

Laboratorio di Elettromagnetismo S. Masi / A. Coppolecchia (canale D-M)

email: silvia.masi@roma1.infn.it
alessandro.coppolecchia@roma1.infn.it

- Scopo del corso:
 - Imparare come si fanno misure di tipo elettrico,
 - Come funzionano gli strumenti e come si connettono tra di loro
- Importanza del corso
 - La maggior parte dei sensori di osservabili fisiche sono trasduttori, che convertono l'osservabile fisica in una quantità elettrica (carica, corrente, tensione ...)
 - Meglio si misurano le quantità elettriche, meglio si misura l'osservabile fisica che ci interessa.

Laboratorio di Elettromagnetismo S. Masi / A. Coppolecchia

– Pagina web:

<http://oberon.roma1.infn.it/lezioni/laboratorioelettromagnetismo/index.html>
Testi consigliati vedi pag. web

Silvia Masi : stanza 148

Orario ricevimento, vedi pagina web

Calendario esercitazioni ed esami, vedi pagina web

Concordato con altri due canali:

La lezione del venerdì è utilizzata anche per la preparazione dell'esonero e della prova pratica.

Potete contattare sia me che Alessandro via email, se non risponde uno dei due entro un giorno o due, chiamatemi all'interno 271 (o venite direttamente in stanza 148 primo piano edificio Marconi o in laboratorio G31)

Corso di laboratorio di elettromagnetismo

- Il corso è basato su
 - Lezioni in Aula : il mercoledì 11-13 e venerdì 10-11 in aula Conversi
 - Esperienze di Laboratorio: il mercoledì pomeriggio 14:30-18:30 lab. Via Tiburtina (da confermare)
- Nelle lezioni in aula si daranno tutte le informazioni (complementari a quanto state studiando in elettromagnetismo) necessarie a
 - Capire come funzionano gli strumenti di misura
 - Capire come si fanno (ed ottimizzano) le misure
- Quanto spiegato in aula verrà poi applicato in laboratorio

Corso di laboratorio di elettromagnetismo

7 Esperienze di Laboratorio presso i laboratori di Via Tiburtina:

Il mercoledì pomeriggio, calendario provvisorio (a partire dal 29 Marzo). Vedi pagina web

Prima di entrare in laboratorio vi saranno illustrate le modalità di uso del laboratorio stesso e le norme di sicurezza alle quali attenersi nell'utilizzo del laboratorio. Dovrete firmare un foglio per confermare il fatto che siete stati informati sulle norme suddette.

- **Misure in Corrente Continua (21 Marzo)**
- **Oscilloscopio, gen. segnali e RC/CR 1 (11 Aprile)**
- **Oscillosc., gen. segnali e RC/CR 2 (2 Maggio)**
- **RCL - 1 (9 Maggio)**
- **RCL - 2 (16 Maggio)**
- **Diodo (23 Maggio)**
- **Linea di ritardo (30 Maggio)**
- **Esonero 1 (Aprile 2018) da confermare la data (pag. web. t.b.d.)**
- **Esonero 2 (Maggio 2018) come sopra**
- **Prova pratica 11, 12, 13 Giugno**
- **Prova orale Giugno ... e Luglio... (foglio appeso porta st.148...)**

Quaderni di laboratorio

Saranno di gruppo e devono essere controllabili periodicamente. Come impostazione, i quaderni saranno più dei "logbook" che delle vere relazioni, anche se conterranno, oltre ai dati, delle rapide elaborazioni sui dati stessi.

Relazione

La relazione è individuale su un tema, riguardante una o più esercitazioni, assegnato dal docente, ed è basata sui dati raccolti durante le esercitazioni e registrati nel logbook. Dovrà essere portata all'orale, insieme al quaderno, e sarà valutata ai fini dell'esame.

Assenze

Le esercitazioni hanno carattere di lavoro di gruppo. È ammessa una sola assenza, che va comunque recuperata tempestivamente. Eventuali eccezioni, opportunamente giustificate, saranno trattate individualmente.

