

# MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

*AA 2022/23 – Lezione 5 14/03/2023*

# Argomenti della lezione di oggi

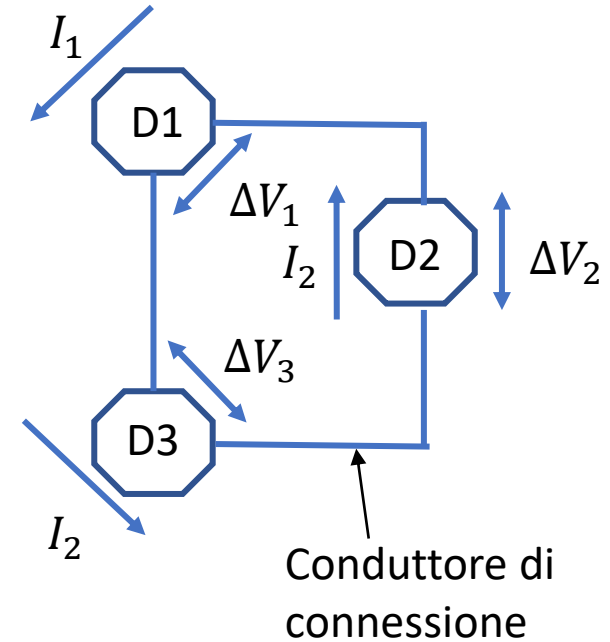
- I circuiti elettrici
  - I resistori
  - I condensatori
  - Gli alimentatori elettrici
  - La messa a terra
  - La massa
- Le leggi di Kirchhoff per i circuiti a corrente continua
  - La legge delle correnti (nodi)
  - La legge delle tensioni (maglie)

# I circuiti elettrici

Un circuito elettrico è un insieme di componenti elettriche, ognuna caratterizzata da una legge fenomenologica (**caratteristica**) che mette in relazione la differenza di potenziale (ddp)  $\Delta V$  applicata ad i suoi estremi con la corrente  $I$  che vi circola

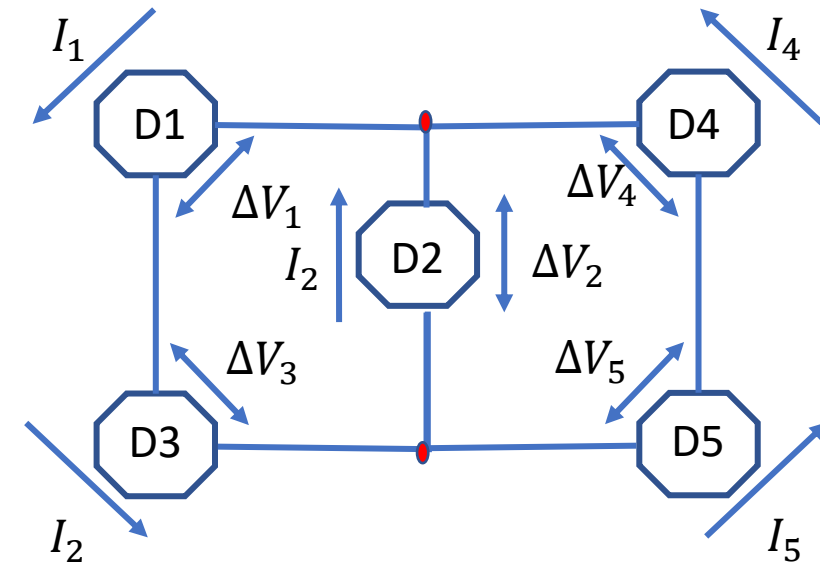
$$I = I(\Delta V)$$

I vari componenti poi sono interconnessi tra di loro mediante dei conduttori, che si suppongono di resistenza trascurabile



Il circuito rappresentato in figura è formato da delle serie di connessioni che ritornano al punto di partenza,

- Quella che attraversa i dispositivi D1, D3, D2
- Quella che attraversa i dispositivi D2, D5, D4
- Quella che attraversa i dispositivi D1, D3, D5, D4



Ognuna di queste connessioni vengono chiamate **maglie** del circuito.

I vertici da cui due maglie si separano vengono chiamati **nodi** del circuito (in figura corrispondono ai punti evidenziati in rosso)

# I resistori

Un tipo di componente di circuito elettrico l'abbiamo già incontrato: è un conduttore ohmico (cioè a resistenza costante rispetto alla ddp applicata).

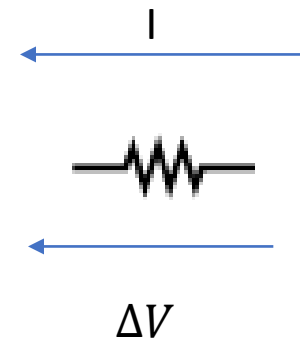
Il simbolo che viene utilizzato per rappresentare un resistore in uno schema circuitale è quello della figura accanto

La caratteristica di un resistore è la relazione

$$I = -\Delta V / R$$

ove  $R$  è la resistenza del resistore.

(il segno meno in questa relazione deriva dal fatto che la ddp  $\Delta V$  viene calcolata nello stesso verso in cui si caratterizza il verso della corrente, cioè, in figura, il potenziale del terminale a sinistra meno quello del terminale a destra. Bisogna poi ricordare che una corrente positiva fluisce da punti a potenziale maggiore a quelli a potenziale minore)



