



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

Topologia e Circuiti

Elettrotecnica

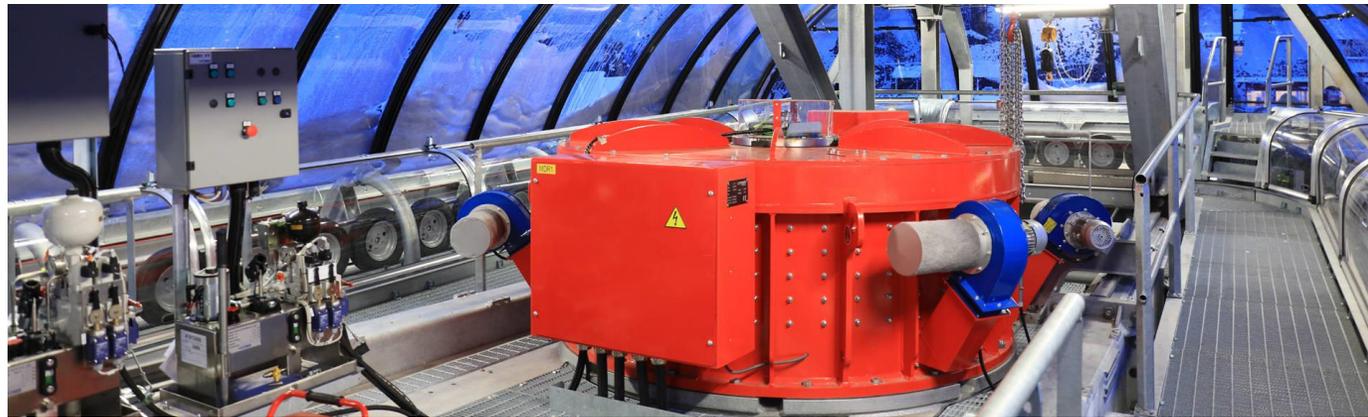
A.A. 2024 - 2025

Prof. Alessandro Massi Pavan – apavan@units.it

ELETTROMAGNETISMO ED ELETTROTECNICA

- L'elettromagnetismo ha rivoluzionato il nostro mondo con un'infinità di applicazioni a partire dal 1800
- Approccio fisico e approccio ingegneristico
- **Tecnica dell'Elettromagnetismo**
- Dispositivi e applicazioni per l'**energia** e per l'**informazione**
- Dispositivi **elettrici** ed **elettronici**

APPLICAZIONI



APPLICAZIONI



APPLICAZIONI



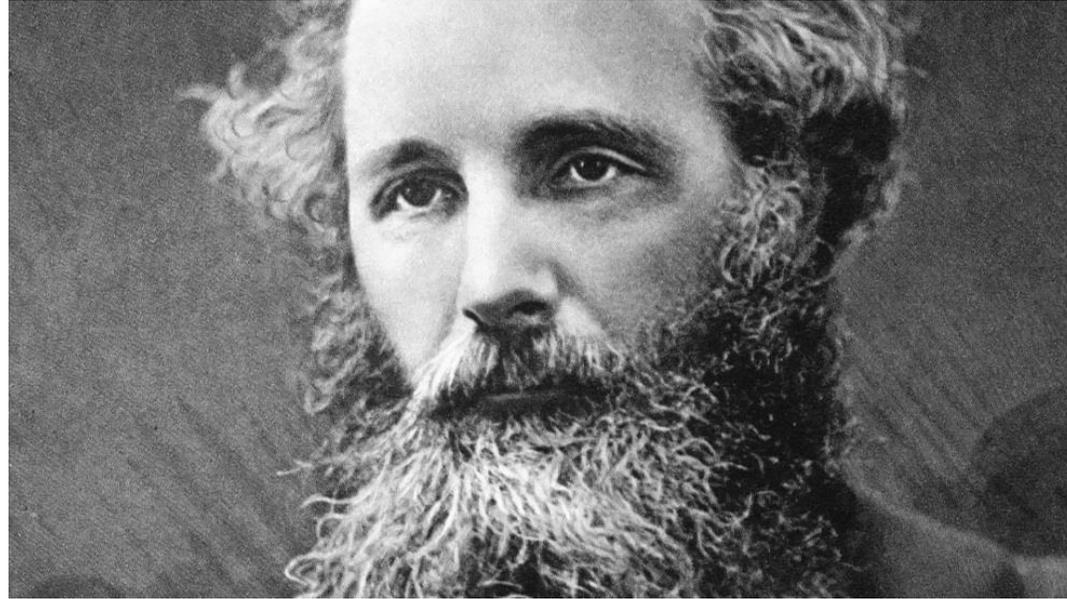
APPLICAZIONI



ELETTROTECNICA

- «La modellazione matematica è la caratteristica peculiare dell'**Elettrotecnica** rispetto all'**Elettromagnetismo fisico**»
- Semplici modelli per prevedere il comportamento dei dispositivi e dei **systemi reali**
- Possibilità di ideare **modelli ideali** per sviluppare nuovi dispositivi e nuovi sistemi

JAMES CLERK MAXWELL



✓ 1831 – 1879

✓ «*A Treatise on Electricity and Magnetism*»

TEORIA DEI CIRCUITI CONCENTRATI

- Le **Equazioni di Maxwell** possono essere approssimate tramite la **Teoria dei circuiti** concentrati
- Per valutare i limiti della teoria dei circuiti, i riferimenti sono la velocità di variazione delle grandezze elettriche e il **tempo di transito** (t - detto anche ritardo di propagazione)

- ✓ t - tempo di transito [s]
- ✓ l - lunghezza del dispositivo [m]
- ✓ c - velocità della luce ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)
- ✓ T - periodo [s]
- ✓ f - frequenza [Hz]

$$t = \frac{l}{c} \quad T = \frac{1}{f}$$

LIMITI DI VALIDITA'

- Possiamo considerare uguali la corrente entrante e uscente da un dispositivo se il tempo di transito è trascurabile rispetto al periodo: **variazioni delle grandezze elettriche nel dispositivo lente $T \gg t$**
- In questo caso si possono trascurare i fenomeni propagativi e non è necessario ricorrere alle equazioni di Maxwell
- Tali dispositivi possono essere modellati come circuiti e studiati tramite la **Teoria dei circuiti**
- Quando ($T \gg t$) Il dispositivo in questione si dice **dispositivo concentrato**

CARICA ELETTRICA

La carica elettrica è una grandezza fisica fondamentale


$$F = k \times \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

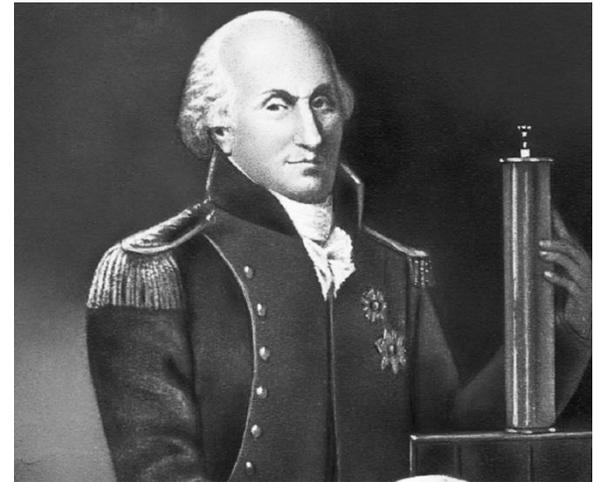
$$k = 8,99 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$$

La carica elettrica fondamentale è quella dell'elettrone pari a $1,6021917 \times 10^{-19} C$

IL COULOMB

- La carica elettrica si misura in coulomb [C]
- Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806)

$$1 \text{ C} \approx 6,24 \times 10^{18} \text{ elettroni}$$

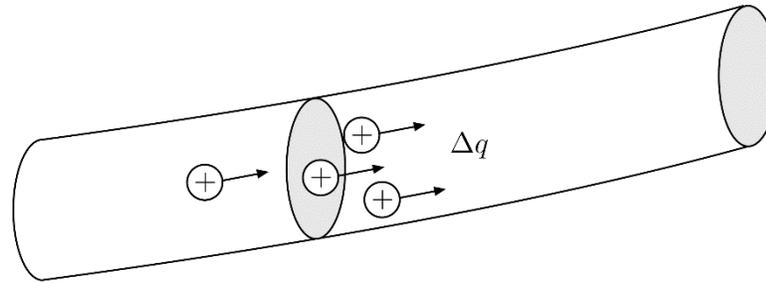


LA CARICA ELETTRICA NON SI CREA E
NON SI DISTRUGGE

CORRENTE ELETTRICA

La corrente elettrica è stabilita dal movimento delle cariche elettriche

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$



$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

CONVENZIONE: il verso della corrente è quello delle cariche positive

CORRENTE ELETTRICA

- La corrente elettrica si misura in ampere [A] con uno strumento chiamato amperometro
- André Marie Ampère (1775 – 1836)



