

UNIVERSITÀ STATALE DEGLI STUDI DI  
MILANO

APPUNTI IN CLASSE

---

# Laboratorio di Elettronica

---

*Autore*

Leonardo ALCHIERI

25 giugno 2018





# Indice

<b>Prefazione</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 12/03/2018 . . . . .	1
<b>2 Teoremi delle reti elettriche</b>	<b>7</b>
2.1 13/03/2018 . . . . .	7
2.1.1 Principi di Kirchhoff . . . . .	7
2.2 19/03/2018 . . . . .	8
2.3 20/03/2018 . . . . .	10
2.4 9/04/2018 . . . . .	12
<b>3 Semiconduttori</b>	<b>15</b>
3.1 7/05/2018 . . . . .	15
3.2 8/05/2018 . . . . .	16
<b>4 Esperienze di Laboratorio</b>	<b>17</b>
4.0.1 Prima esperienza . . . . .	17
4.0.2 Seconda esperienza - 09/04/2018 . . . . .	18
4.1 Quinta esperienza - simulazione di un diodo . . . . .	18



# Prefazione

Il corso è strutturato con ore di lezione prima di andare in laboratorio - sono 4h a giorno. È tutto strutturato affinché i laboratori non si potraggano oltre la giornata.

Per queste esperienze sono richieste delle relazioni di gruppo - ne dovremo poi scegliere 2 su una decina. La consegna delle relazioni è vincolante per acquisire il voto.

L'esame è una prova orale: in linea di massima il professore fissa delle date, diverse da quelle del SIFA; ci si iscrive dunque su appuntamento. Quindi l'appello del SIFA non c'entra niente con la data dell'orale: serve solo per verbalizzare.

Il voto finale sarà la media dei primi due voti arrotondata per eccesso.

Sul sito ARIEL è presente materiale didattico, appunti e altro; avvisare nel caso che non funzioni.

26-27 Marzo le lezioni sono sospese: il prof è a Ginevra - a raccogliere margherite.



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 12/03/2018

L'elettronica studia il funzionamento dei circuiti elettrici ed elettronici, che si incontrano cotidiaie. Nella sua accezione più semplice, un circuito è formato da un **generatore** e da un **utilizzatore**.

Eseguiamo una piccola semplificazione iniziale: le grandezze che andremo a studiare saranno **invarianti rispetto al tempo**.

La prima grandezza che andremo a studiare sarà la **differenza di potenziale**: dati due punti in un campo elettrico, ipotizzando che esso sia conservativo, essa dipenderà solo dalla posizione iniziale e finale. L'unità di misura è il **Volt**.

Lo strumento per la misura della differenza di potenziale, o tensione, è noto come **voltmetro**, rappresentato come in figura:



L'altra grandezza che è misurabile facilmente è la **corrente elettrica**. Dato un conduttore, per esempio un cavo di rame; prendendone una sezione, si "conta" quante cariche passano in tale sezione in un certo istante di tempo  $\Delta t$ . Nelle condizioni normali, le correnti all'interno di un conduttore saranno uguali per tutte le sezioni.

Anche in questo caso si deve aver a disposizione uno strumento per misurare la corrente, noto come **Amperometro**.

La misura della corrente nei due amperometri in figura dovrebbe essere la stessa, se il sistema fosse ideale - come spesso conviene approssimare.

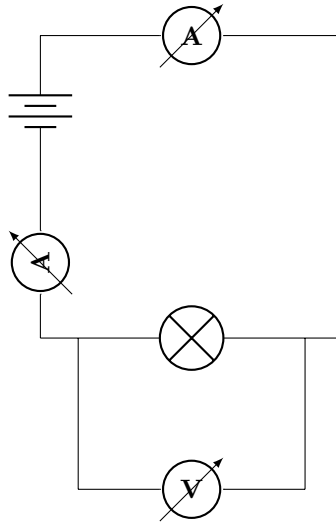
Spesso, una grandezza utile da misurare nei circuiti è la **potenza**. Come abbiamo detto, poiché preliminarmente consideriamo che la variabili siano tutte costanti nel tempo, il suo calcolo "coincide" con una misura dell'energia del sistema. Dunque, la potenza sarà data da:

$$P = VI$$

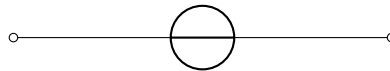
Dunque, con la strumentazione a disposizione in 1.1. Da un punto di vista pratico si utilizza il **wattmetro**, strumento che misura tensione e corrente contemporaneamente: è quindi a 4 morsetti.