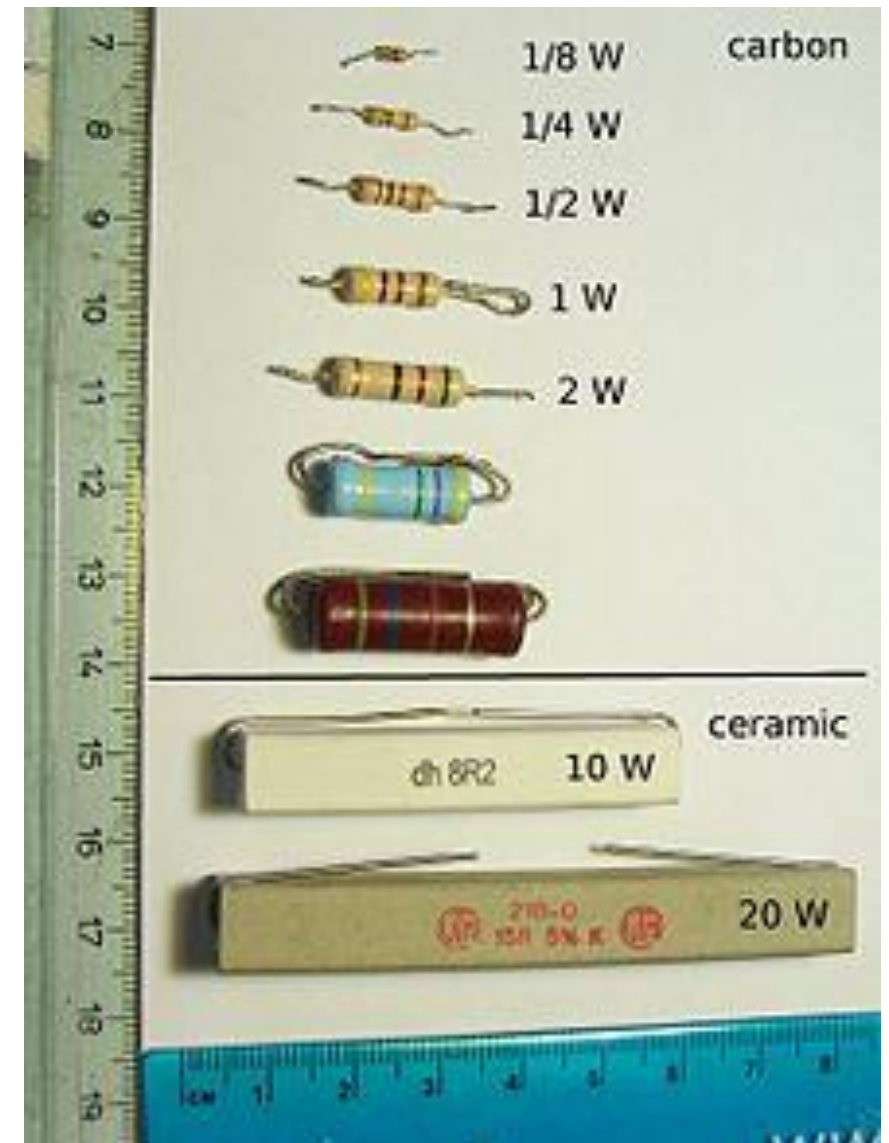
È difficile descrivere i resistori (resistenze) attualmente in commercio.

Questo perché l'unica richiesta per i prodotti commerciali è che siano

- Con valori di resistenza certificati entro un certo errore
- Con un valore di resistenza costante entro certi limiti di potenza dissipata per effetto Joule

Soddisfatti questi criteri, qualsiasi manufatto (economico) viene prodotto e commercializzato.

I resistori più comuni sono realizzati con un miscuglio di carbonio e materiali ceramici (tipicamente isolanti).



Poiché i dispositivi sono minuscoli, ci sono delle convenzioni per certificare i valori della resistenza con una stampigliatura.

Per il tipo di resistore in figura (chiamati assiale), le quattro bande colorate, da sinistra a destra, indicano

- La precisione con cui il valore di resistenza è certificato (color oro significa al 5 %)
- Quella successiva è un moltiplicatore. Il valore della resistenza, codificato dalle bande colorate successive, deve essere moltiplicato per una certa potenza di 10. Nel caso di figura, il rosso corrisponde ad un fattore 100
- Le due successive, indicano le due cifre del valore della resistenza, in ordine crescente. Nel caso di figura, nero corrisponde a 0 e marrone a 1.



Il valore di resistenza è quindi 10, che va moltiplicato per 100, cioè  $1\text{k } \Omega$

Per resistori certificati con maggiore precisione, ci possono essere codici di colore a 5 o più bande. Le bande supplementari servono a fornire le cifre aggiuntive.

Questo tipo di resistori sono tipicamente certificati fino a 0.5-1.0 Watt di potenza dissipata.

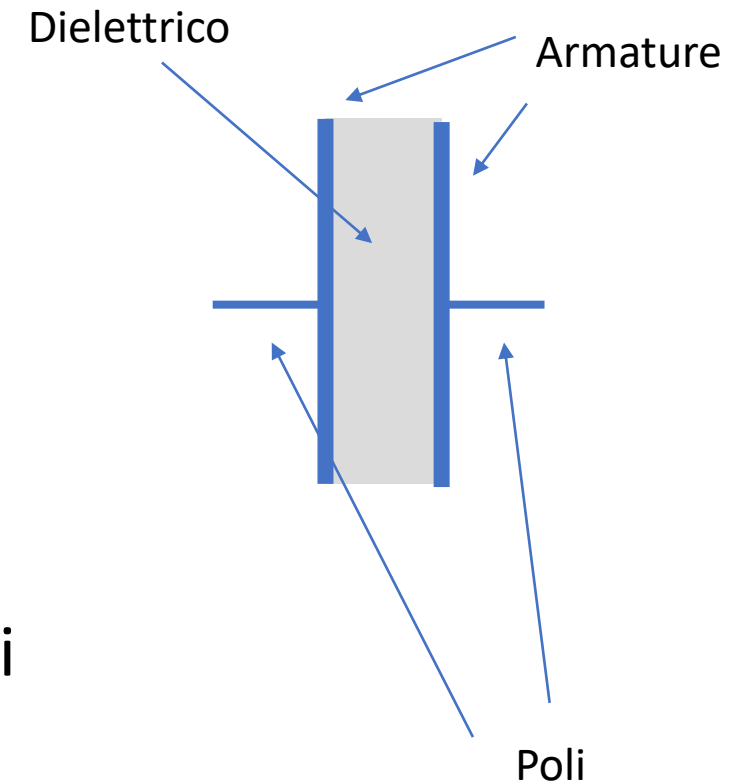
Potete trovare un calcolatore del codice di colori al link