$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad A = \frac{C}{s}$$

1 ampere = 1 coulomb/secondo

UNITA' FONDAMENTALI

Grandezza Fisica	Simbolo	Unità di misura	Simbolo
Intensità corrente elettrica	I	ampere	A
Intensità luminosa	I_v	candela	cd
Lunghezza	l	metro	m
Massa	m	chilogrammo	kg
Quantità di sostanza	n	mole	mol
Temperatura	T	kelvin	K
Intervallo di tempo	t	secondo	s

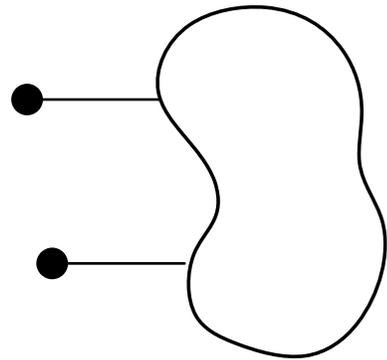
MULTIPLI E SOTTOMULTIPLI

Fattore moltiplicativo	Prefisso	Simbolo
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

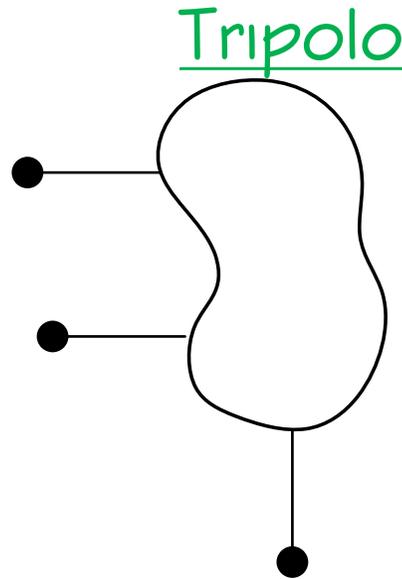
VALORI TIPICI DI CORRENTE

Applicazione	Corrente
Circuiti integrati	1 nA – 1 μ A
Corrente avvertita dalle persone	1 mA
Carica batterie del cellulare	150 mA – 1 A
Modulo fotovoltaico	5 – 10 A
Impianto elettrico domestico	1 – 20 A
Impianto elettrico industriale	10 – 200 A
Linea di trasmissione dell'energia elettrica	30 – 500 A
Alternatore	10 – qualche kA

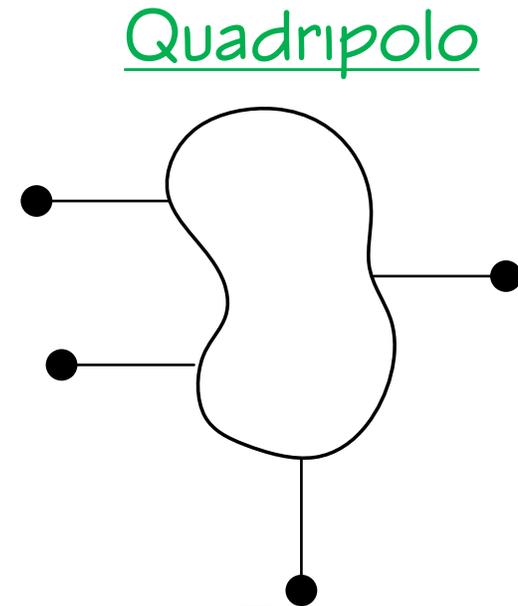
DISPOSITIVI MODELLABILI CIRCUITALMENTE - MULTIPOLI



Bipolo



Tripolo

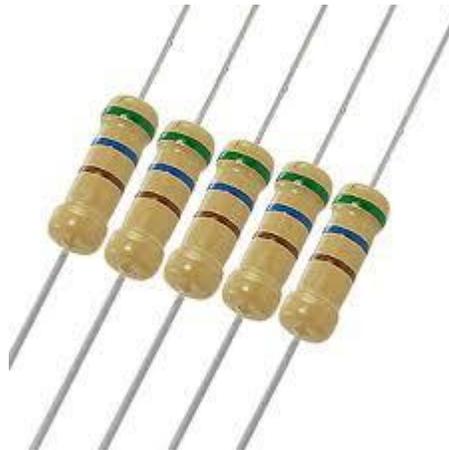
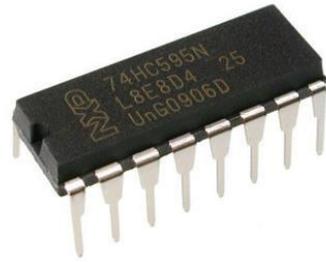


Quadripolo

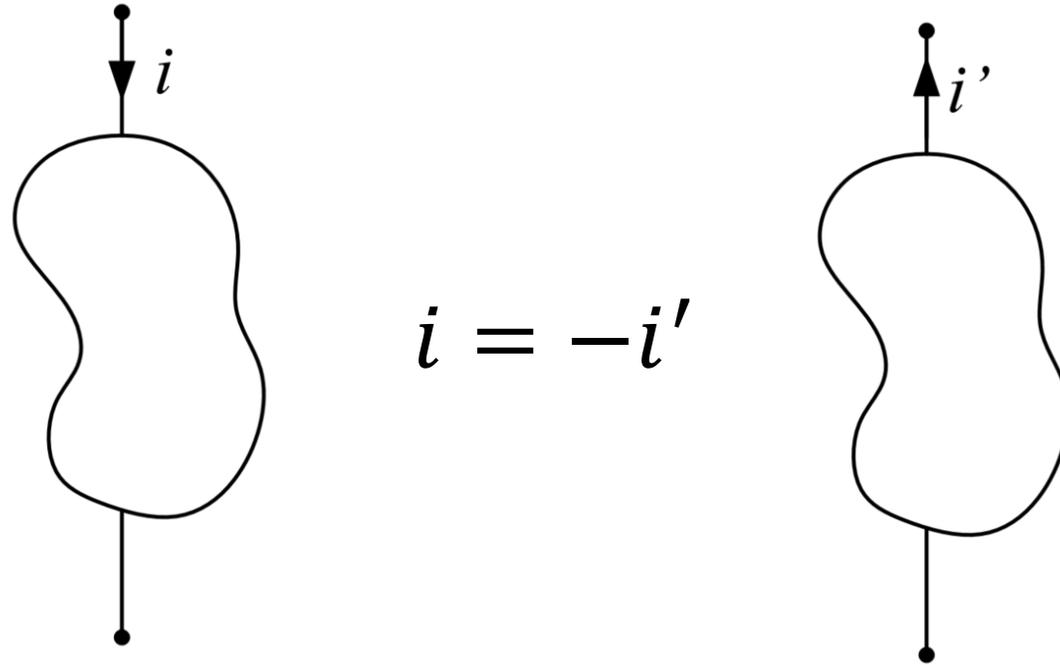
MORSETTO / TERMINALE / POLO



ESEMPI DI MORSETTI



IL VERSO DELLA CORRENTE



In un morsetto il **verso convenzionale della corrente** è arbitrario (scelto a priori) e non coincide necessariamente con quello fisico

IL VERSO DELLA CORRENTE

- Per ogni morsetto si fissa a priori un verso convenzionale della corrente
- Si eseguono i calcoli facendo riferimento a quella convenzione
- Se i calcoli portano a una corrente positiva allora quello scelto è il verso fisico della corrente
- Altrimenti la corrente fluisce attraverso il dispositivo nel verso opposto a quello convenzionale

IL CAMPO ELETTRICO

- Il concetto di campo elettrico viene introdotto per comprendere l'interazione a distanza tra le cariche elettriche
- Il campo elettrico è una modificazione dello spazio per azione di una o più cariche elettriche