Gruppi di laboratorio: Saranno composti da due o tre persone al massimo e saranno formati prima della prima esercitazione, per consentire la compilazione dei registri per le presenze. Si raccomanda la puntualità perché il tempo a noi concesso in laboratorio è dalle 14:30 alle 18:30 (o, da confermare coi tecnici, dalle 15 alle 19)

Lista studenti corso 2018: Durante la prima lezione vi sarà dato un foglio sul quale dovrete scrivere in stampatello Cognome, Nome e recapito email (scrivete in maniera leggibile!) Spedire una e-mail di verifica a tutta la mailing list che stilerò in base ai vostri nomi/recapiti, le comunicazioni via email con me e con A. Coppolecchia dovranno sempre riportare come oggetto la dicitura: lab. em. e circuiti, entrambi riceviamo un centinaio di messaggi al giorno in media, oltre ai vostri, quindi è bene che i vostri siano individuabili immediatamente per permetterci di rispondere tempestivamente.

Laboratorio Libero Per recuperare l'assenza ed esercitarsi è possibile usare uno dei giorni che stabiliremo una volta avuto il numero totale degli studenti dei tre canali. Normalmente utilizzavamo il giovedì, dalle 14:30 alle 18:30 con i tecnici dei laboratori: Fabio Basti e Laura Di Benedetto (06 49913938). (email: nome.cognome@uniroma1.it).

Circuiti elettrici

- Un circuito elettrico e' un insieme di elementi collegati tra loro allo scopo di trasferire energia elettrica.
- L' energia elettrica puo' essere immagazzinata sotto forma di campo elettrico o campo magnetico; puo' derivare da energia chimica o meccanica o radiativa e puo' produrre calore o movimento. Per questo e' importante saperla trasferire ed utilizzare al meglio.

Circuiti elettrici

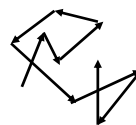
- Un circuito elettrico e' un insieme di **elementi** collegati tra loro allo scopo di trasferire energia elettrica.
- Gli elementi fondamentali ideali di un circuito elettrico possono essere
 - **Attivi** : quando forniscono energia agli altri elementi, ad esempio generatori di tensione elettrica, generatori di corrente, batterie etc.
 - **Passivi**: quando dissipano o immagazzinano energia: resistori, condensatori, induttori

Correnti elettriche

- Una corrente elettrica e' un movimento di cariche elettriche.
- Noi avremo a che fare col movimento di elettroni in conduttori e semiconduttori
- e^- : $(1.60217653 \pm 0.00000014) \times 10^{-19}$ Coulomb
- Per noi: 1.6×10^{-19} Coulomb

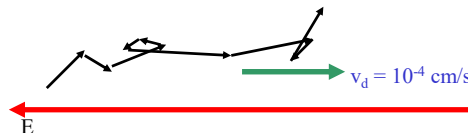
Correnti elettriche

- Moto di un elettrone in un metallo:
- Agitazione termica



L' elettrone urta continuamente contro gli atomi del reticolo cristallino, e viene deviato in una direzione qualsiasi. il moto medio e' casuale (browniano)
 $\langle v^2 \rangle^{1/2} = 10^6$ cm/s

- Agitazione termica in presenza di un campo elettrico: si instaura una lenta velocita' di deriva



La legge di Ohm

- Sia τ il tempo medio tra due urti e v_d la velocita' di deriva: il libero cammino medio sara' $L = \tau v_d$.
- Il moto tra due urti e' dovuto alla forza del campo elettrico $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}$, e sara' quindi uniformemente accelerato con $\mathbf{a} = -e\mathbf{E}/m$.
- La velocita' media sara' $v_d = a\tau = -(eE/m)\tau$.
- Si definisce la **Densita' di corrente J** come la Quantita' di carica per unita' di tempo attraverso l'unita' di superficie (per una sezione trasversale).

La legge di Ohm

- Se N e' il numero dei portatori di carica per m^3 , ognuno di essi di carica q , che si muovono nel conduttore con velocita' v_d , la carica che fluisce nell' unita' di tempo attraverso una sezione A del conduttore e':

$$I = \int_A Nq\vec{v}_d \cdot \vec{n} dA$$

- si chiama allora densita' di corrente il vettore:

$$\vec{J} = Nq\vec{v}_d$$

- Questo e' un vettore che ha la stessa direzione e lo stesso verso della velocita' di deriva dei portatori di carica che a sua volta ha direzione uguale e concorde al campo elettrico se la carica q e' positiva e discorde se la carica q e' negativa. In ogni caso J e' parallelo e concorde ad E e si misura in A/m^2

Legge di Ohm

- La densità di corrente sarà quindi $\mathbf{J} = -eN\mathbf{v}_d$ e quindi $\mathbf{J} = (e^2\tau N/m)\mathbf{E}$ ovvero $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$ dove con σ si è indicata la conducibilità elettrica, che è una caratteristica del metallo (e può dipendere dalla temperatura, dall'intensità del campo $\mathbf{E}$ e dalla direzione).
- In generale $\mathbf{J} = \underline{\sigma}(\mathbf{E})\mathbf{E}$ con $\underline{\sigma}$ tensore del 2° ordine.