<https://resistorcolorcodecalc.com/>

# I condensatori

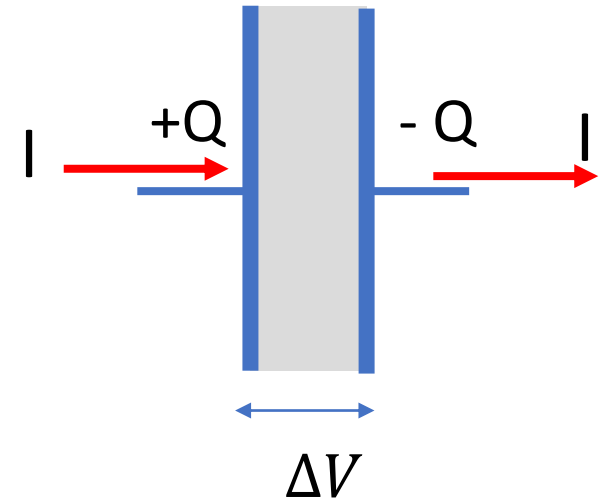
I condensatori sono dei dispositivi che possono essere schematizzati nel seguente modo

- **Due poli** esterni (o terminali), attraverso i quali può essere fatta circolare una **corrente in ingresso ad un polo ed una in uscita dall'altro**
- Due conduttori (chiamati **armature**) connessi ai poli
- Un materiale isolante (**dielettrico**) che **separa le due armature**, non permettendo il flusso di cariche da una all'altra





Di norma, quando il condensatore è inserito in un circuito, la corrente  $I$  che entra attraverso un polo è uguale a quella che esce dall'altro polo, mantenendo così nulla la carica netta complessiva nel condensatore.



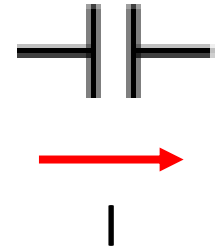
Poiché però le cariche non possono migrare da un'armatura all'altra attraverso il dielettrico, si crea una polarizzazione delle armature: una risulta carica positivamente  $+Q$ , l'altra negativamente  $-Q$ .

In tal modo si crea una ddp  $\Delta V$  tra le due armature e quindi tra i due poli. Questa ddp risulta proporzionale alla carica assoluta  $Q$  sulle armature

$$|Q| = C |\Delta V|$$

ove la costante di proporzionalità  $C$  viene chiamata capacità elettrica del condensatore. Nel Sistema Internazionale la capacità elettrica viene espressa in Coulomb / Volt, unità di misura chiamata comunemente Farad (F).

Il simbolo circuitale del condensatore è una schematizzazione delle due armature, connesse ai terminali dei poli. Consideriamo una corrente  $I$  come fluisce attraverso il dispositivo come in figura (cioè entra nel terminale di sinistra ed esce da quello di destra)



Questa corrente fa sì che la carica  $Q$  presente sull'armatura di sinistra in un intervallo di tempo  $\Delta t$  abbia una variazione positiva  $\Delta Q = I \Delta t$ , mentre quella sull'armatura di destra ha una variazione di segno opposto.

Se il condensatore era inizialmente scarico (cioè la carica sulle armature era nulla) il passaggio di corrente  $I$  crea una ddp  $\Delta V$  ai poli tale che il polo di sinistra si trova ad un potenziale maggiore di quello di destra.

Ne segue che nel verso del flusso di  $I$  la ddp è negativa e si avrà

$$I = \Delta Q / \Delta t = - C \Delta(\Delta V) / \Delta t$$

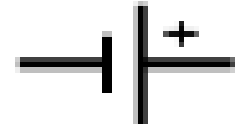
Più in generale, se la carica sulle armature all'inizio non era nulla, la precedente relazione diventa

$$I = - C [(\Delta V)_{finale} - (\Delta V)_{iniziale}] / \Delta t$$

**Cioè la corrente è proporzionale alla variazione nel tempo della ddp.**

# Gli alimentatori elettrici

Gli alimentatori elettrici sono dei dispositivi che forniscono ai circuiti a cui sono collegati una potenza elettrica, cioè una corrente circolante  $I$  con una certa ddp  $\Delta V$ .



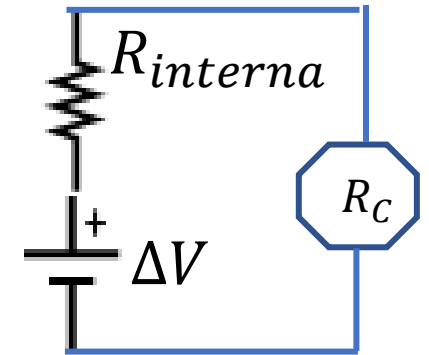
Il simbolo utilizzato per rappresentare gli alimentatori è quello di figura: è simile al simbolo del condensatore, ma con armature di dimensioni diverse, con quella maggiore associata al terminale positivo.

Per gli alimentatori si distinguono due categorie:

- Alimentatori a tensione costante
- Alimentatori a corrente costante

# Alimentatori a tensione costante

Un alimentatore a tensione costante in condizioni ideali fornisce ai suoi capi una ddp  $\Delta V$  prefissata (detta anche tensione), indipendentemente dalle caratteristiche del circuito a cui è connesso (e quindi della corrente  $I$  che circola per effetto di tale tensione).

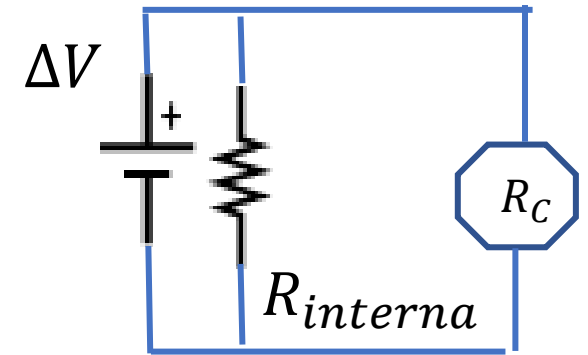


Nella realtà parte della potenza erogata viene dissipata all'interno dell'alimentatore: è come se vi fosse una **resistenza interna**  $R_{interna}$  posta in serie che riduce la tensione disponibile al resto del circuito (**resistenza di carico**  $R_C$ ) di una quantità dipendente dalla corrente circolante.

La maggior parte degli alimentatori a tensione costante hanno inoltre un dispositivo di salvaguardia, che limita ad un valore massimo prefissato la corrente erogata al circuito.

# Alimentatori a corrente costante

Un alimentatore a tensione costante in condizioni ideali fornisce ai suoi capi una corrente costante  $I$  prefissata, indipendentemente dalle caratteristiche del circuito a cui è connesso (e quindi della ddp  $\Delta V$  ai capi dell'alimentatore necessaria a far circolare tale corrente).