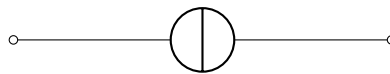
Vediamo un semplice circuito:



In un circuito è spesso presente un **generatore ideale di tensione**



Esistono inoltre generatori che mantengono costante la corrente - e non la tensione:



In un dipolo può inoltre essere presente una **resistenza**, dove vi è dissipazione di calore. Questo avviene in una modalità chiamata **legame costitutivo**, cioè secondo la relazione:

$$V = RI$$

Si mostra un **resistore**, cioè un bipolo con una resistenza. Esso, idealmente, è costante nel tempo.



Dalla prima legge di Ohm si ha inoltre che la corrente è positiva quando la tensione è positiva, e viceversa.

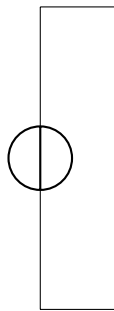


Per calcolare la potenza, utilizzando la relazione della resistenza, si ha:

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2 R$$

quindi, dato un resistore costante, questo **dissiparerà** sempre la stessa quantità di energia - sotto forma di calore.

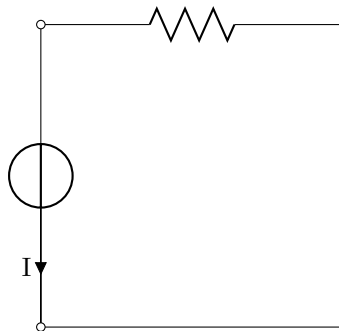
Se la potenza del generatore è positiva,  $P > 0$ , si dice che essa è **erogata**; viceversa si dice che è **assorbita**.



Il fatto che si chiami *generatore di corrente* non significa che non abbia una tensione ai capi!



Vediamo un semplice circuito:



Sia  $V$  la tensione fornita dal generatore, e nel circuito passa una corrente  $I_e$ . La tensione ai capi del resistore sarà la stessa fornita.

Vediamo nel caso di 2 resistore, collegati in differenti modi:

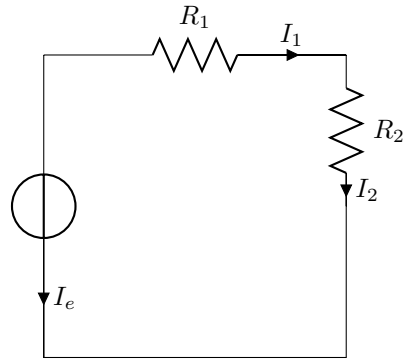
La corrente in 1.1 sarà la stessa su tutti e due i resitori:  $I_e = I_1 = I_2$ . Le tensioni saranno:

$$V_{R_1} = R_1 \cdot I_1$$

$$V_{R_2} = R_2 \cdot I_2$$

Considerando il cammino chiuso - sostanzialmente come se non ci fosse il generatore - deve valere:

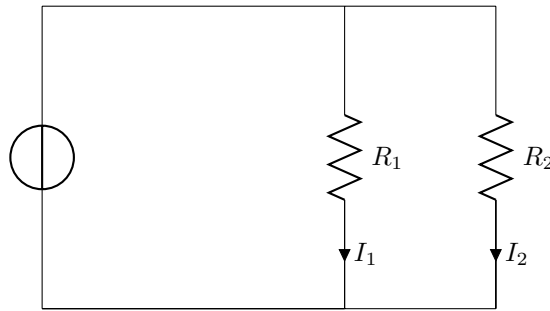
$$V - V_{R_1} - V_{R_2} = 0$$



Si ottiene quindi:

$$V = (R_1 + R_2)I_e$$

SI possono però collegare i dipolo anche in modo diverso, per esempio:



Utilizzando il principio dei nodi, si possono scrivere sui due nodi - si ricordi che i segni sono dati dal verso in cui gira la corrente:

$$V - V_{R_1} = 0$$

$$V_{R_1} - V_{R_2} = 0$$

Le correnti sono:

$$I_1 = \frac{V}{R_1}$$

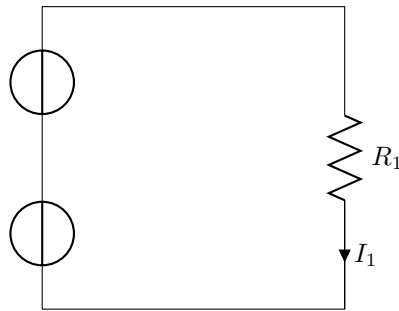
$$I_2 = \frac{V}{R_2}$$

Forse sarebbe stato meglio, al posto di prendere come secondo percorso quello corto, era più facile prendere tutto il sistema completo, in modo tale da ottenere  $V - V_{R_2} = 0$ , che permette di ottenere lo stesso risultato.