Legge di Ohm

- Nel caso di un filo metallico omogeneo, isotropo, di sezione costante, e lineare, σ è costante ed indipendente da $\mathbf{E}$ e dalla direzione.
- Il suo inverso è detto resistività: $\rho = 1/\sigma$.
- Sia l la lunghezza del conduttore e S la sezione. Appliciamo una differenza di potenziale ΔV ai capi del conduttore.

Legge di Ohm

$$\Delta V = \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = El$$

$$I = \int_s \vec{J} \cdot \vec{n} da = JS$$

ma $J = \sigma E$ e quindi $\frac{I}{S} = \sigma \frac{\Delta V}{l}$

e quindi $I = \frac{\sigma S}{l} \Delta V$

definendo la resistenza $R = \frac{l}{\sigma S}$

si trova la legge di Ohm $\Delta V = RI$ ←

Correnti elettriche

- Vedremo che grazie alle correnti elettriche si possono trasferire energia ed informazioni all'interno di circuiti elettrici.
- Ci interessano quindi le relazioni tra differenza di potenziale e corrente per i diversi elementi di un circuito elettrico.
- Lo studio dei circuiti elettrici consiste nel saper calcolare e misurare le correnti e le tensioni in qualunque punto di un circuito comunque complicato.

- Per gli elementi passivi valgono le seguenti relazioni, note dallo studio dell'elettromagnetismo:



$V = RI$; <i>Legge di Ohm</i> $I = V / R$;	$V = \frac{1}{C} \int_0^t Idt$; <i>Def. di $C=Q/V$</i> $I = C \frac{dV}{dt}$;	$V = L \frac{dI}{dt}$; <i>Legge di Lenz</i> $I = \frac{1}{L} \int_0^t Vdt$
--	--	---

- Dove:
 - V = differenza di potenziale ai capi dell'elemento considerato,
 - I = intensità di corrente che attraversa l'elemento stesso,
 - R = resistenza,
 - C = capacità,
 - L = coefficiente di autoinduzione (o induttanza), t = tempo

Elementi reali di un circuito elettrico (passivi)

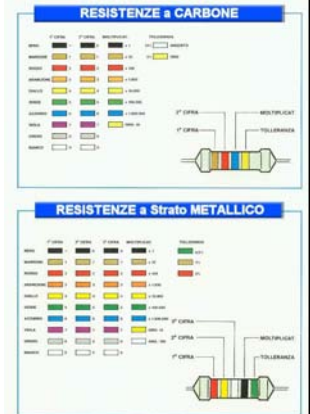
- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Resistori <ul style="list-style-type: none"> A filo metallico A impasto A film metallico Condensatori <ul style="list-style-type: none"> A mica A poliestere A ceramica Elettrolitici | <ul style="list-style-type: none"> Resistori variabili
(trimmer e potenziometri) Condensatori variabili Induttori (con o senza nucleo in ferrite) |
|---|---|

Resistori

- Sono disponibili in
 - valori da 0.01Ω a $10^{12}\Omega$
 - potenze dissipabili da $1/8W$ a $250W$
 - Precisione da 0.005% a 20%
- I piu' economici sono fatti da un **impasto di carbone**: viene garantita una tolleranza del 5% intorno al valore nominale, ma: (res. Allen Bradley serie AB tipo CB):
 - Saldando puo' cambiare il valore del 2% (permanente)
 - Vibrazioni ($20g$) e shock ($100g$) $\rightarrow$ 2% (permanente)
 - Umidita' (95% a 40°) cambia il valore dal 6% al 10% (non permanente)
 - $10V$ di ddp applicata cambiano il valore da -0.15% a -0.3%
 - Variando T da $25^\circ C$ a $-15^\circ C$ R varia del $2.5\%-4.5\%$
 - Variando T da $25^\circ C$ a $+85^\circ C$ R varia del $3.3\%-5.9\%$

Resistori

- Altri difetti dei resistori a impasto sono l'induttanza (che puo' essere importante ad alte frequenze) e il loro rumore a basse frequenze.
- Se serve maggiore precisione si usano resistori ottenuti evaporando un sottile film metallico su un supporto isolante. (resistori a strato metallico): garantiscono tolleranze dell' 1% e stabilita' migliori dello 0.1% .