Anche per questo tipo di alimentatore, nella realtà parte della potenza erogata viene dissipata all'interno del dispositivo, come se vi fosse una **resistenza interna**  $R_{interna}$  posta questa volta in parallelo che riduce la corrente disponibile al resto del circuito (**resistenza di carico**  $R_C$ ) di una quantità dipendente dalla ddp applicata.

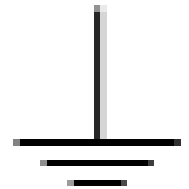
Anche per gli alimentatori a corrente costante vi è un dispositivo di salvaguardia, che limita ad un valore massimo prefissato la tensione applicata al circuito.

# La messa a terra

La messa a terra (o più semplicemente, **terra**) di un circuito è un conduttore che, attraverso la linea di alimentazione elettrica o una connessione elettrica ad hoc, è in contatto con il terreno e permette di mantenere un nodo del circuito ad un **potenziale elettrico di riferimento nullo**.

In questo caso la terra può essere considerato come un condensatore di capacità elettrica infinita, tale che qualsiasi corrente entrante o uscente non fa variare il potenziale del polo connesso al circuito.

Il simbolo rappresentante la terra in un circuito è costituito da un polo di un condensatore e l'armatura ad esso connesso, affacciato alla terra (rappresentata da linee parallele).



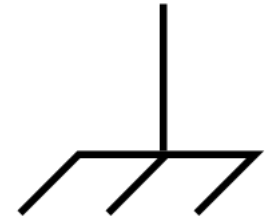
# La massa

La massa è la parte conduttrice accessibile di un dispositivo elettrico che può essere toccata durante il funzionamento ordinario e che non è in tensione nel normale funzionamento (tipicamente è connessa con il contenitore del dispositivo).

Essa costituisce anche il riferimento per i valori di potenziali elettrici all'interno del dispositivo.

Di norma la massa dovrebbe essere collegata a terra.

Il simbolo del punto di massa è rappresentato nella figura accanto.



# Le leggi di Kirchhoff per i circuiti a corrente continua

I **circuiti a corrente continua (DC)** sono circuiti in cui le condizioni di flusso delle correnti e le ddp applicate non variano nel tempo.

In tali condizioni valgono due leggi che vincolano tra di loro i valori delle correnti e delle ddp nelle varie parti del circuito.

Queste leggi possono venir giustificate sulla base della legge della conservazione della carica elettrica e della definizione di potenziale elettrico.



# La legge delle correnti (nodi)

Nel circuito illustrato in figura, consideriamo il nodo evidenziato in rosso.

In tale nodo entrano o escono correnti che fluiscono lungo tre rami del circuito, confluenti in esso:  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_4$ .

In figura,  $I_1$  risulta definita come uscente dal nodo, mentre le altre due sono entranti.

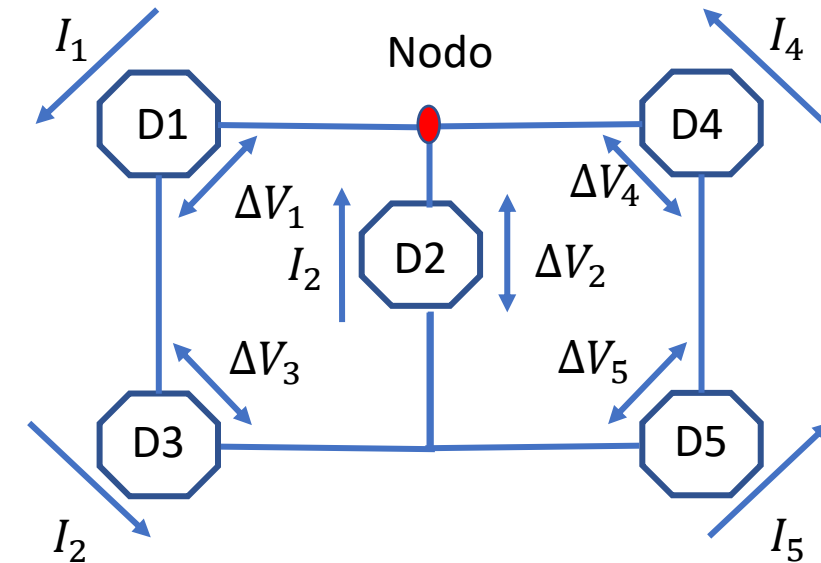
Per il teorema della conservazione della carica, la carica  $Q$  contenuta nel nodo in un intervallo di tempo  $\Delta t$  come

$$\Delta Q = (-I_1 + I_2 + I_4)\Delta t$$

Però una variazione di carica complessiva nel nodo varierebbe le condizioni del circuito, correnti e ddp varierebbero con il tempo. Deve essere quindi  $\Delta Q = 0$ , cioè

$$\sum I_i \equiv -I_1 + I_2 + I_4 = 0$$

E quindi **la somma algebrica delle correnti entranti ed uscenti da un nodo è nulla.**



# La legge delle tensioni (maglie)

Nel circuito illustrato in figura, consideriamo la maglia costituita dai dispositivi D1, D3, D2, nella sequenza evidenziata in rosso.

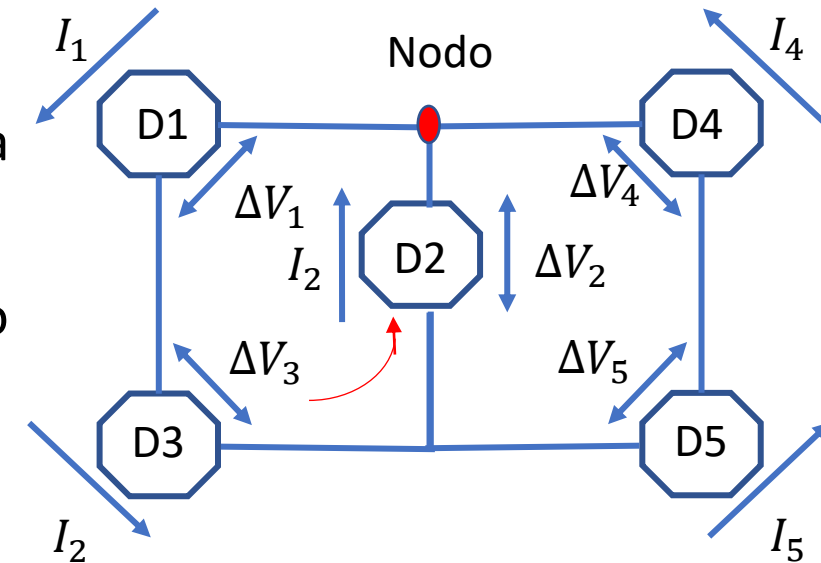
In tale maglia una carica elettrica  $Q$  positiva che circola partendo dal nodo in rosso e tornandovi dopo aver attraversato i tre dispositivi, ha incontrato successivamente le ddp  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_3$  e  $\Delta V_2$ .