Due resistori si dicono **in serie** quando sono sottoposti alla stessa corrente.

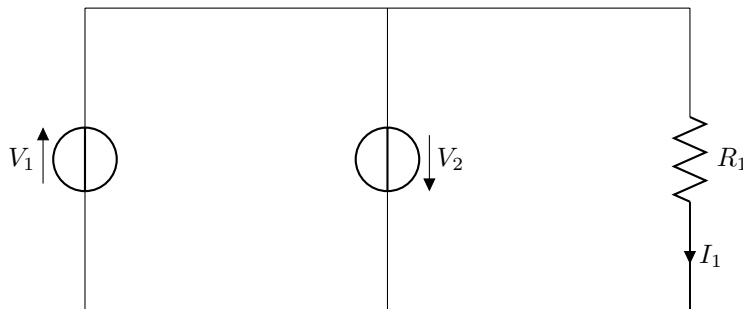
Due resistori si dicono **in parallelo** quando posseggono la stessa tensione.

Negli esempi qua mostrati, sono in serie nella figura 1.1 mentre in parallelo nella figura 1.1. Mostriamo un altro esempio:



In questo caso, sono i generatori ad essere in serie. Questo sistema non si può realizzare a meno che le due correnti non siano uguali - idealmente, infatti, ogni generatore produce una tensione prefissata.

Oppure ancora:



Da un punto di vista ideale, i due generatori di tensione non possono essere messi in parallelo: infatti, in tale situazione, i due generatori produrrebbero ognuno la propria tensione; ma se queste fossero diverse, il problema sarebbe impossibile da risolvere - per definizione, un generatore ideale produce una fissata tensione.

Si ottiene quindi, da questi ragionamenti, la **formula del partitore di tensione**:

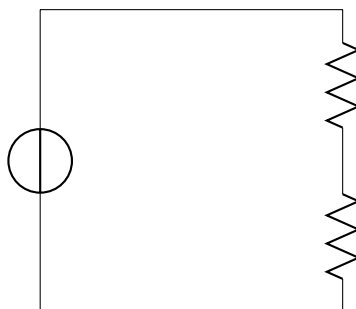
$$V_{R_i} = \frac{V}{\sum_{j=1}^N R_j} \cdot R_i$$

Analogamente, per la corrente, si può trovare una simile formula, detta **formula del partitore di corrente**:

$$I_i = \frac{I_e}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j}} \cdot \frac{1}{R_i}$$

Attenzione: una volta scelte le convenzioni all'interno di un sistema, queste devono rimanere fisse - aka non barare sui dati. Non importa quale convenzione si vada ad utilizzare: basta che rimanga costante.

Uno dei primi casi da analizzare in laboratorio sarà come il seguente:



Nella realtà, se si misurasse tramite un voltmetro la tensione presente sulle due resistenze e quella fornita dal generatore, non verrà mai 0, in quanto la misura sarà sempre affetta da errore sperimentale.

## Capitolo 2

# Teoremi delle reti elettriche

### 2.1 13/03/2018

Una rete elettrica è un insieme di dipoli - resistori, generatori di tensione e generatori di corrente. Questi 3 dipoli sono anche detti **dipoli lineare**, poiché il loro legame costitutivo è lineare.

Vediamo il metodo più generale per lo studio delle reti elettriche, che richiede un maggior lavoro da un punto di vista matematico ma risulta estremamente semplice da applicare. Tramite poi i teoremi delle reti, di maggior complessità concettuale, risultano molto più veloci e facili da eseguire da un punto di vista matematico.

#### 2.1.1 Principi di Kirchhoff

Formalizziamo le due leggi sulle correnti e sulle tensioni.

**Teorema 2.1.1.** *Prima Legge di Kirchhoff per le correnti In una maglia chiusa, la somma delle correnti è nulla.*

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0$$

È difatti il principio di conservazione della carica adattato alle nostre esigenze.