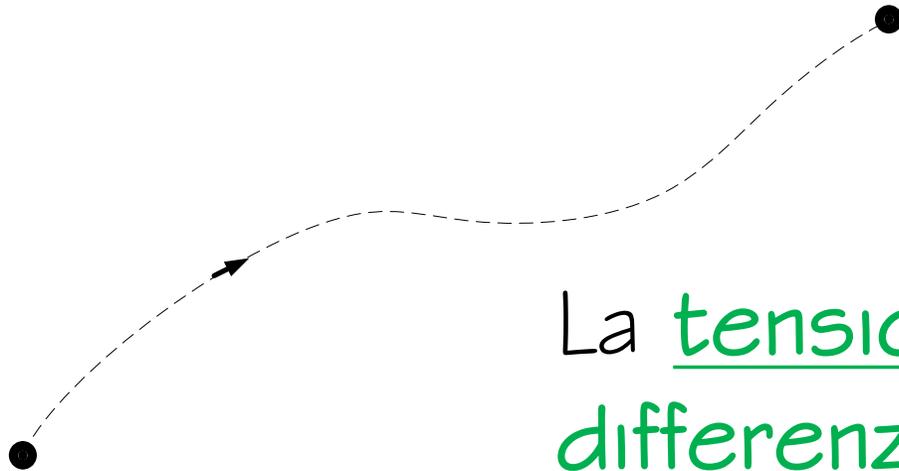
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad |\vec{F}| = k \times \frac{Q \cdot q}{r^2}$$

POTENZIALE ELETTRICO

- A una carica q che si trova in un campo elettrico è associata un'energia w
- L'energia per unità di carica viene detta potenziale e viene indicata con V

$$V = \frac{w}{q}$$

TENSIONE ELETTRICA



La tensione v_{ab} (detta anche differenza di potenziale) tra il punto **a** e il punto **b** è così definita:

$$v_{ab} = \frac{\Delta w}{q} = \frac{w(a) - w(b)}{q} = V(A) - V(B) = -v_{ba}$$

TENSIONE

- La tensione si misura in volt [V] utilizzando uno strumento chiamato voltmetro
- Alessandro Volta (1745 – 1827)

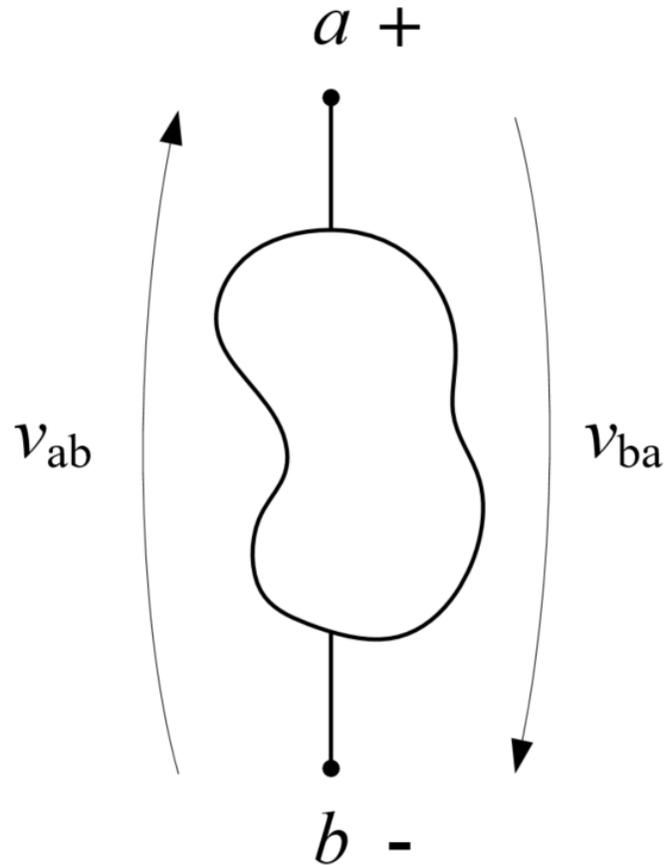


$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule/coulomb}$$

VALORI TIPICI DI TENSIONE

Applicazione	Tensione
Antenna radio	100 nV – 10 μ V
Batteria dell'automobile	12 V
Presca di casa	230 V
Presca industriale	400 V
Sistema di distribuzione energia elettrica	0,4 – 150 kV
Sistema di trasmissione energia elettrica	400 kV

POLARITA' DELLA TENSIONE



$$v_{ab} = -v_{ba}$$

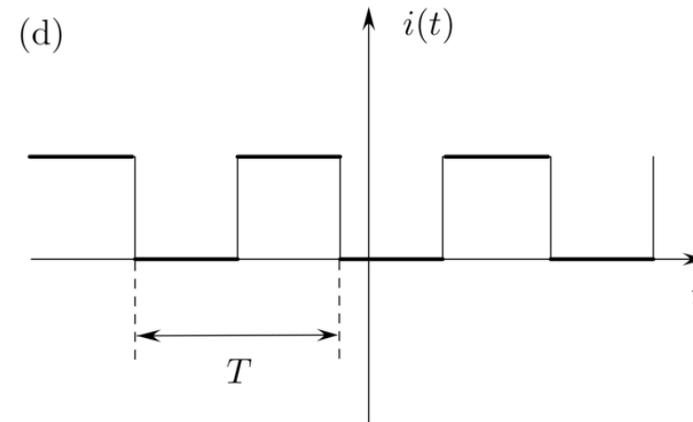
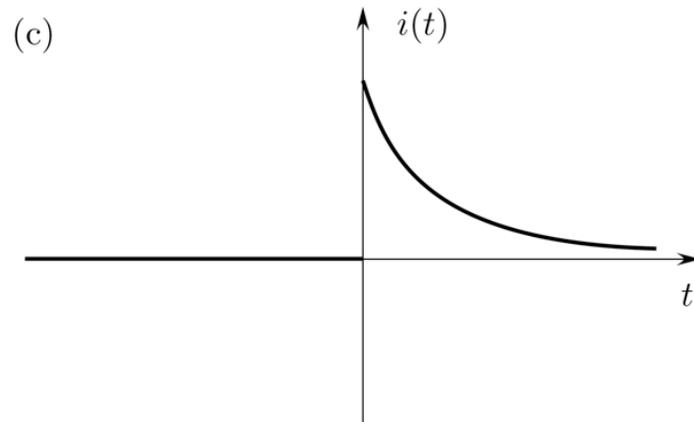
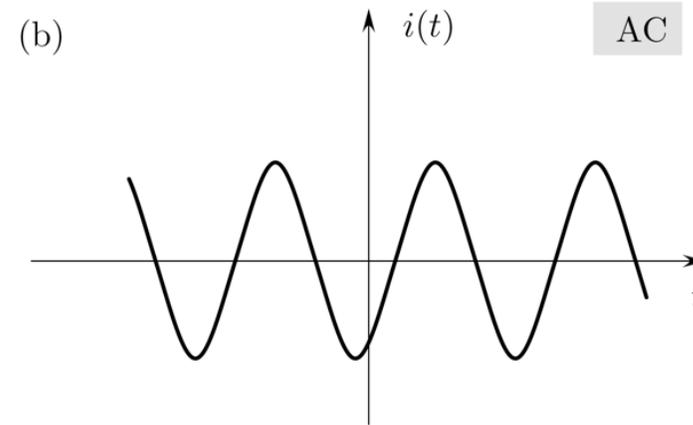
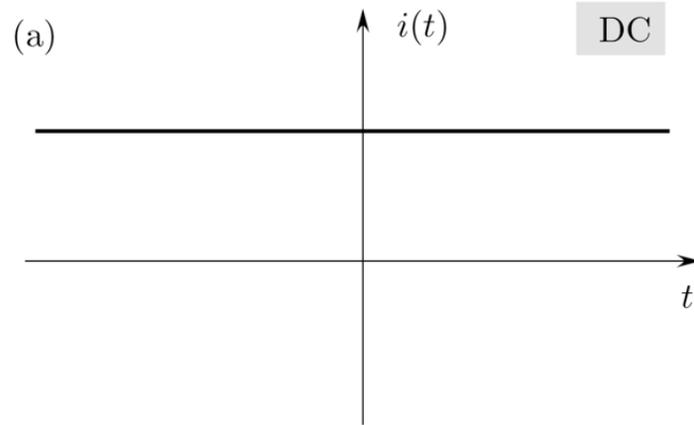
Il morsetto a potenziale maggiore è contrassegnato con il segno positivo (+)