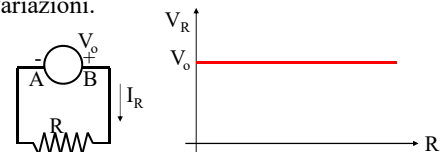


Condensatori

Tecnologia:	Capacita'	Accuratezza	Perdite	$\Delta C/\Delta T$	
Mica	$1pF - 0.01\mu F$	Buona	Buona	Buona	
Ceramici	$10pF - 1\mu F$	Scarsa	Moderata	Moderata	
Mylar	$1nF - 50\mu F$	Buona	Buona	Buona	
Policarbonato	$100pF - 30\mu F$	Eccellente	Eccellente	Eccellente	
Teflon	$1nF - 2\mu F$	Eccellente	Migliore	Migliore	
Vetro	$10pF - 1nF$	Buona	Eccellente	Eccellente	
Tantalio	$0.1\mu F - 500\mu F$	Scarsa	-	-	*
Elettrolitici	$0.1\mu F - 1F$	Terribile	Terribile	Terribile	*

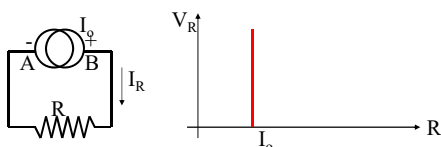
Generatore ideale di tensione

- E' una sorgente di energia capace di mantenere una differenza di potenziale costante tra due punti A e B, indipendentemente da cio' che viene connesso tra quei due punti.
- Se si connette un circuito elettrico tra quei due punti, il generatore fara' scorrere corrente nel circuito in modo che ΔV_{AB} rimanga costante, indipendentemente dai componenti del circuito e dalle loro variazioni.
- Esempio:



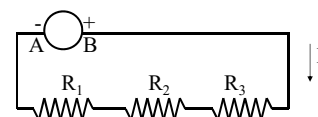
Generatore ideale di corrente

- E' una sorgente di energia capace di erogare una corrente di intensita' I_0 costante, iniettandola in un punto A e ricevendone altrettanta in un punto B, indipendentemente da cio' che viene connesso tra A e B.
- Se si connette un circuito elettrico, il generatore variera' la tensione ΔV_{AB} in modo che I rimanga costante, indipendentemente dai componenti del circuito e dalle loro variazioni.
- Esempio:



Semplici circuiti elettrici

- Circuito con resistenze in serie



$$V_1 = R_1 I; \quad V_2 = R_2 I; \quad V_3 = R_3 I; \quad \text{ma}$$

$$V_1 + V_2 + V_3 = V; \quad \text{quindi}$$

$$R_1 I + R_2 I + R_3 I = V \quad \text{da cui}$$

$$V = RI \quad \text{con} \quad R = R_1 + R_2 + R_3; \quad R = \sum_i R_i$$

Semplici circuiti elettrici

- Circuito con resistenze in parallelo

$$I_1 = V_1 / R_1; \quad I_2 = V_2 / R_2; \quad I_3 = V_3 / R_3;$$

$$\text{ma } V_1 = V_2 = V_3 = V;$$

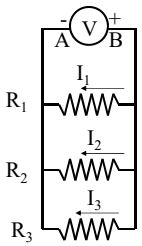
$$I \text{ inoltre } I_1 + I_2 + I_3 = I \text{ da cui}$$

$$I = V / R_1 + V / R_2 + V / R_3 =$$

$$= V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \text{ da cui}$$

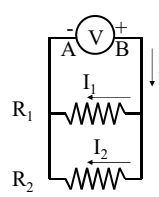
$$V = RI \quad \text{con}$$

$$\frac{1}{R} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right): \quad \boxed{\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i}}$$



Semplici circuiti elettrici

- Parallelo di due resistenze



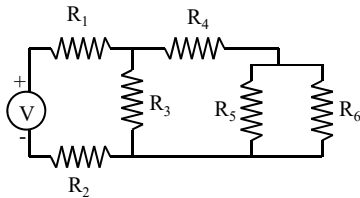
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

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

- Il denominatore e' sempre >1, quindi R e' sempre inferiore alla piu' piccola delle resistenze componenti il circuito.