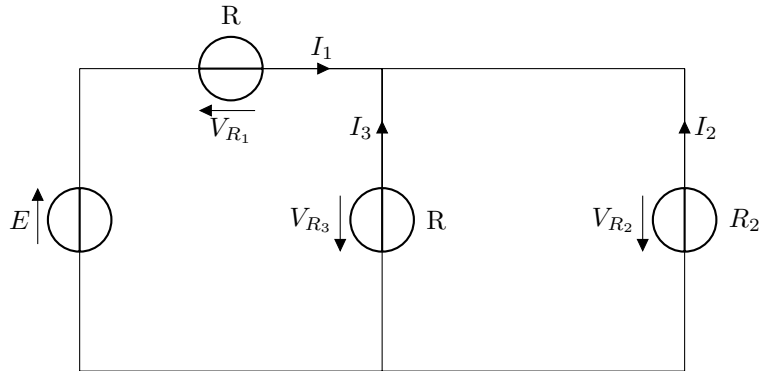
**Teorema 2.1.2.** *Seconda legge di Kirchhoff per le tensioni Preso un qualsiasi cammino chiuso, la somma di tutte le tensioni presenti è nulla.*

$$\sum_{i=1}^N V_i = 0$$

Vediamo alcune situazioni da un punto di vista pratico:  
Per questa rete elettrica siamo in grado di scrivere due KCL.

$$-V_{R_1} + V_{R_2} = 0$$

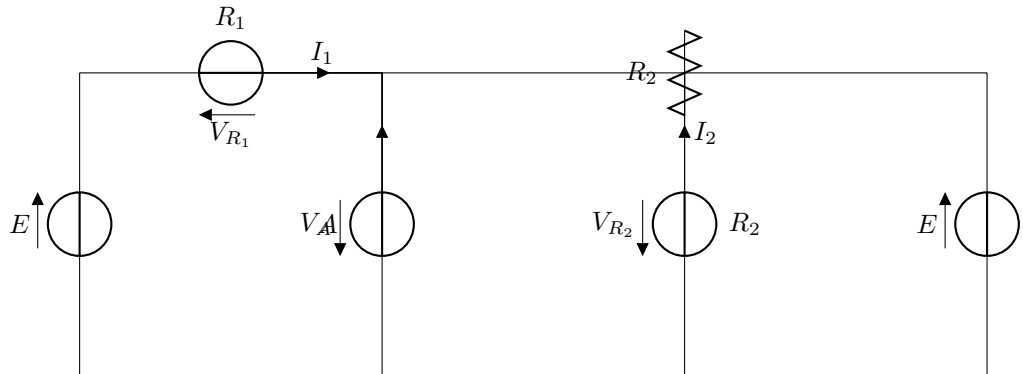
Scriviamo le incognite per la KVL:  $I_1, V_{R_1}, I_2, V_{R_2}, I_2, V_{R_2}$ .



Data una rete elettrica, si chiamano **nodi** dei punti di ramificazione dove confluiscono tre o più punti. Si chiamano quindi **lati** i percorsi che uniscono uno o più nodi. Quindi il metodo consiste nella seguente procedura:

1. Contare i nodi.
2. Contare i lati.
3. Stabilire quante equazioni ai nodi indipendenti sono scrivibili, cioè KCL e KVL.
4. Le equazioni rimanenti sono i legami costitutivi, cioè  $V = RI$ .

Un'altra situazione potrebbe essere:



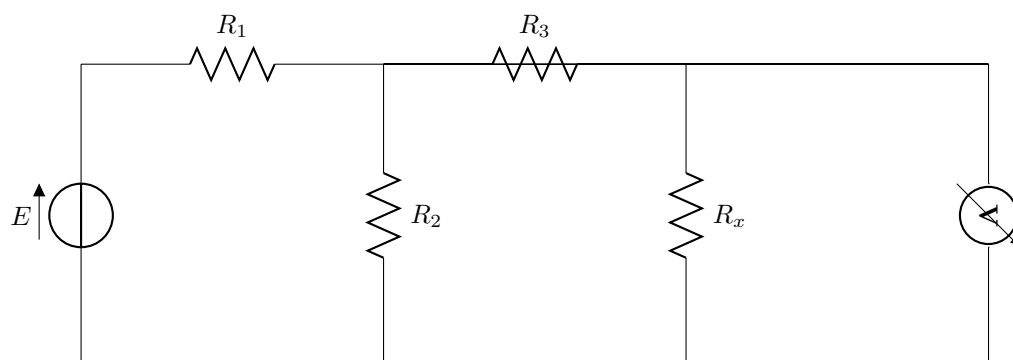
Un volta eseguiti tutti i calcoli, per verificare che si sia eseguito tutto correttamente, si può fare il **bilancio energetico della rete**, o meglio tramite il calcolo delle potenze in regime stazionario.

