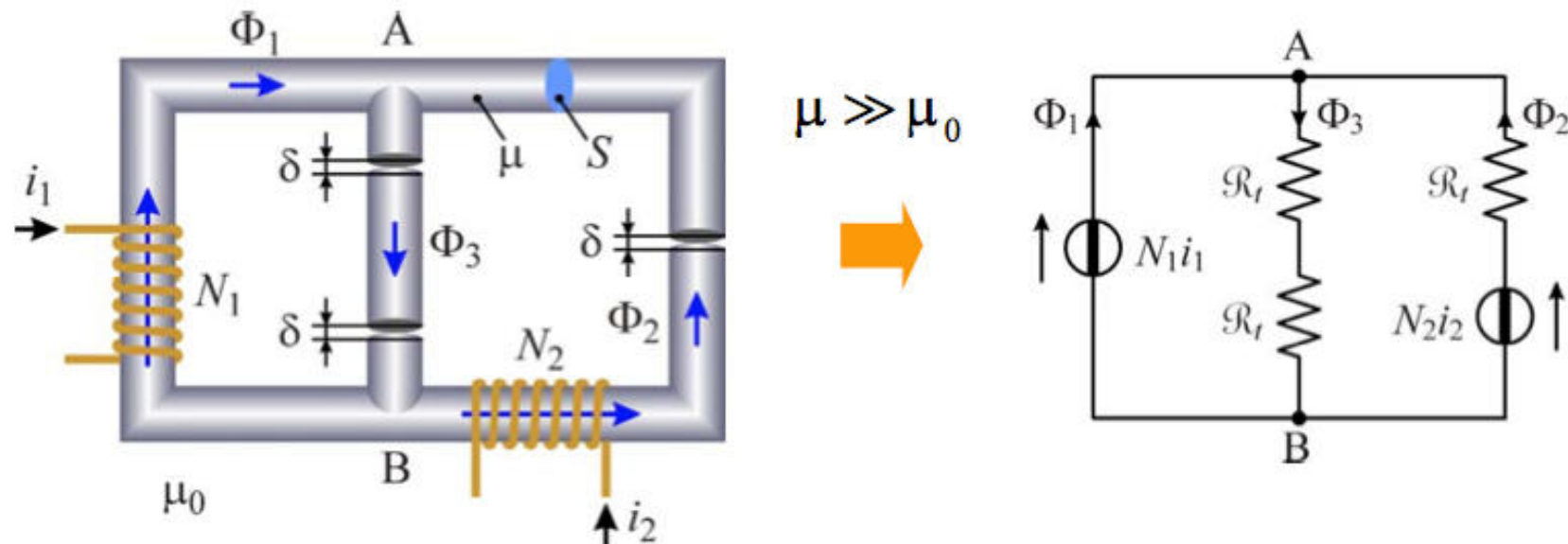
- In alcuni casi, in un circuito magnetico si possono avere delle interruzioni del materiale ad elevata permeabilità (**traferri**)

$$N i = \mathcal{R} \phi + \mathcal{R}_t \phi$$

- La presenza di traferri di piccolo spessore non altera in modo significativo l'andamento delle linee di flusso di $\mathbf{B}$ (si hanno degli *effetti di bordo*, spesso trascurabili)