Ciò significa che la carica  $Q$ , dopo essere partita dal nodo in un istante nel quale in esso il potenziale ha un certo valore  $V_{in}$ , vi ritorna avendo superato una ddp pari alla somma di quelle incontrate,  $\Delta V_1 + \Delta V_3 + \Delta V_2$ .

Ne segue che il potenziale del nodo all'istante in cui  $Q$  vi ritorna, avrà un valore  $V_{fin} = V_{in} + \Delta V_1 + \Delta V_3 + \Delta V_2$ . Però il circuito è stazionario ed in particolare i potenziali dei nodi non devono variare nel tempo: ne segue che la somma delle ddp incontrate deve essere nulla.

$$\sum \Delta V_i \equiv \Delta V_1 + \Delta V_3 + \Delta V_2 = 0$$

**Cioè la somma delle ddp incontrate circolando lungo una maglia è nulla.**



Le leggi delle correnti e delle tensioni di principio sono valide solo per circuiti strettamente a correnti e tensioni costanti.

Sono però ancora una ottima approssimazione nel caso di correnti e tensioni variabili nel tempo: la condizione per la quale tali leggi possono essere considerate valide è che le variazioni delle grandezze elettriche siano sufficientemente lente.

Questa condizione è relativamente facile da realizzare in normali circuiti elettrici. Prendiamo il caso in cui le correnti e le tensioni variano in modo periodico, con un periodo  $\Delta T$ : affinché le leggi di Kirchhoff siano applicabili è necessario che le dimensioni del circuito siano molto minori del valore  $c \Delta T$ , ove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto  $c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  (questo deriva dalla teoria di Maxwell dei fenomeni elettromagnetici).

Per un circuito delle dimensioni di circa 10. cm ciò corrisponde ad un  $\Delta T > 10^{-9} \text{ s}$ , cioè un nanosecondo.

Vediamo alcune applicazioni semplici delle leggi di Kirchhoff.

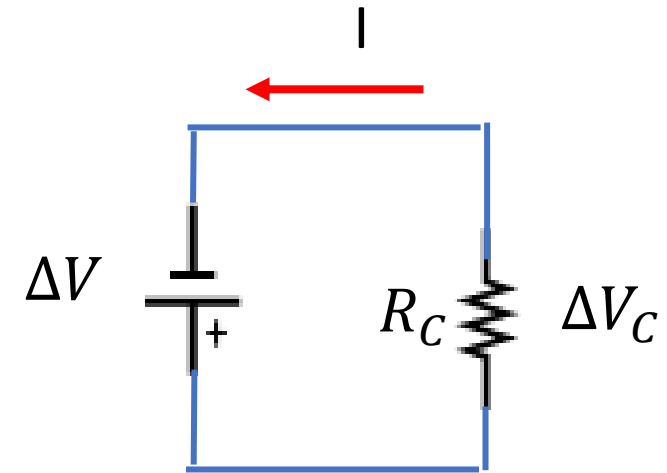
Prendiamo il caso di una resistenza  $R_C$  connessa ad un alimentatore a tensione costante ideale (privo di resistenza interna), impostato per fornire una tensione  $\Delta V$ .

Sapendo che una corrente positiva circola da un potenziale maggiore ad uno minore, nel circuito circola a partire dal polo positivo dell'alimentatore

Partendo da questo polo e procedendo in verso antiorario lungo la maglia del circuito incontreremo le ddp  $\Delta V_C$  e  $\Delta V$  (segno positivo, perché l'alimentatore viene attraversato dal polo negativo a quello positivo).

Dalla legge della tensione avremo così

$$\Delta V_C + \Delta V = 0$$



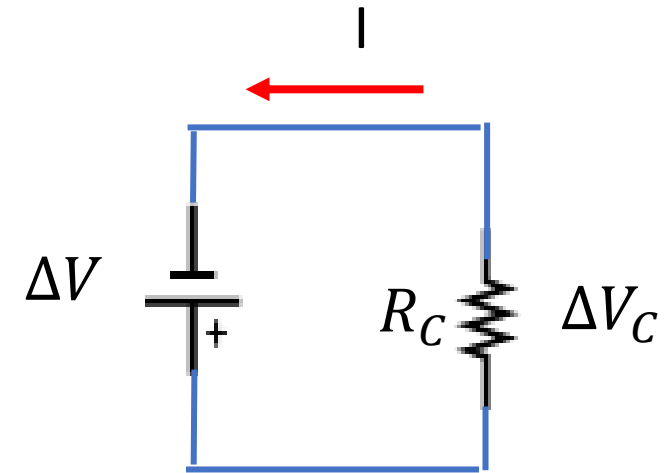
Ora consideriamo i valori della ddp nella resistenza.

Poiché attraversando un resistore nel verso della corrente circolante la ddp è negativa (  $I\Delta V_C$  è la potenza dissipata nel resistore e quindi ha valore negativo) si ha  $\Delta V_C = -R_C I$  e quindi