Rete

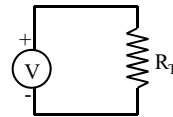
- Una connessione di circuiti serie e parallelo si chiama rete. Applicando ripetutamente le formule di serie e parallelo si puo' ricavare la resistenza equivalente.



Rete

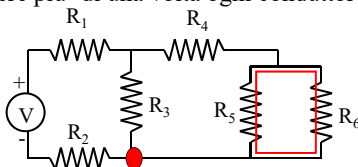
- Una connessione di circuiti serie e parallelo si chiama rete. Applicando ripetutamente le formule di serie e parallelo si puo' ricavare la resistenza equivalente.

$$R_T = R_1 + R_2 + \frac{R_3(R_4 + \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6})}{R_3 + R_4 + \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}}$$



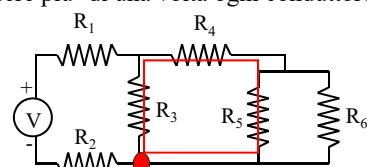
Principi di Kirchhoff

- Una rete qualunque di conduttori puo' essere sempre pensata come costituita da nodi e da maglie.
- Un **nodo** e' un punto in cui convergono piu' conduttori
- Una **maglia** e' il percorso che si ottiene partendo da un nodo e muovendosi lungo i conduttori della rete in modo da tornare al punto di partenza senza percorrere piu' di una volta ogni conduttore.



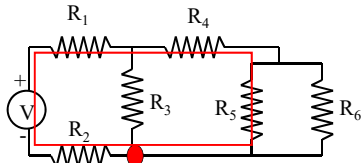
Principi di Kirchhoff

- Una rete qualunque di conduttori puo' essere sempre pensata come costituita da nodi e da maglie.
- Un nodo e' un punto in cui convergono piu' conduttori
- Una maglia e' il percorso che si ottiene partendo da un nodo e muovendosi lungo i conduttori della rete in modo da tornare al punto di partenza senza percorrere piu' di una volta ogni conduttore.



Principi di Kirchhoff

- Una rete qualunque di conduttori può essere sempre pensata come costituita da nodi e da maglie.
- Un nodo è un punto in cui convergono più conduttori
- Una maglia è il percorso che si ottiene partendo da un nodo e muovendosi lungo i conduttori della rete in modo da tornare al punto di partenza senza percorrere più di una volta ogni conduttore.

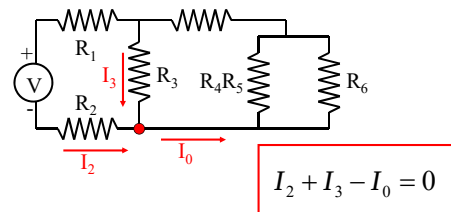


Primo Principio di Kirchhoff

- La somma algebrica delle correnti confluenti in un nodo di un circuito elettrico è sempre nulla:

$$\sum_k I_k = 0$$

- Si intendono positive le correnti entranti e negative quelle uscenti.



Primo Principio di Kirchhoff

- Questa legge deriva dal fatto che la carica non si può accumulare nei nodi: in un certo intervallo di tempo la carica che entra deve essere uguale a quella che esce.

Secondo Principio di Kirchhoff

- Lungo una qualsiasi maglia di un circuito elettrico è nulla la somma di tutte le differenze di potenziale ai capi degli elementi che la costituiscono.

$$\sum_i V_i = 0$$

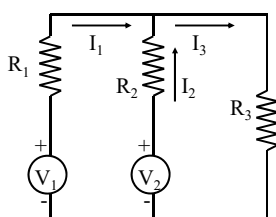
- Se si indicano con V_i le ddp dei generatori e con $R_j I_j$ le cadute di tensione sulle resistenze, la stessa legge si può scrivere come:

$$\sum_i V_i = \sum_j R_j I_j$$

- Deriva direttamente dalla applicazione della legge di Ohm ai singoli elementi della maglia

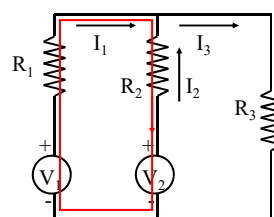
Esempio sui Principi di Kirchhoff

- Questa relazione si utilizza fissando un verso arbitrario di percorrenza della maglia, e considerando positive tutte le ddp che tendono a far circolare la corrente in tale verso, e negative le altre; stesso criterio per i prodotti RI
- Esempio: vogliamo trovare le correnti I_1, I_2, I_3 .