Quello a potenziale minore con il segno negativo (-)

IL SEGNO DELLA TENSIONE

- Anche per la tensione si definisce un verso di riferimento che viene detto polarità
- La scelta della polarità è arbitraria e viene fatta a priori, come per la corrente
- Se i calcoli portano a una tensione positiva allora quella scelta è la polarità effettiva
- Altrimenti la polarità effettiva è opposta a quella di riferimento

FORME D'ONDA



CORRENTE CONTINUA (DC) - SORGENTI



CORRENTE CONTINUA - UTILIZZATORI



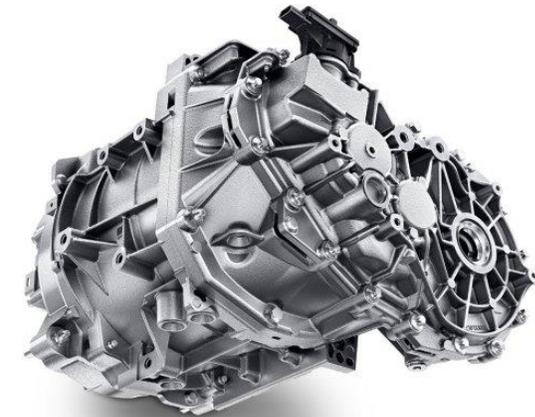
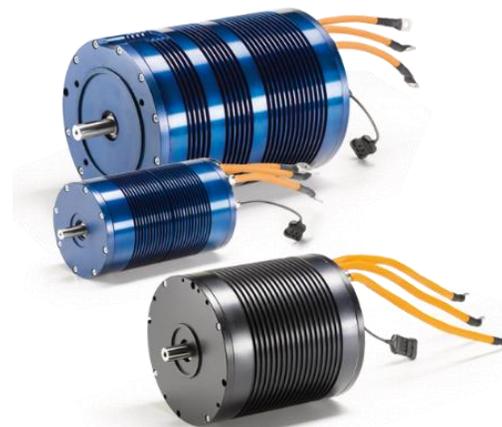
CORRENTE ALTERNATA (AC) - SORGENTI



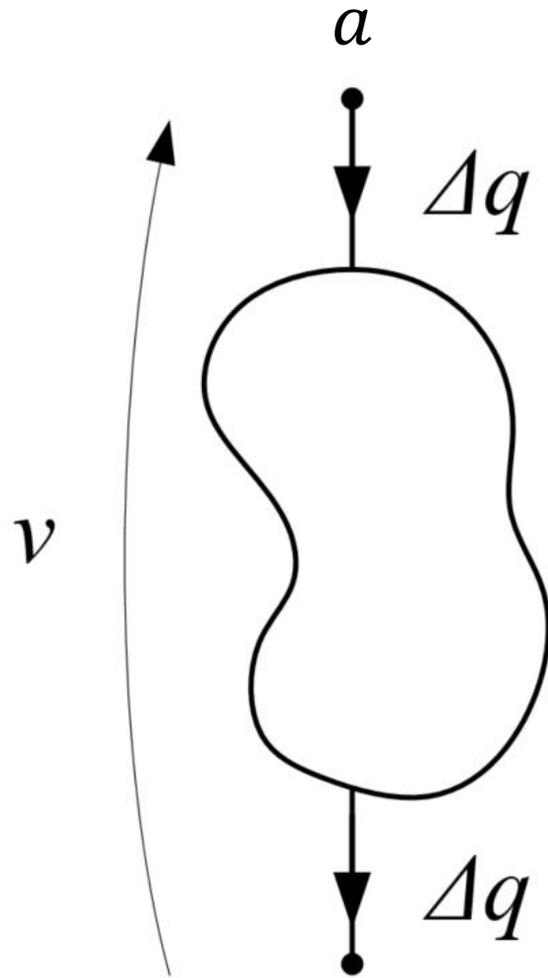
Solar Technology AG



CORRENTE ALTERNATA - UTILIZZATORI



POTENZA ELETTRICA



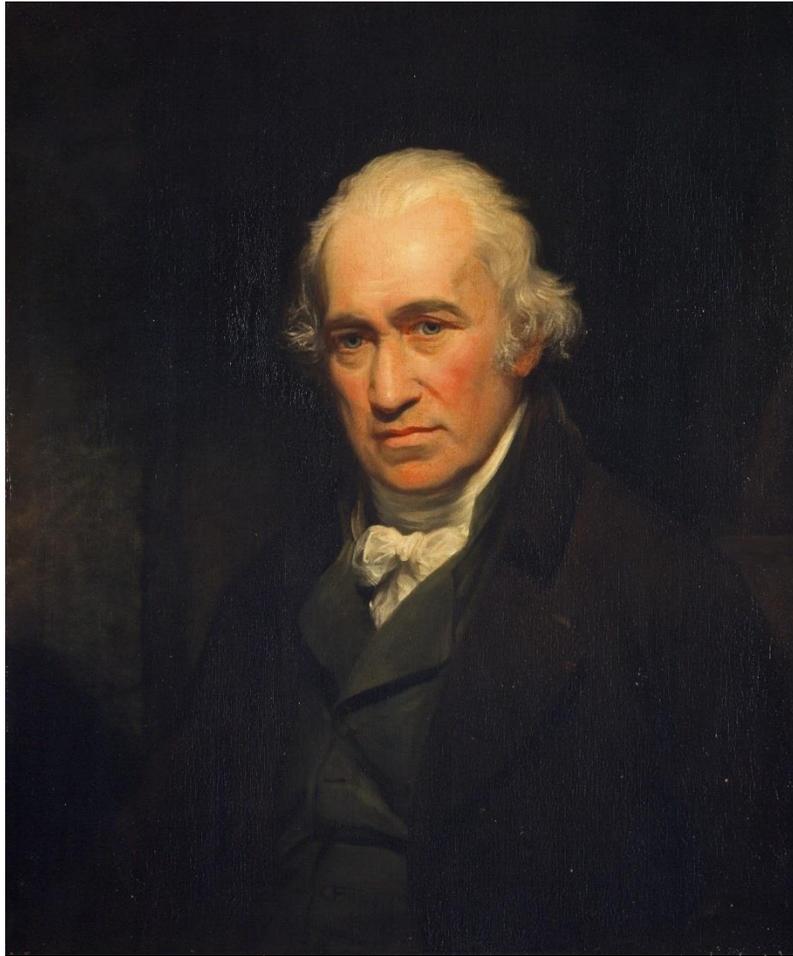
$$\Delta w = \Delta q \times v \quad p = \frac{\Delta w}{\Delta t}$$

$$p = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{dw}{dt}$$

$$p = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v \times \Delta q}{\Delta t} = v \times \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

$$p = v \times i$$

POTENZA ELETTRICA

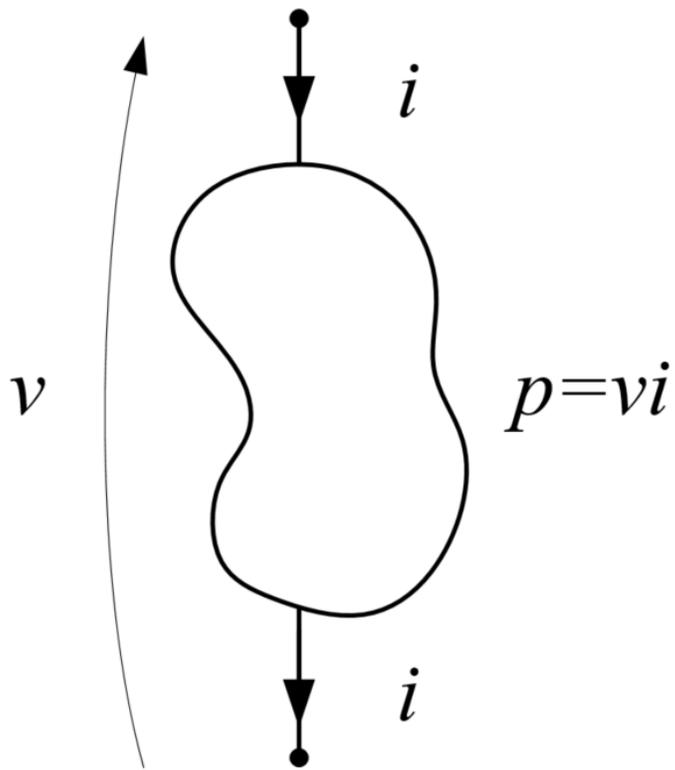


- La potenza si misura in watt [W] utilizzando uno strumento chiamato wattmetro
- James Watt (1736 – 1819)