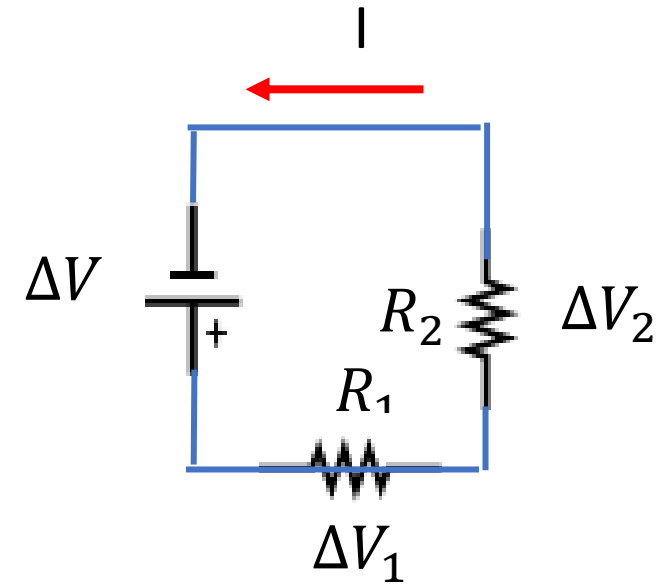
$$- I R_C + \Delta V = 0$$

Complessivamente avremo

$$I R_C = \Delta V$$



Consideriamo ora il caso di due resistenze in parallelo  $R_1$  e  $R_2$  connessa ad un alimentatore a tensione costante ideale (privo di resistenza interna), impostato per fornire una tensione  $\Delta V$ . Sapendo che una corrente positiva circola da un potenziale maggiore ad uno minore, nel circuito circola a partire dal polo positivo dell'alimentatore



Partendo da questo polo e procedendo in verso antiorario lungo la maglia del circuito incontreremo le ddp  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  e  $\Delta V$  (segno positivo, perché l'alimentatore viene attraversato dal polo negativo a quello positivo).

Dalla legge della tensione avremo così

$$\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V = 0$$

$$\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V = 0$$

Ora consideriamo i valori delle due ddp nelle resistenze.

Poiché attraversando un resistore nel verso della corrente circolante la ddp è negativa (  $I \Delta V$  è la potenza dissipata nel resistore e quindi ha valore negativo) si ha  $\Delta V = -R I$  e quindi

$$- I R_1 - I R_2 + \Delta V = 0$$

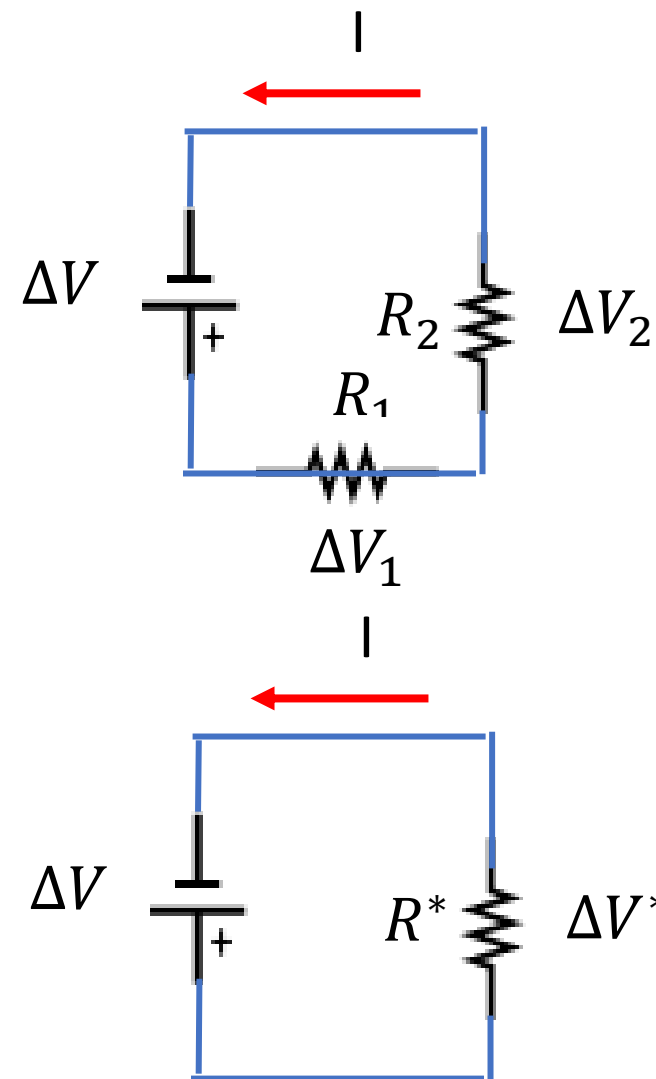
Complessivamente avremo

$$I(R_1 + R_2) = \Delta V$$

Il circuito insomma si comporta come se ci fosse una sola resistenza di carico  $R^*$  pari a

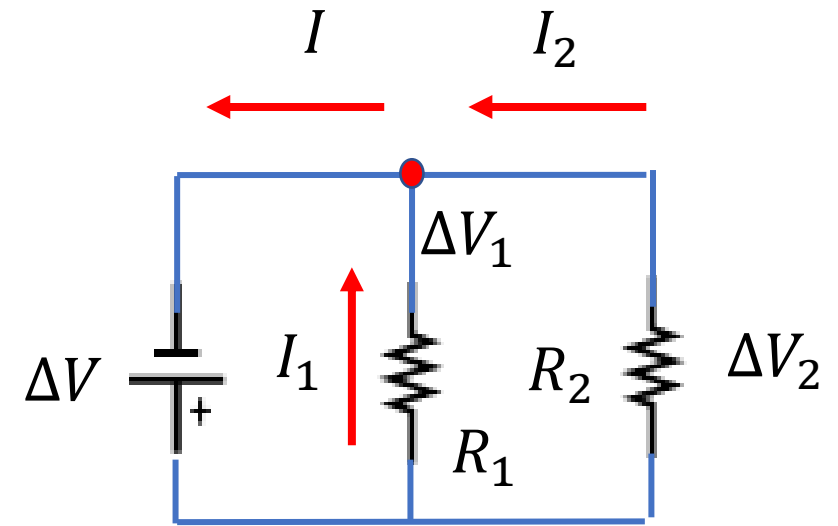
$$R^* = R_1 + R_2$$

**(composizione di resistenze in serie)**  $R^*$  viene chiamata resistenza equivalente.



Prendiamo il caso di due resistenze  $R_1$  e  $R_2$  connesse in parallelo ad un alimentatore a tensione costante, impostato per fornire una tensione  $\Delta V$ .