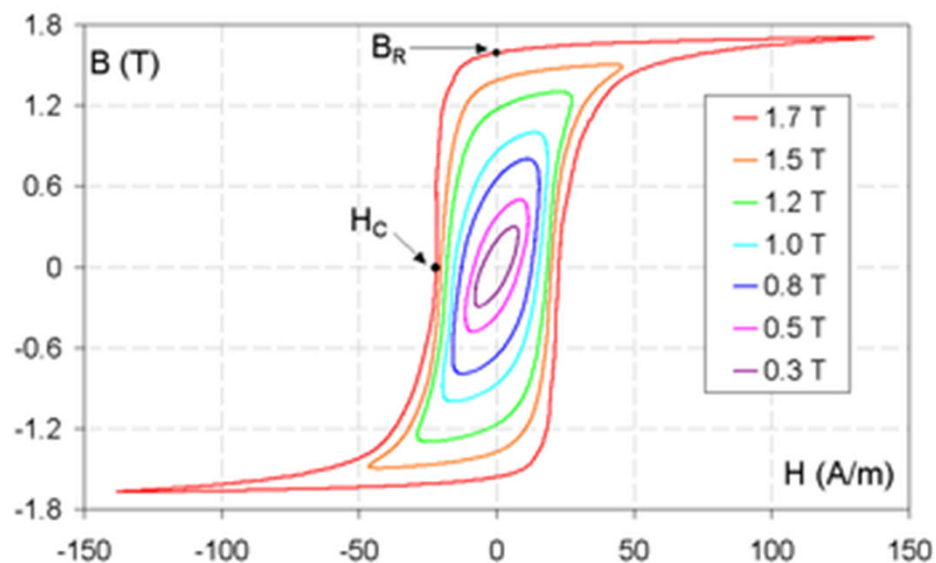
Traferri nei circuiti magnetici



Traferri di uguale spessore δ

Riluttanza di un traferro:
$$\mathcal{R}_t = \frac{\delta}{\mu_0 S}$$

Materiali ferromagnetici



Una famiglia di cicli di isteresi magnetica misurata con una densità di flusso modulata sinusoidalmente con frequenza di 50 Hz ed ampiezza variabile da 0,3 T a 1,7 T. Il materiale è acciaio a cristalli orientati.

B = Induzione magnetica

H = Campo magnetico

B_R = Rimanenza

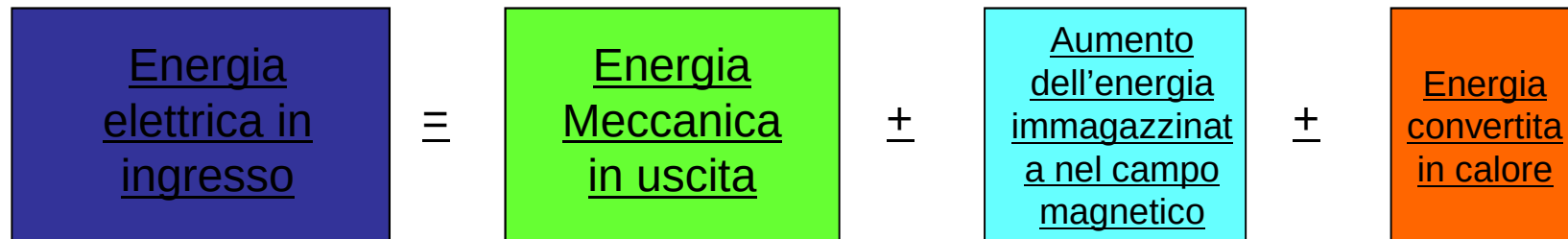
H_C = Coercitività



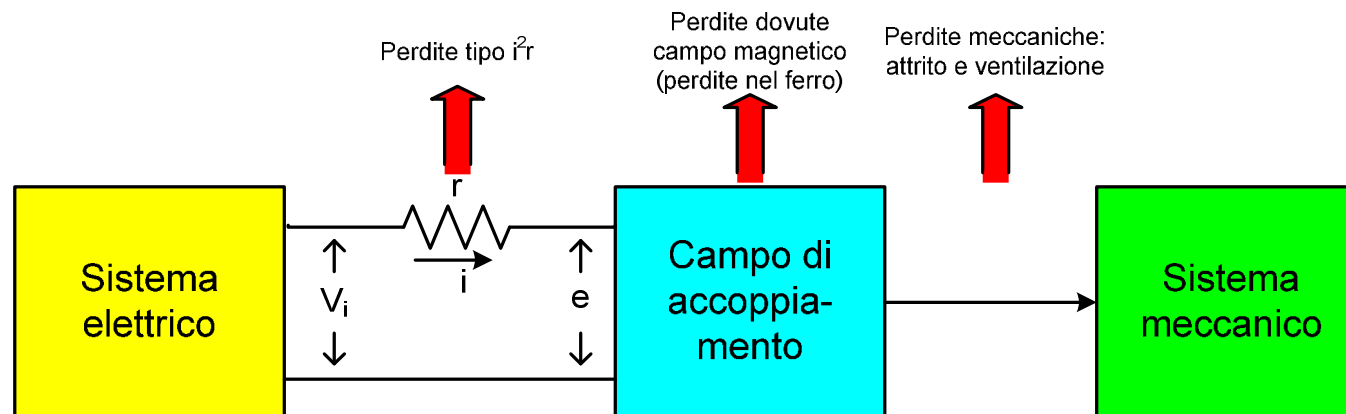
Conversione elettromeccanica dell'energia