$$p = v \times i$$

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/secondo}$$

CONVENZIONI DI SEGNO

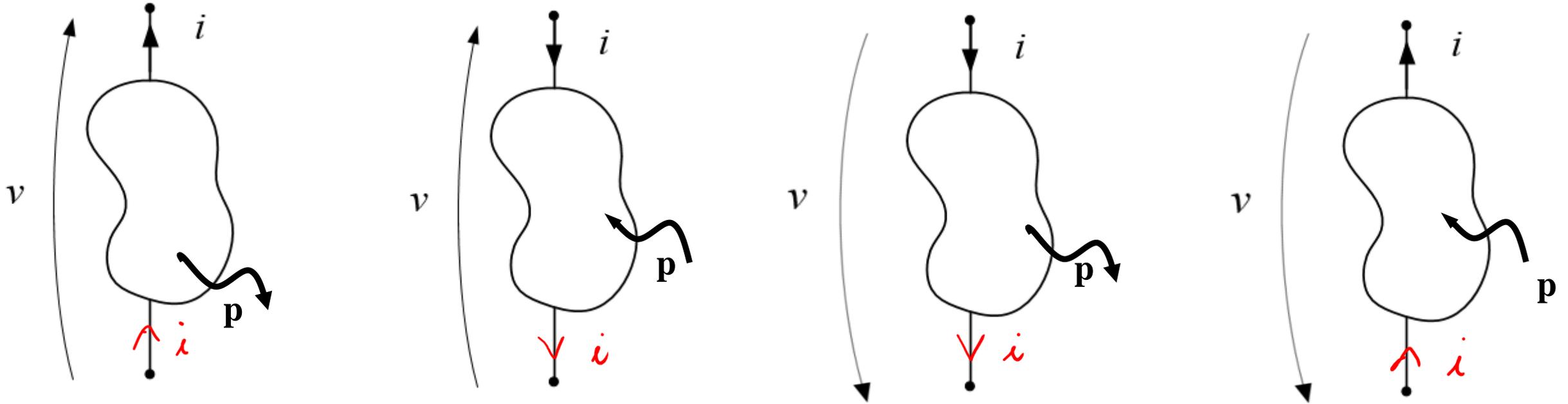


- Il verso della potenza scambiata con il bipolo coincide con quello della corrente al morsetto positivo positivo

- Vi sono allora quattro possibili combinazioni in funzione dei versi della tensione e della corrente

I versi della tensione e della corrente in figura si dicono coordinati

VERSO DELLA POTENZA



Potenza generata

Potenza assorbita

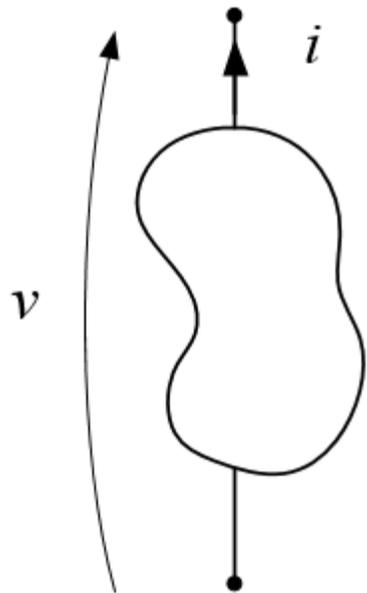
Potenza generata

Potenza assorbita

Il verso della potenza scambiata con il bipolo coincide sempre con quello della corrente al morsetto positivo

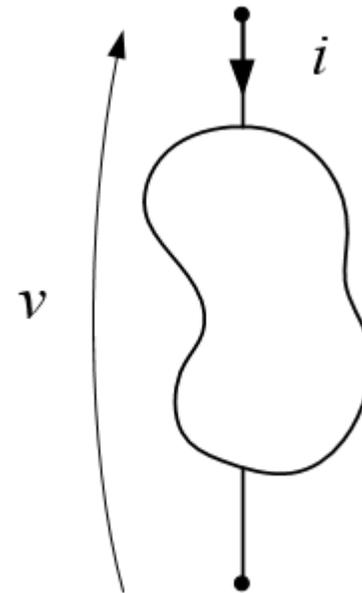
GENERATORI E UTILIZZATORI

Per un componente che normalmente cede potenza al circuito si usa la convenzione dei generatori e si assegna il segno positivo alla potenza ceduta



$P > 0$: ceduta
 $P < 0$: assorbita

Per un componente che normalmente assorbe potenza dal circuito si usa la convenzione degli utilizzatori e si assegna il segno positivo alla potenza assorbita



$P > 0$: assorbita
 $P < 0$: ceduta

VALORI TIPICI DI POTENZA

Applicazione	Potenza
Ricevitore di un telefono cellulare	5 pW
Personal Computer	100 W
Lavatrice	1 – 2 kW
Impianto domestico	3 kW
Colonnina ricarica veicoli elettrici	3,7 – 22 – 120 kW
Sincrotrone	1 - 5 MW
Impianto di distribuzione dell'energia	0,1 - qualche MW
Impianto di trasmissione dell'energia	100 - qualche GW
Impianto di produzione dell'energia	0,01 - qualche GW

ENERGIA ELETTRICA

$$p = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad \longrightarrow \quad \Delta w = p \times \Delta t \text{ [Wh]}$$

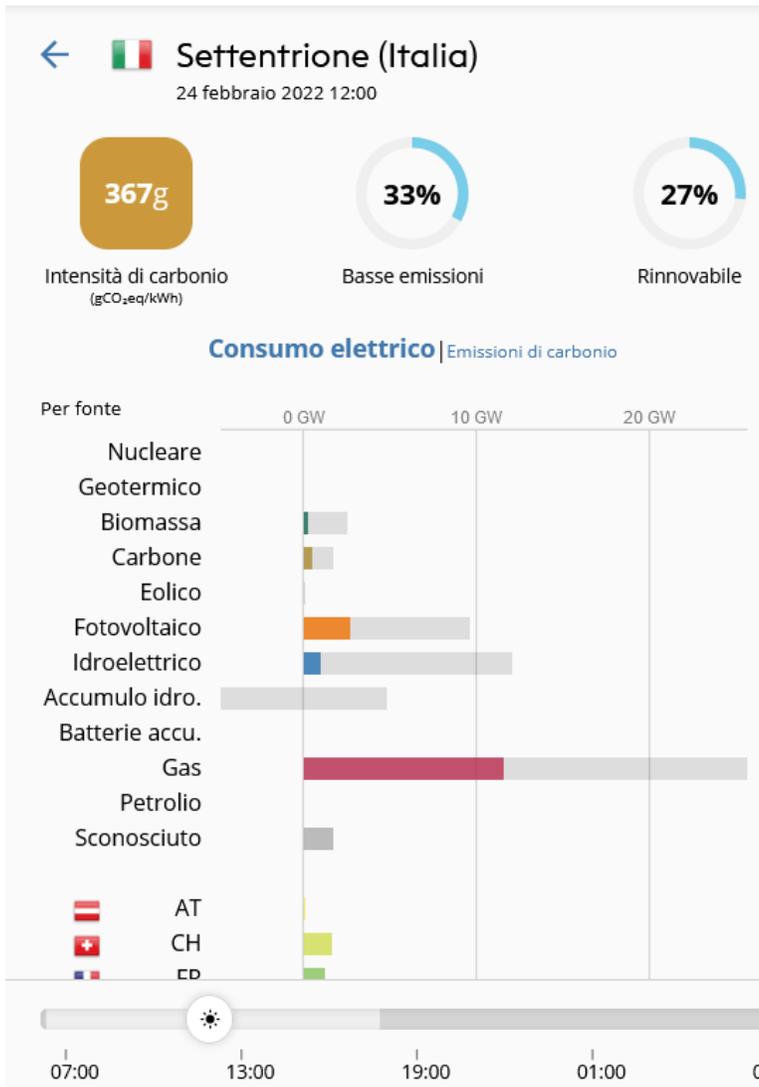
1 wattora = 1 watt × ora = 3.600 J

$$dw = p(t) \times dt$$

$$w(T) = \int_0^T p(t) dt = \int_0^T v(t) i(t) dt$$

VALORI TIPICI DI ENERGIA

Applicazione	Energia
Batteria del telefono cellulare	10 Wh
Consumo annuo di un frigorifero	150 – 300 kWh
Consumo annuo di una famiglia	2.000 kWh
Batteria di un'automobile elettrica	20 – 60 kWh
Produzione annua di un impianto fotovoltaico domestico	1.500 – 5.000 kWh
Produzione annua di una centrale elettrica	0,01 – 10 TWh