Sapendo che una corrente positiva circola da un potenziale maggiore ad uno minore, nel circuito circola a partire dal polo positivo dell'alimentatore



In questo caso dobbiamo considerare tre correnti, entranti o uscenti al nodo evidenziato in rosso nel circuito. Per la legge della corrente avremo

$$I_1 - I + I_2 = 0$$



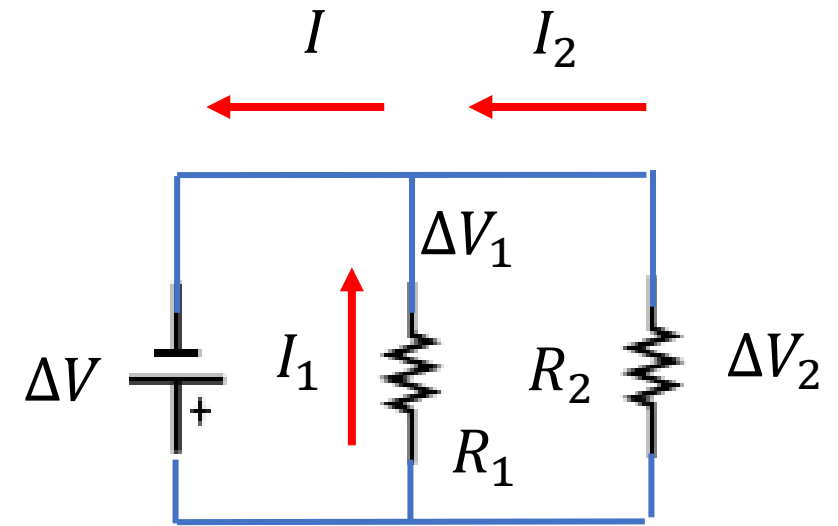
Applichiamo ora la legge della tensione a due delle maglie che formano il circuito.

La prima, partendo dal polo positivo dell'alimentatore, passando per la resistenza  $R_2$  e ritornando al punto di partenza attraverso l'alimentatore

$$\Delta V_2 + \Delta V = 0$$

La seconda, partendo sempre dal polo positivo dell'alimentatore, passando per la resistenza  $R_1$  e ritornando al punto di partenza attraverso l'alimentatore

$$\Delta V_1 + \Delta V = 0$$

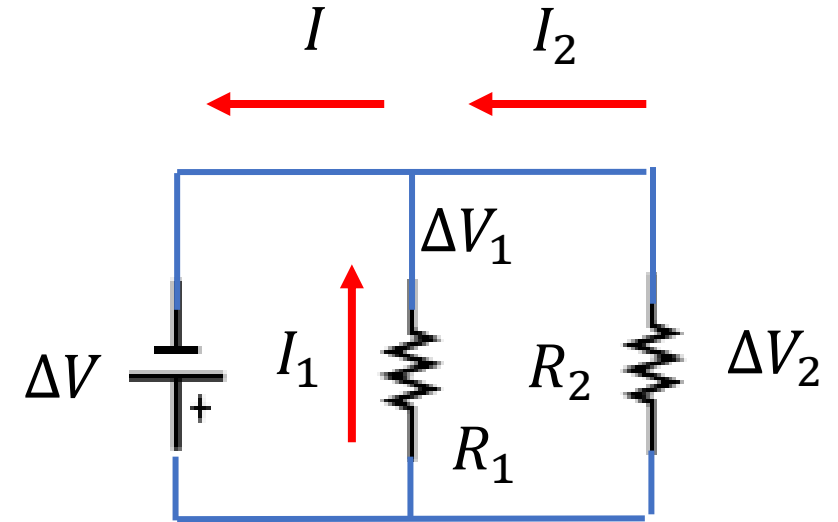


Mettiamo assieme le tre relazioni

$$\begin{cases} I_1 - I + I_2 = 0 \\ \Delta V_1 + \Delta V = 0 \\ \Delta V_2 + \Delta V = 0 \end{cases}$$

con le relazioni corrente-tensione per le due resistenze

$$\begin{cases} \Delta V_2 = -R_2 I_2 \\ \Delta V_1 = -R_1 I_1 \end{cases}$$



Con po' di passaggi matematici non complicati otteniamo

$$\begin{aligned} \left(-\frac{\Delta V_1}{R_1}\right) - I + \left(-\frac{\Delta V_2}{R_2}\right) &= 0 \\ \left(\frac{\Delta V}{R_1}\right) - I + \left(\frac{\Delta V}{R_2}\right) &= 0 \end{aligned}$$

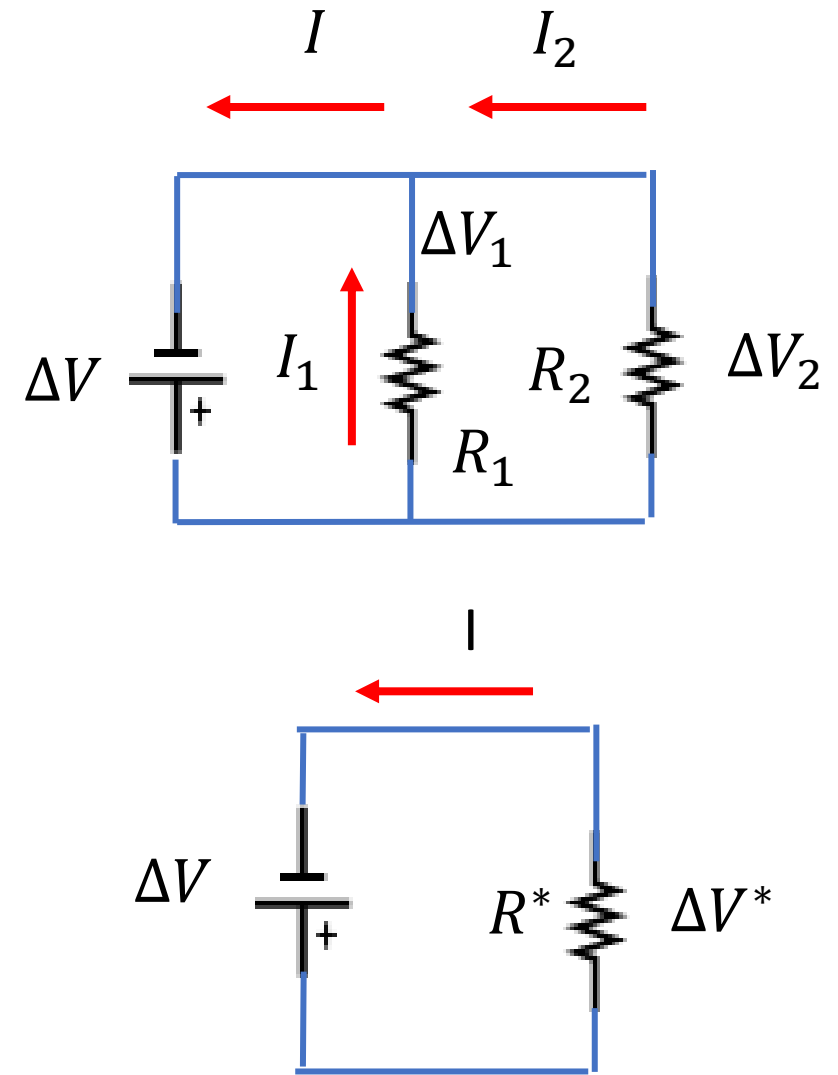
E quindi

$$\Delta V = I \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Ancora una volta il circuito si comporta come se ci fosse una sola resistenza di valore  $R^*$  dato da