**Teorema 2.1.3** (principio di sovrapposizione delle cause e degli effetti). *In un circuito lineare, con più generatori, posso considerare i circuiti in cui accendo solo un generatore alla volta; sommo poi i risultati dei singoli per ottenere il risultato del circuito con tutti accesi.*

## 2.2 19/03/2018

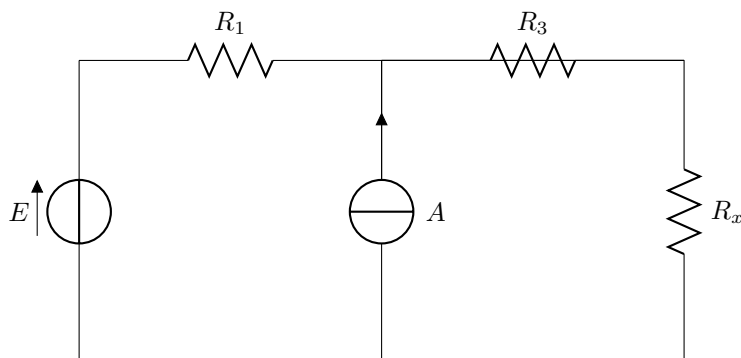
**Teorema 2.2.1** (di Thevelin). *Preso una rete elettrica qualsiasi, è possibile staccare un dipolo interessato dal resto della rete, studiare il resto della rete e ridurla a un dipolo equivalente formato da un resistore equivalente  $R_{eq}$  e un generatore equivalente  $E_{eq}$ . Si passa quindi dalla rete iniziale a un **circuito equivalente di Tevenin**.*

Vediamo un esempio



Usando Tevenin, si ha che  $R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$ , poiché  $R_1$  e  $R_2$  sono in parallelo, mentre  $R_3$  è posto in serie. Si giunge facilmente considerando le resistenze in serie e in parallelo. Quindi, dal Teorema di Tevenin, posso pensare che per calcolare la  $V_x$  di utilizzare il circuito equivalente, con  $E_{eq} = \frac{E}{R_1 + R_2} R_2$ .

Vediamo con un altro esempio:



Tutta la corrente del generatore  $A$ , quando si scollega la  $R_x$ , rimane nella prima maglia. Quindi  $E_{eq} = E + R_1 A$  - si ricordi che la differenza di potenziale su una resistenza "contrastava" sempre la direzione delle correnti. Il resistore equivalente, poiché in serie, si avrà  $R_{eq} = R_1 + R_2$ .

Esiste un altro teorema duale,

**Teorema 2.2.2** (di Norton). *Preso una rete elettrica qualsiasi, è possibile staccare un dipolo interessato dal resto della rete, studiare il resto della rete e ridurla*

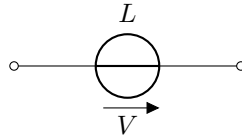
a un dipolo equivalente formato da un resistore equivalente  $R_{eq}$  e un generatore equivalente  $A_{eq}$ . In questo caso, a differenza di Tevenin, rimane la stessa resistenza equivalente; mentre si considera un generatore di corrente, trovata mettendo la parte di circuito richiesta in "cortocircuito" e calcolando in questo modo.

## 2.3 20/03/2018

Introduciamo 3 altri diversi dipoli:



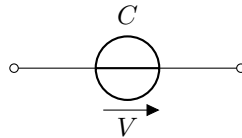
Questo dipolo rappresenta un **interruttore**: la differenza di potenziale dipende dal circuito, ed esso **non dissipa potenza**. Il suo compito è quello di modificare la rete in cui sia inserito. Ogni volta che cambia lo stato dell'interruttore, cambia lo stato della rete elettrica: si hanno due circuiti completamente diversi.



Questo dipolo è noto come **induttore**

Si noti che si usano lettere **maiuscole** se le grandezze sono **stazionarie**. Nel caso invece le grandezze dipendano dal tempo, cioè non sono stazionarie, si indicano invece con le lettere **minuscole**. Per quanto riguarda l'induttore, il legame costitutivo dipende dal tempo:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$



Questo dipolo è invece noto come condensatore - o capacitore - e il suo legame costitutivo è:

$$i(t) = c \frac{dv(t)}{dt}$$

Anche nel caso di sistemi elettrici in cui siano presenti dipoli di questo tipo, vale sempre l'equazione di Kirchhoff alle maglie.