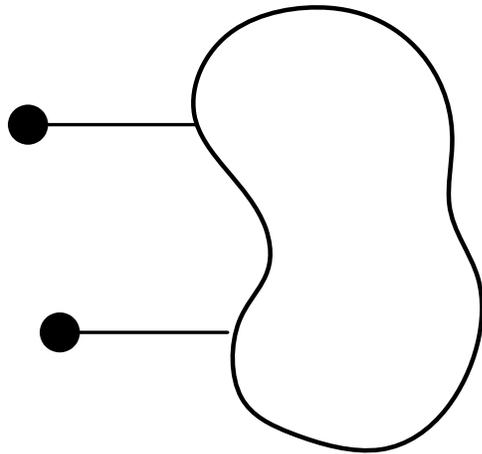


CONVENZIONI DI STILE

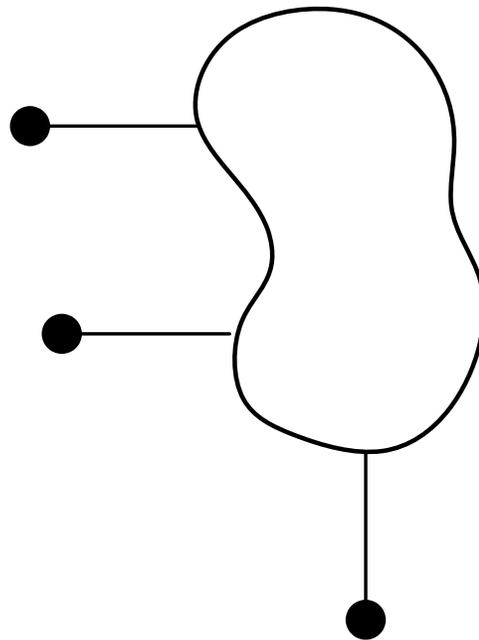
- Le grandezze elettriche variabili nel tempo si indicano con la lettera minuscola $i = i(t)$, $v = v(t)$, $p = p(t)$
- Le grandezze elettriche che non variano nel tempo si indicano con la lettera maiuscola I, V, P
- Con lettere maiuscole opportunamente contrassegnate indicheremo altri valori delle grandezze elettriche che vedremo in seguito $\bar{I}, \bar{V}, \bar{S}$

MULTIPOLI

I dispositivi elettromagnetici modellabili circuitualmente sono dotati di morsetti e il loro modello circuitale viene chiamato multipolo

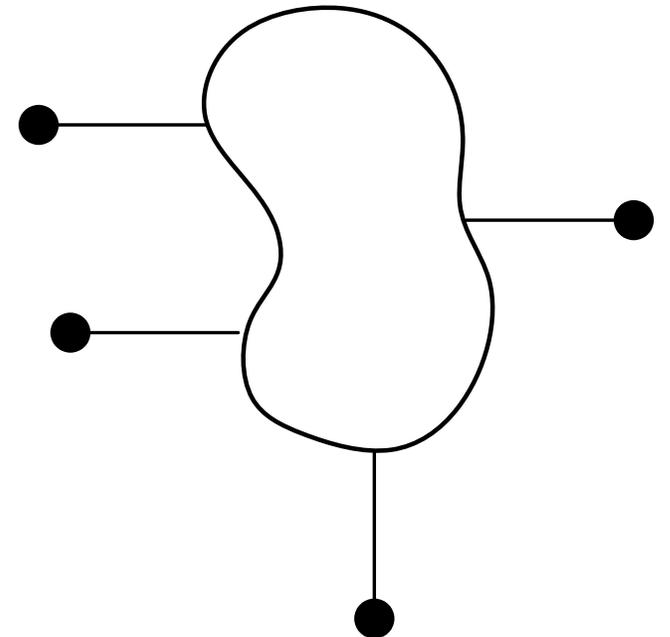


Bipolo



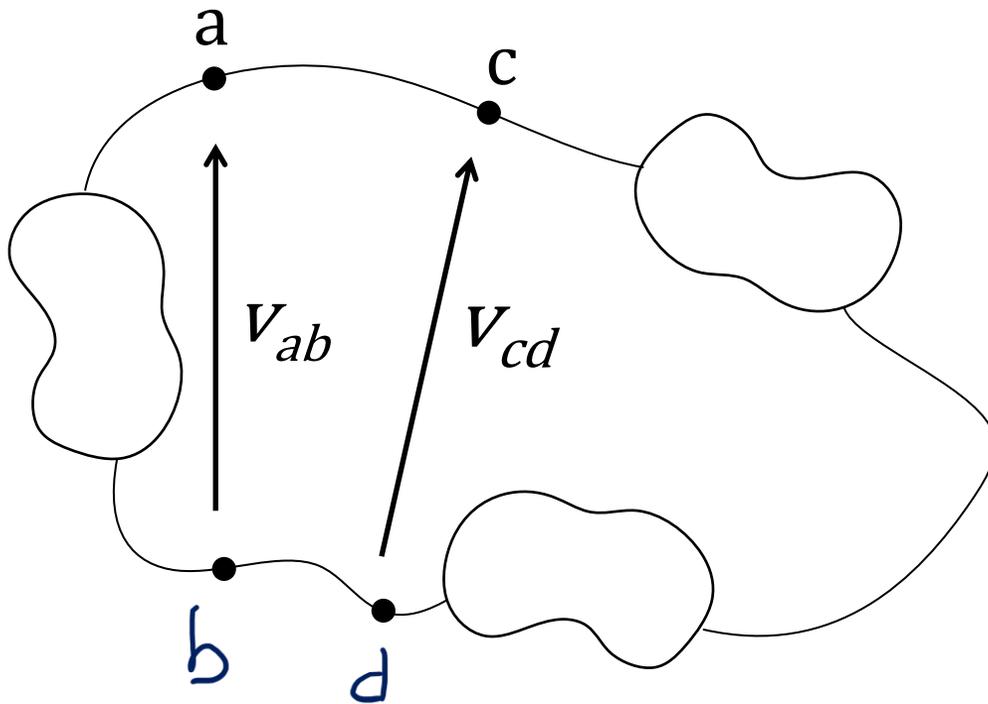
Tripolo

Quadripolo



CONDUTTORI IDEALI

Le interazioni tra i multipoli avvengono attraverso la connessione di **fili** che sono conduttori ideali cioè **equipotenziali** (ipotesi)