Obiettivo: esprimere la coppia in funzione dell'energia interna del sistema

Bilancio energetico



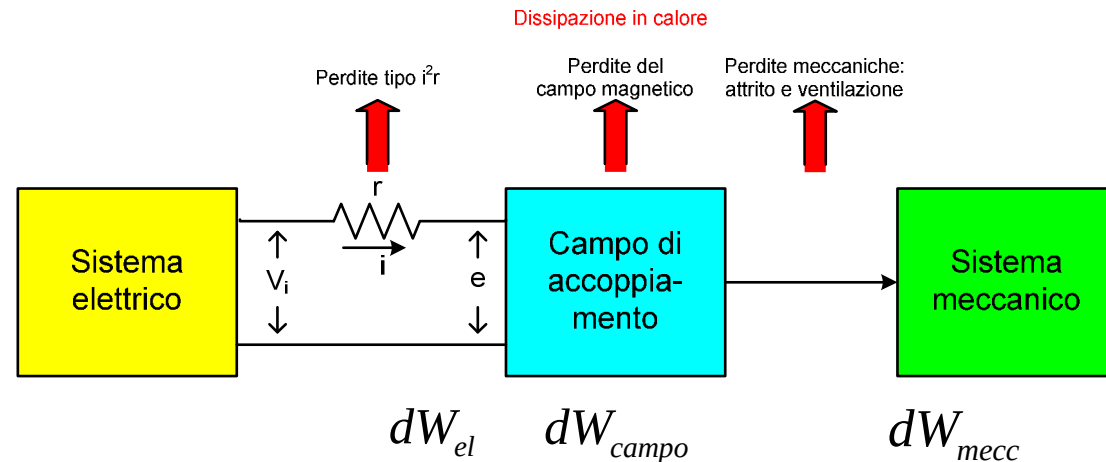
Dissipazione in calore



Radiazione elettromagnetica trascurabile

Conversione elettromeccanica dell'energia

Analisi energetica nel tempo dt



$$dW_{el} = v_i i dt - i^2 r dt = (v_i - ir) i dt$$

Energia elettrica netta entrante nel dispositivo di accoppiamento

Quando si produce un lavoro meccanico deve essere presente

in grado di richiamare dalla sorgente ulteriore energia.

Questa reazione è la forza elettromotrice f.e.m e $= v_i - ir$

Trascurando le perdite nel ferro prodotte dal campo magnetico e le perdite meccaniche si può scrivere:

$$dW_{el} = e i dt$$

$$dW_{el} = dW_{campo} + dW_{mecc}$$

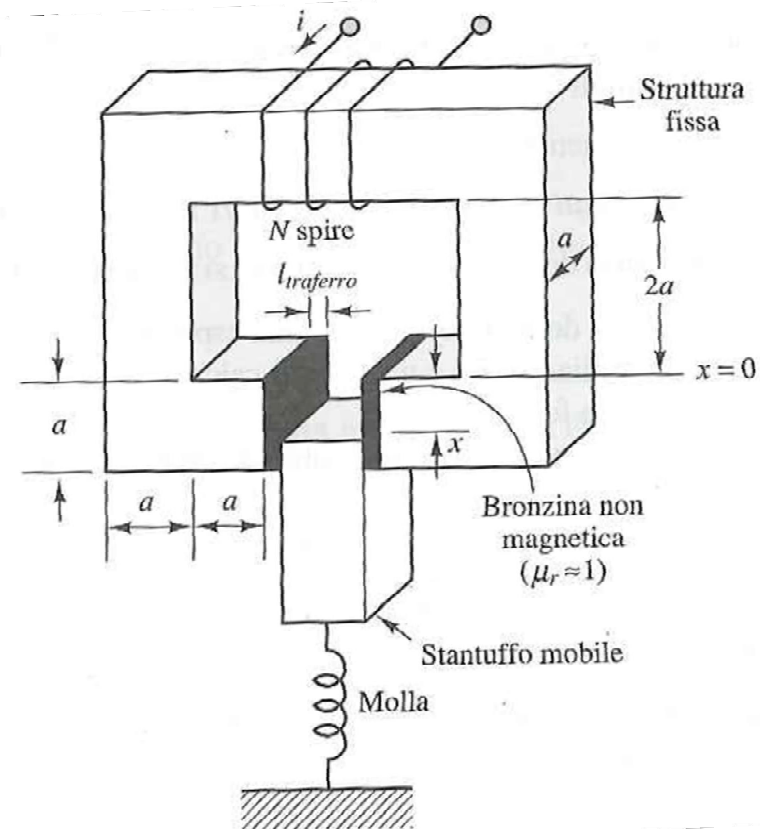
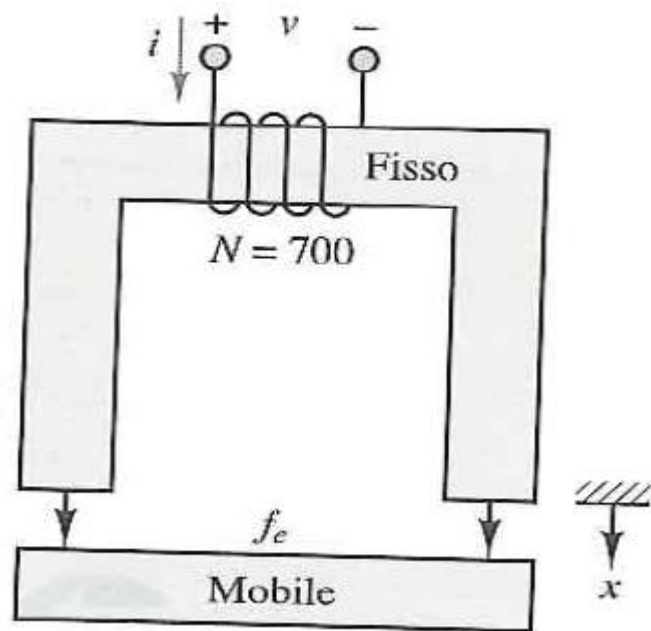


Conversione elettromeccanica dell'energia

Quest'ultima equazione insieme alla legge di Faraday costituisce la base per l'analisi dei dispositivi di conversione elettromeccanica. Lo studio di questi dispositivi comprende due fasi:

- Calcolo dell'espressione dell'energia immagazzinata nel campo in funzione delle variabili elettriche e della configurazione delle parti meccaniche.
- Esaminare come l'energia del campo è influenzata dai cambiamenti di configurazione delle parti meccaniche.

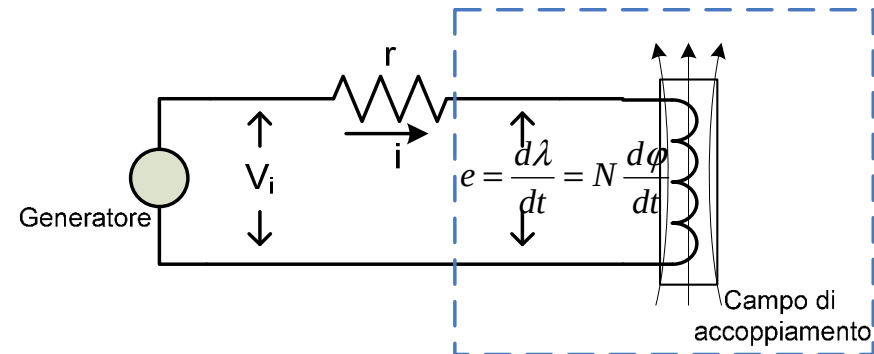
Attuatori lineari





Conversione elettromeccanica dell'energia: esempio

L'accoppiamento elettrico-meccanico avviene attraverso un sistema magnetico che consideriamo inizialmente pari ad un unico avvolgimento di eccitazione.



$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt}$$

λ : valore istantaneo del flusso concatenato dalle N spire dell'avvolgimento

ϕ : flusso generato $\phi = \lambda / N$

$$dW_{el} = e i dt = \frac{d\lambda}{dt} i dt = \underline{i d\lambda} = N i d\phi = f_{mm} \cdot d\phi$$



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI FORLÌ

Alberto Bellini

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e
dell'Informazione "Guglielmo Marconi"

a.bellini@unibo.it

www.unibo.it/docenti/a.bellini