Vediamo un banale circuito RC, come mostrato in figura 2.3. A circuito chiuso, vale ancora la legge delle maglie di Kirchhoff, quindi si ha:

$$E - Ri_c(t) - v_c(t) = 0$$

ricordando l'equazione del legame costitutivo del capacitore, segue:

$$E - RC \frac{dv_c}{dt} - v_c = 0$$



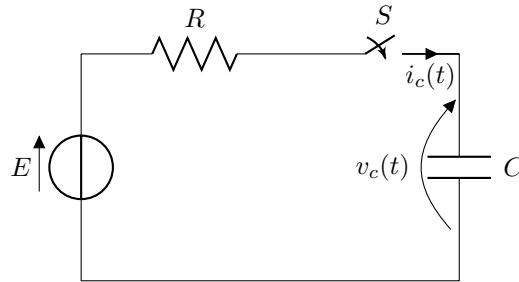


Figura 2.1: circuito RC

Spesso, per comodità di scrittura, il prodotto  $RC$  viene chiamato **costante di tempo** del sistema e indicato come:

$$\tau = RC$$

Risolvendo l'equazione differenziale, con equazione al contorno  $v_c(0) = 0$ , si ottiene:

$$v_c(t) = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Da cui segue che la corrente è:

$$i_c(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Quindi, per un tempo molto grande, si avrà che  $v_c \simeq E$  e  $i \simeq 0$ . Si noti inoltre che, appena chiuso il circuito, la funzione della tensione è continua, mentre la corrente passa da 0 a  $\frac{E}{R}$  immediatamente: si ha cioè una discontinuità.

Questo è dovuto al fatto che la tensione è caratteristica dell'oggetto, e quindi rimane continua nel tempo; mentre la corrente dipende interamente dal circuito - che presenta con lo switch una discontinuità.

La tensione, poiché rimane costante, in un circuito RC è detta **variabile di stato**. Viceversa varrà per un circuito con induttore.

L'energia immagazzinata dal condensatore è:

$$U = \frac{1}{2} C V^2$$

quindi, come atteso, l'energia dipende interamente dalla tensione.

Si noti che, come in figura 2.3, si potrebbe avere anche un interruttore chiuso a tempo  $-\infty$  e che si apra al tempo 0. In questo caso, la tensione ai capi del condensatore rimane la stessa anche un volta aperto il circuito - una volta aperto, infatti, le cariche non hanno più possibilità di muoversi.

Quando la tensione finale è superiore alla tensione iniziale si dice che si ha un transitorio di **carica**; viceversa, quando è inferiore, si ha un transitorio di **scarica**<sup>1</sup>.

La *costante di tempo*  $\tau$  è un indice di quanto rapidamente la tensione varia nel corso del tempo, ovvero la velocità con cui la tensione raggiunge l'asintoto.

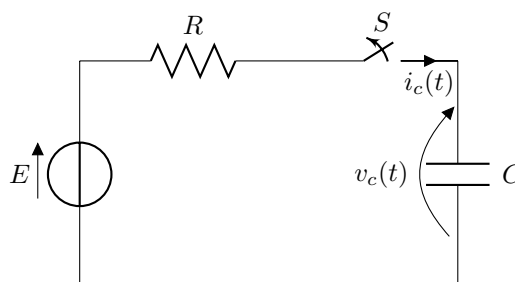


Figura 2.2: circuito RC aperto

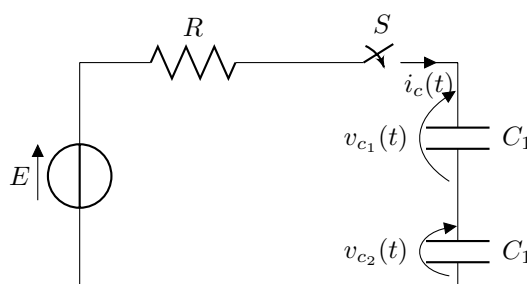


Figura 2.3: circuito RC serie

**Capacitori in serie** In figura 2.3 ci sono due condensatori in serie; la loro corrente sarà la stessa, cioè  $i_{c_1} = i_{c_2} = i_c$ . Le due tensioni sono però differenti.

I due condensatori possono essere descritti con un sistema equivalente di un solo condensatore, avente  $v_c = v_{c_1} + v_{c_2} = \frac{1}{C_1} \int i_{c_1} dt + \frac{1}{C_2} \int i_{c_2} dt$ . Poiché i due integrali sono uguali, segue che il condensatore equivalente risulterà:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

ovvero il *contrario di quanto si esegue in presenza di resistori in serie*. Viceversa accadrà per i condensatori in parallelo.

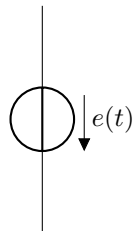
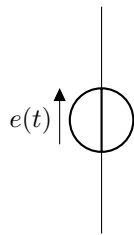
Vedremo poi la prossima volta che in maniera analoga vale anche per le induttanze.