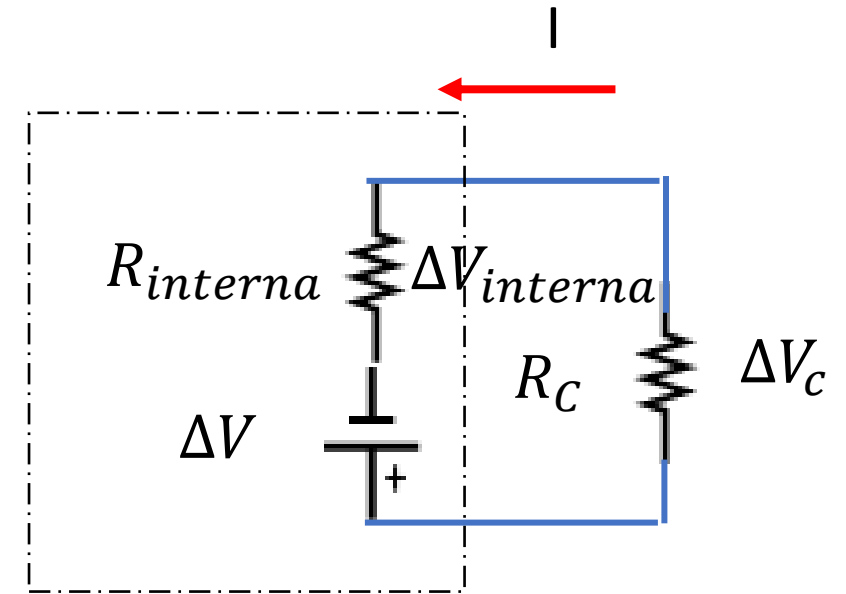
$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

(legge di composizione delle resistenze in parallelo)



Le regole di composizione delle resistenze possono essere utilizzate per analizzare degli alimentatori non ideali (cioè dotati di resistenza interna  $R_{interna}$ ).

Consideriamo il caso in cui una resistenza di carico  $R_C$  connessa ad un alimentatore a tensione costante, impostato per fornire una tensione  $\Delta V$ . La resistenza interna dell'alimentatore deve essere pensata connessa in serie ad esso.



Realizziamo così un circuito con due resistenze in serie, la cui resistenza equivalente è

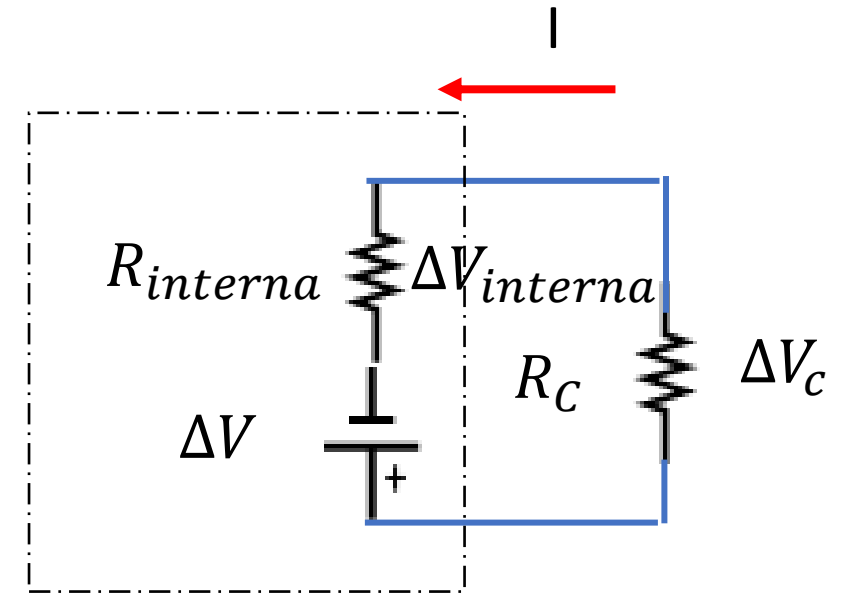
$$R^* = R_{interna} + R_C$$

La corrente circolante  $I$  risulta essere così

$$I R^* = I (R_{interna} + R_C) = \Delta V$$

Se consideriamo la ddp  $\Delta V_C$  avremo

$$\Delta V_C = -IR_C = -\Delta V \frac{R_C}{R_{interna} + R_C} =$$
$$-\Delta V \frac{1}{1 + R_{interna}/R_C}$$



Cioè l'effetto della resistenza interna è quello di diminuire la tensione effettivamente erogata, in misura tanto maggiore quanto è maggiore il rapporto  $R_{interna}/R_C$ .

Prendiamo il caso di una resistenza di carico  $R_C$  connessa ad un alimentatore a corrente costante, impostato per fornire una corrente  $I$ . Supponiamo che l'alimentatore abbia una resistenza interna  $R_{interna}$  (questa volta in parallelo all'alimentatore).

Abbiamo ora un circuito con due resistenze poste in parallelo, di resistenza equivalente

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_{interna}} + \frac{1}{R_C}$$

La tensione  $\Delta V$  risulta così (ricordiamo che  $I$  è fissata)

$$\Delta V = R^* I$$

E la corrente sulla resistenza di carico risulta

$$I_2 = - \Delta V_C / R_C = \Delta V / R_C = I \frac{R^*}{R_C} = I \frac{1}{1 + R_C / R_{interna}}$$

Cioè l'effetto della resistenza interna è quello di diminuire la corrente effettivamente erogata, in misura tanto maggiore quanto è maggiore il rapporto  $R_C / R_{interna}$ .