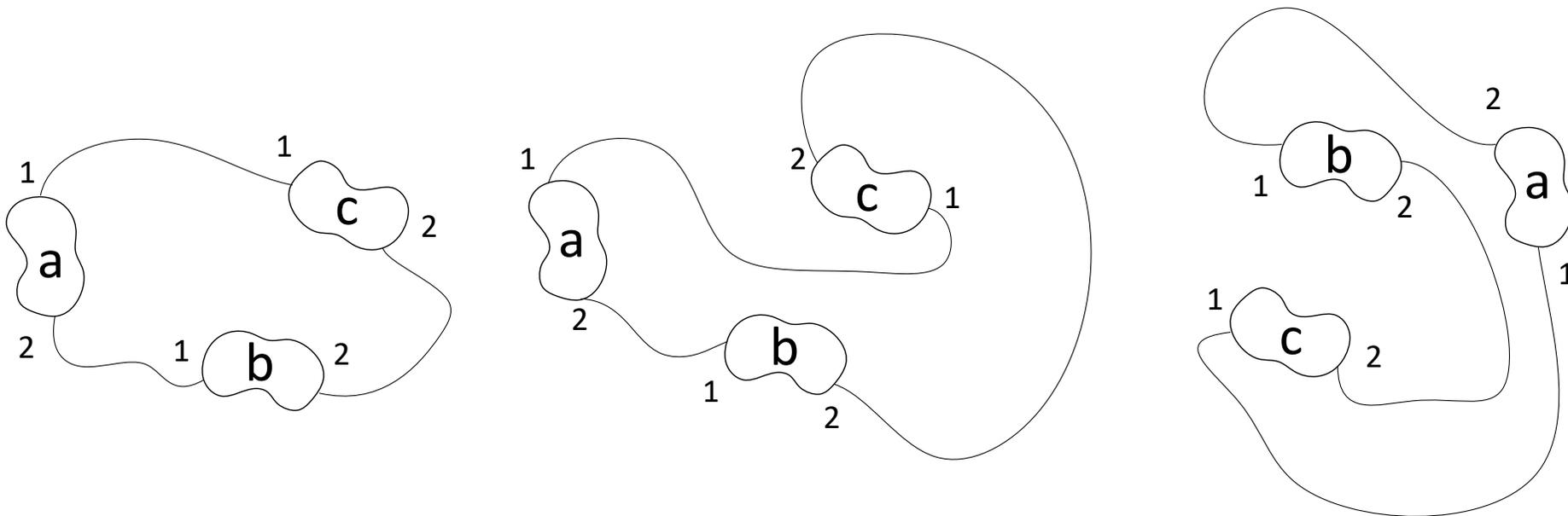
$$v_{ab} = v_{cd}$$

RETI O CIRCUITI ELETTRICI

- L'insieme di multipoli collegati attraverso i fili per mezzo dei terminali prende il nome di circuito o rete elettrica
- Poiché i collegamenti sono equipotenziali, le variazioni di energia avvengono solo all'interno dei multipoli e per questo motivo i circuiti che soddisfano tale ipotesi (assieme a quella sui tempi di transito) sono detti a parametri concentrati

TOPOLOGIA

Il modo in cui sono connessi gli elementi del circuito prende il nome di topologia



QUESTI TRE CIRCUITI HANNO LA
STESSA TOPOLOGIA!

LO STUDIO DEI CIRCUITI

- Nello studio dei circuiti gli elementi sono considerati alla stregua di **scatole nere**
- Queste sono descritte utilizzando solo le seguenti variabili esterne

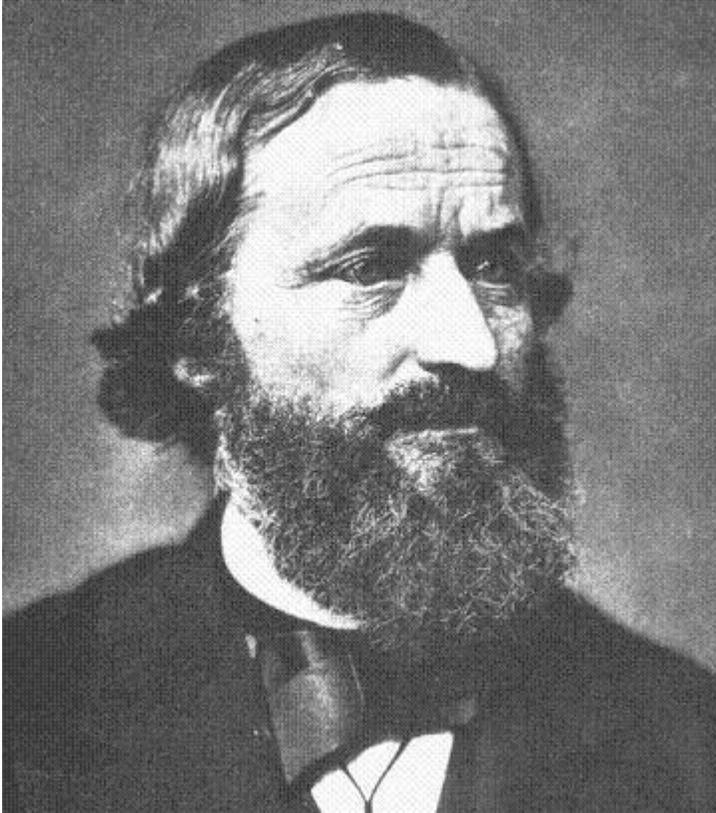
1. **Tensioni** tra coppie di morsetti

2. **Correnti** che scorrono attraverso i morsetti

LO STUDIO DEI CIRCUITI

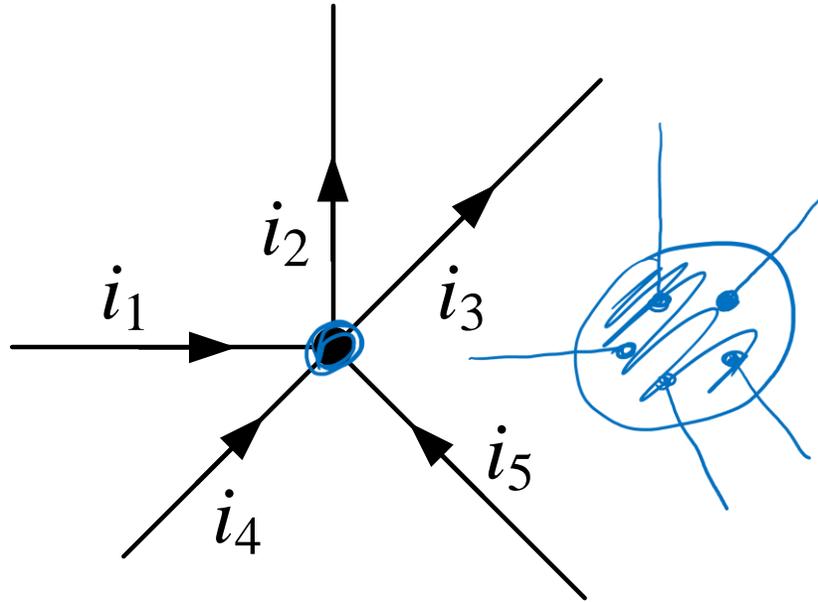
L'analisi di un circuito consiste nel ricavare tensioni e correnti a partire dalla **topologia** del circuito e dalle caratteristiche degli elementi che lo compongono, le relazioni caratteristiche

LE LEGGI DI KIRCHHOFF

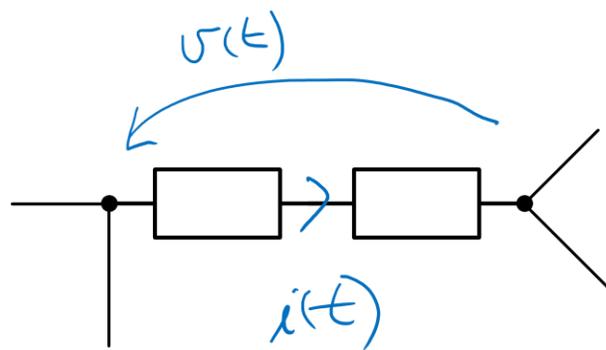


- ✓ Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887)
- ✓ Sono i due postulati fondamentali su cui si basa lo studio dei circuiti a parametri concentrati

NODI E RAMI DI UN CIRCUITO

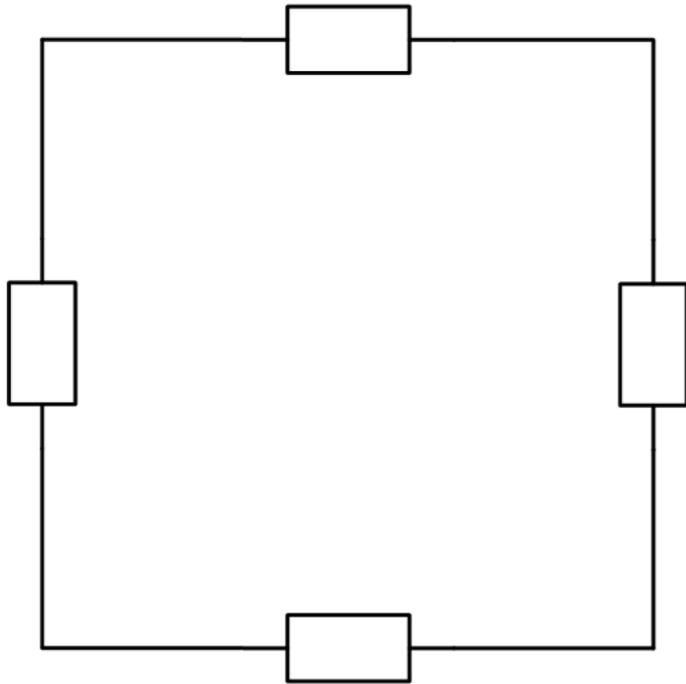


Un nodo di un circuito è un punto a cui sono connessi più di due morsetti
Un nodo è quindi il punto di collegamento tra diverse vie di passaggio per la corrente