## 2.4 9/04/2018

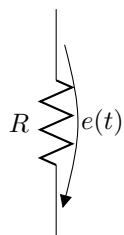
Da un punto di vista visico, un condensatore  $\tilde{A}$  formato da due lastre metalliche affacciate tra di loro - con del vuoto (o in generale aria) tra di loro.

Si introduce a **regime variabile** i generatori di corrente. In questo caso si a che la tensione ai capi varia nel tempo.

<sup>1</sup>vedi appunti quaderno per esempio di transitorio di scarica.



In linea di massima si scrive sempre nella stessa maniera anche le altre componenti del circuito:



Iniziamo in primo luogo ad analizzare le **grandezze periodiche**.

Una grandezza periodica si dice **alternata** se varia tra positiva e negativa.

Tra tutte le periodiche alternate ci sono quelle con andamento **sinusoidale** - tipo di tensione di maggior utilizzo per scopi commerciali.

È possibile definire la **frequenza** di una tensione sinusoidale come  $f = \frac{1}{T}$ . In Europa questa grandezza è di circa  $50Hz$ .

Una possibile formula per questo tipo di tensione sarà:

$$v(t) = A \sin \omega t$$

dove  $\omega = 2\pi f$ .

Un valore di una grandezza elettrica è detta **efficace** quando esprime in un tempo  $t$  la stessa dissipazione di calore che dissiperebbe la grandezza alternata corrispondente.

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{I}{T} \int a^2(t) dt}$$

$$V_{eff} = \frac{V_M}{2}$$



## Capitolo 3

# Semiconduttori

### 3.1 7/05/2018

Iniziamo oggi lo studio e l'utilizzo dei dispositivi realizzati con materiali semiconduttori.

Essi hanno caratteristiche intermedie tra conduttori e isolanti; il semiconduttore più utilizzato è il **silicio** - sebbene in ambiti di nicchia vengono utilizzati anche *germanio* e *galio*. Il silicio e il germanio hanno la caratteristica di appartenere al quarto gruppo della tavola periodica.

I semiconduttori hanno struttura cristallina tetraedrica. Gli atomi sono ognuno dotati di 4 elettroni di valenza per formare legami covalenti con gli atomi vicini. [Vedi immagine quaderno]

A temperatura ambiente può accadere che alcuni di questi legami si rompano, e che gli elettroni inizino a "vagare" nel reticolo cristallino del semiconduttore. Questo comporta che l'atomo che ha perso l'elettrone diventi carico positivamente.

Si dice in tal caso che l'atomo presenti una **lacuna** nella posizione in cui ha perso un elettrone.

Un elettrone libero che incontri una di queste lacune tende a legarsi e, quindi, a "colmarla". In tal caso, l'elettrone si è spostato tra due posizioni differenti. Si preferisce però parlare di **spostamento della lacuna**: si è mossa una carica positiva in senso opposto rispetto a quella dell'elettrone.

Nei semiconduttori convivono sempre due cariche opposte, una negativa e una positiva.

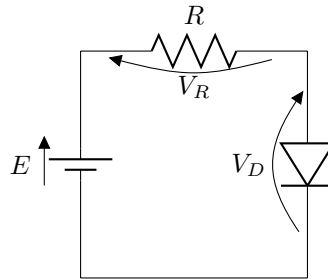
Quello che si può fare è andare a **drogare** il materiale, cioè si sostituiscono alcuni degli atomi del semiconduttore con altri elementi. In alcuni casi si pongono degli atomi di elementi che hanno un numero di elettroni in eccesso rispetto al semiconduttore: si hanno così più elettroni liberi. Alternativamente si può drogare con atomi che hanno un numero inferiore di elettroni di valenza - e quindi si hanno più lacune.

- Se si usano atomi del quinto gruppo, che presentano 5 elettroni di valenza, si dice che si è eseguito un **drogaggio di tipo N**.
- Se si usano atomi del terzo gruppo, che presentano solo 3 elettroni di valenza, si dice che si è eseguito un **drogaggio di tipo P**.