Esempio sui Principi di Kirchhoff

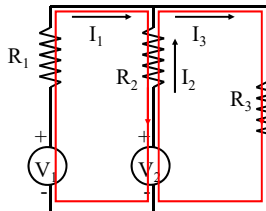
- Questa relazione si utilizza fissando un verso arbitrario di percorrenza della maglia, e considerando positive tutte le ddp che tendono a far circolare la corrente in tale verso, e negative le altre; stesso criterio per i prodotti RI
- Esempio: vogliamo trovare le correnti I_1, I_2, I_3 .



$$V_1 - V_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

Esempio sui Principi di Kirchhoff

- Questa relazione si utilizza fissando un verso arbitrario di percorrenza della maglia, e considerando positive tutte le ddp che tendono a far circolare la corrente in tale verso, e negative le altre; stesso criterio per i prodotti RI
- Esempio: vogliamo trovare le correnti I_1, I_2, I_3 .

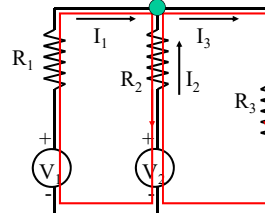


$$V_1 - V_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

$$V_2 = R_2 I_2 + R_3 I_3$$

Esempio sui Principi di Kirchhoff

- Questa relazione si utilizza fissando un verso arbitrario di percorrenza della maglia, e considerando positive tutte le ddp che tendono a far circolare la corrente in tale verso, e negative le altre; stesso criterio per i prodotti RI
- Esempio: vogliamo trovare le correnti I_1, I_2, I_3 .



$$V_1 - V_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

$$V_2 = R_2 I_2 + R_3 I_3$$

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Esempio sui Principi di Kirchhoff

$$V_1 - V_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

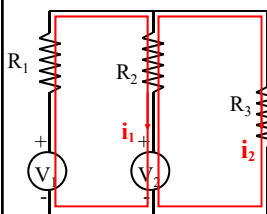
$$V_2 = R_3 I_1 + (R_3 + R_2) I_2$$

e' un sistema lineare a 2 eq. e 2 inc. da cui si trovano I_1, I_2 e poi $I_3 = I_1 + I_2$ in funzione delle V e delle R

Metodo delle Maglie

- Nella precedente applicazione abbiamo utilizzato delle correnti fisiche I_1, I_2, I_3 .
- La linearita' delle leggi fisiche in gioco permette di utilizzare correnti fittizie, dette **correnti di maglia**, per risolvere il circuito.
- Si fissano delle correnti di maglia con verso arbitrario, e si applica il secondo principio considerando positivi:
 - Le ddp dei generatori che tendono a far circolare la corrente di maglia nel verso prefissato
 - I prodotti RI per i quali il verso di I e' concorde con quello della corrente di maglia.

Metodo delle Maglie

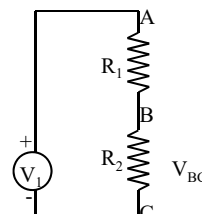


$$V_1 - V_2 = (R_1 + R_2) i_1 - R_2 i_2$$

$$V_2 = -R_2 i_1 + (R_2 + R_3) i_2$$

- Attenzione: le i di adesso non sono le I di prima !
- La corrente fisica che scorre davvero in un elemento del circuito e' la somma algebrica di tutte le correnti di maglia che ci scorrono.

Applicazione I: Il partitore di tensione



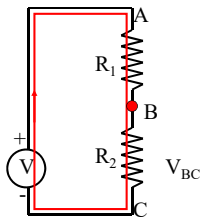
- Determinare la ddp ai capi della R_2
- Si risolve direttamente:

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

$$V_B - V_C = R_2 I = \frac{V R_2}{R_1 + R_2}$$

- E' un circuito utilissimo, perche' permette, partendo da una tensione V, di ottenerne un' altra di un valore qualsiasi compreso tra 0 e V: basta scegliere una R_2 opportuna !

Applicazione 1: Il partitore di tensione



- Ma si puo' risolvere anche con Kirchhoff:

per il nodo B : $I_1 - I_2 = 0 \Rightarrow I_1 = I_2 = I$

per la maglia : $V = R_1 I_1 + R_2 I_2 = (R_1 + R_2) I$

e quindi : $V_{BC} = IR_2 = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$