Un ramo (o lato) di un circuito è un percorso tra due nodi
Si tratta cioè di un insieme di componenti connessi tra loro senza nodi intermedi

MAGLIA DI UN CIRCUITO



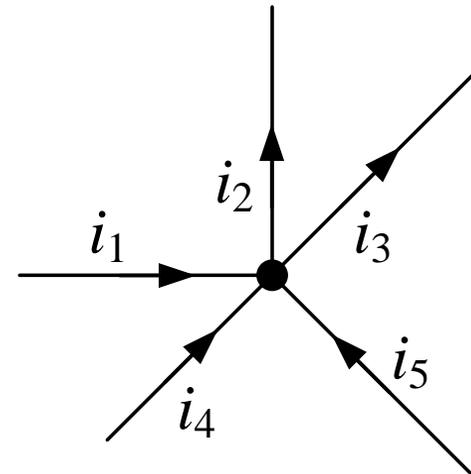
Una maglia di un circuito è un insieme di rami (lati) che formano un percorso chiuso

Una maglia può contenere al suo interno anche altre maglie

LEGGE DI KIRCHHOFF DELLE CORRENTI (LKI)

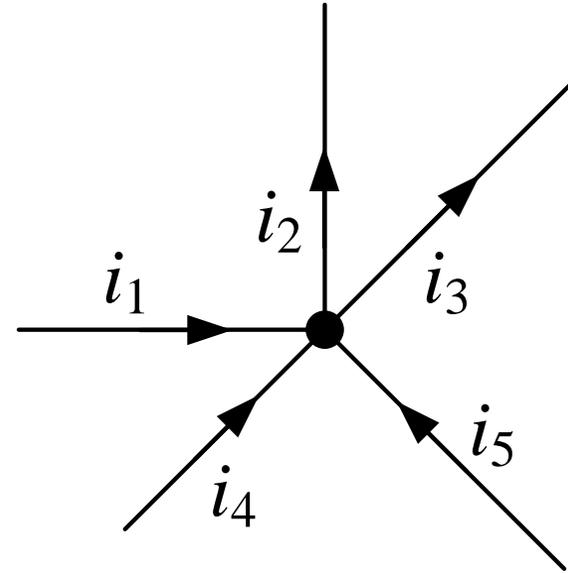
- Dall'elettromagnetismo sappiamo che considerata una superficie chiusa S , la somma algebrica delle correnti entranti è nulla
- Se consideriamo una superficie S che racchiude un solo nodo allora

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 + i_5 = 0$$



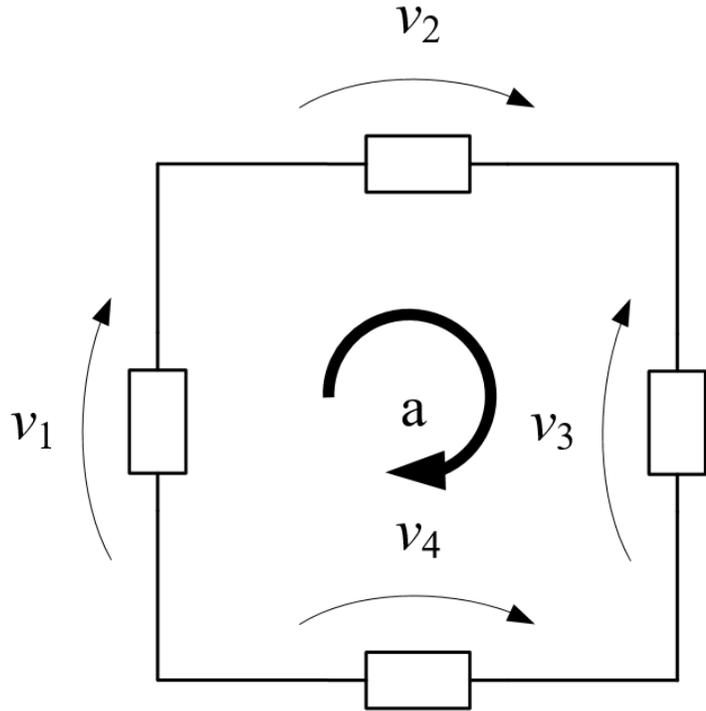
LEGGE DI KIRCHHOFF DELLE CORRENTI

$$i_1 + i_4 + i_5 = i_2 + i_3$$



$$\sum_{k=1}^n i_k(t) = 0 \quad \forall t \quad \text{LKI}$$

LEGGE DI KIRCHHOFF DELLE TENSIONI (LKV)



$$v_1 + v_2 - v_3 - v_4 = 0$$

$$\sum_{k=1}^n v_k(t) = 0 \quad \forall t \quad \text{LKV}$$

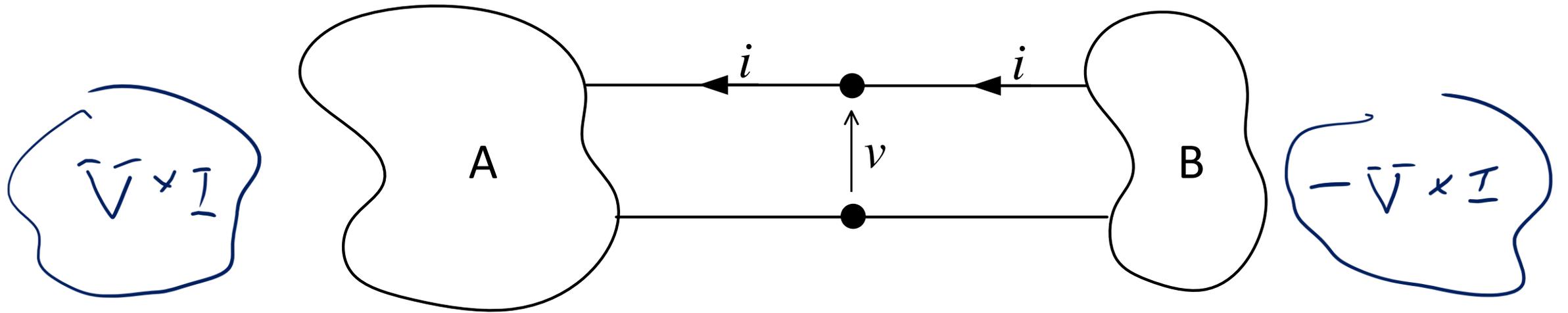
EQUAZIONI DI UN CIRCUITO

- Le equazioni che otteniamo a partire dalle Leggi di Kirchhoff dipendono dalla **topologia** del circuito e non dagli elementi che lo compongono
- Supponiamo di avere un circuito con **N -nodi** applicando **LKI** possiamo ricavare **$(N-1)$ equazioni indipendenti**
- Supponiamo che il circuito abbia **L -lati** applicando **LKV** possiamo ricavare **$(L-N+1)$ equazioni indipendenti**

EQUAZIONI DI UN CIRCUITO

- Dalla topologia del circuito otteniamo allora $[(N-1) + (L-N+1)] = L$ equazioni topologiche
- Queste non sono sufficienti a risolvere il circuito
Servono infatti
 L correnti + L tensioni = $2L$ equazioni
- Per ottenere le altre L equazioni bisogna fare ricorso alle equazioni costitutive (dette anche **relazioni caratteristiche**) degli elementi che lo compongono

CONSERVAZIONE DELLA POTENZA ISTANTANEA



$$p_A + p_B = 0 \quad \sum_{k=1}^n p_k(t) = 0 \quad \forall t$$

La somma algebrica delle potenze assorbite da tutti gli elementi di un circuito è nulla in ogni istante