[Vedi disegno drogaggio e giunzione appunti foglio]

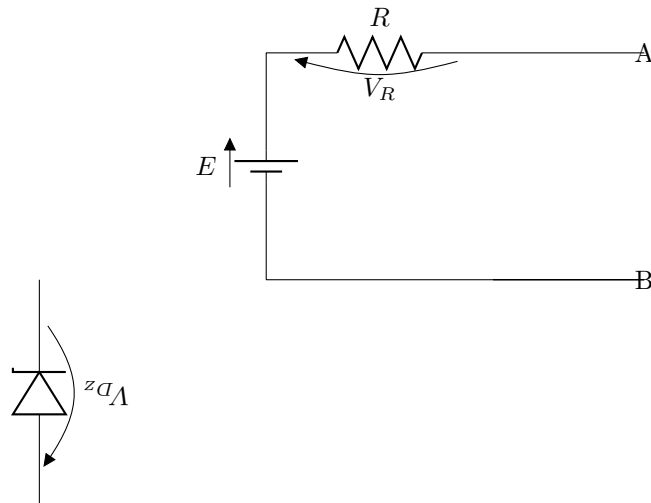
### 3.2 8/05/2018

Vediamo alcune applicazioni dei diodi.



[Vedi foglio appunti per maggiori dettagli]

Realizziamo alternativamente lo stesso circuito con il diodo **Zener** montato al contrario.



fuuuuuk, non riesco a ruotarlo bene!!!!!!

## Capitolo 4

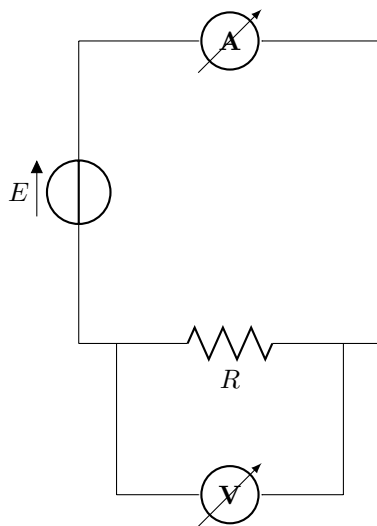
# Esperienze di Laboratorio

I gruppi e stanza sono stabili e si sta a gruppi di 3.

### 4.0.1 Prima esperienza

Questa prima esercitazione non conta ai fini delle relazioni, ma serve solamente a prendere mano con la strumentazioni.

La prima cosa che andremo a fare sarà la **caratterizzazione di un dipolo passivo**, cioè di un **resistore**. A tal fine, tratteremo la *caratteristica tensione-corrente*. Prenderemo un generatore di tensione  $E$ , e lo collegheremo alla resistenza. Così facendo non si riuscirebbe a calcolare la corrente; si utilizza a tal fine un amperometro:



Solo per oggi, porremo che  $V_{mis} = E$ , corrente emessa dal generatore - si fa cioè una grossolana approssimazione. Si misura quindi solamente la corrente tramite l'amperometro.

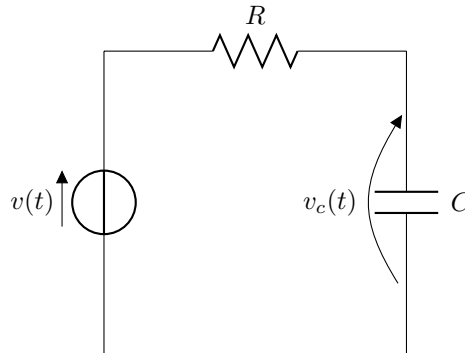
Verificheremo inoltre la validità del Teorema di Tevenin, realizzando un semplice circuito.

### 4.0.2 Seconda esperienza - 09/04/2018

Andiamo a studiare transitorio di carica e scarica di un condensatore.

Il circuito è formato da un generatore, un resistore e un condensatore.

Useremo un generatore di **segnale** al fine di avere una tensione variabile nel tempo. Noi utilizzeremo un'onda **quadra** - stiamo simulando apertura e chiusura di un interruttore.



Dobbiamo scegliere il periodo come 2-3 volte  $\tau = RC$ . Decidiamo quindi uno tra  $R$  e  $C$  e calcoliamo l'altro di conseguenza.

Una volta montato eseguiamo le misure - ma non possiamo usare in questo caso il multimetro. Usiamo l'oscilloscopio come voltmetro e ha il pregio di dare una rappresentazione nel tempo. Mettiamo puntale e coccodrillo della prima ai due capi del condensatore.

Misuriamo la tensione ai capi di  $R$  ai fini di calcolare la corrente tramite la seconda legge di Ohm; il problema è che in genere le due sonde sono collegate insieme all'interno della macchina, e provocano un cortocircuito. A tal fine si mette puntale e coccodrillo tra i capi del generatore di tensione - e si fa una differenza con la tensione del condensatore - in realtà viene eseguito direttamente dal display.

$$v_c(t) = v(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$i_c(t) = \frac{v}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

## 4.1 Quinta esperienza - simulazione di un diodo

In questa esperienza andiamo a simulare un diodo. [Vedi disegno ideale su foglio]