Fondamenti di Elettronica, Sez.1

Alessandra Flammini
alessandra.flammini@unibs.it
Ufficio 24 Dip. Ingegneria dell'Informazione
030-3715627 Lunedì 16:30-18:30

APPROCCIO MATEMATICO (Circuiti) $\Leftrightarrow$ **ELETTRONICA** $\Leftrightarrow$ **APPROCCIO FISICO (Dispositivi)**

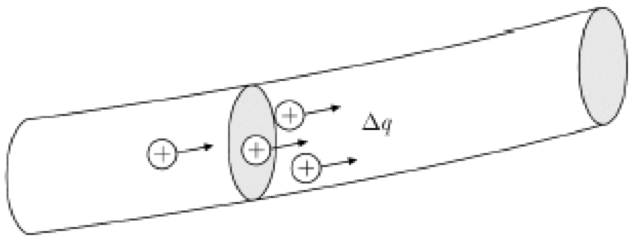
Richiami di Circuiti Elettrici per l'Elettronica (da lucidi del corso del Prof. Locatelli)

Corrente (1)

- La carica q si misura in *coulomb* [C]
- Principio di conservazione della carica.
- Nei metalli le cariche libere sono elettroni.
- Le cariche in movimento creano una corrente.
- Convenzione: si considera il movimento delle cariche positive.

7

Corrente (2)



- La corrente *i(t)* rappresenta il flusso delle cariche positive:
  - si misura in *ampere* [A];
  - è costante lungo i conduttori ideali.

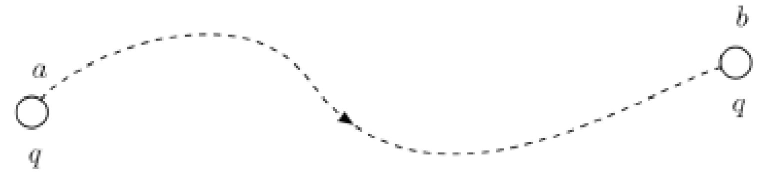
$$i(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

$$\Delta q = \int_0^{\Delta t} i(t)dt$$

- Valori tipici di corrente:
  - circuito integrato: 1 nA ÷ 1 µA;
  - corrente avvertita da un essere umano: > 1 mA;
  - impianto elettrico: 1 ÷ 20 A.

<u>Nota, correnti nei dispositivi elettronici di "segnale":</u>
dai nA (perdite) ai mA (corrente di trasporto dell'informazione su cavo > 10cm)

Tensione (1)



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

- Tensione *v*: variazione di energia *w* per unità di carica *q*:
  - si misura in volt [V];
  - non dipende dal percorso;
  - i conduttori ideali sono equipotenziali.

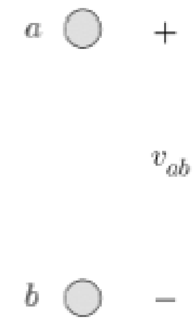
$$v_{ab} = \frac{\Delta w}{q} = \frac{w(a) - w(b)}{q} = \mathrm{V(a)} - \mathrm{V(b)}$$

- Valori tipici di tensione:
  - morsetti di un'antenna radio in ricezione: 100 nV ÷ 10 µV;
  - batteria di un'automobile: 12 V;
  - linee ad alta tensione: 100 kV.

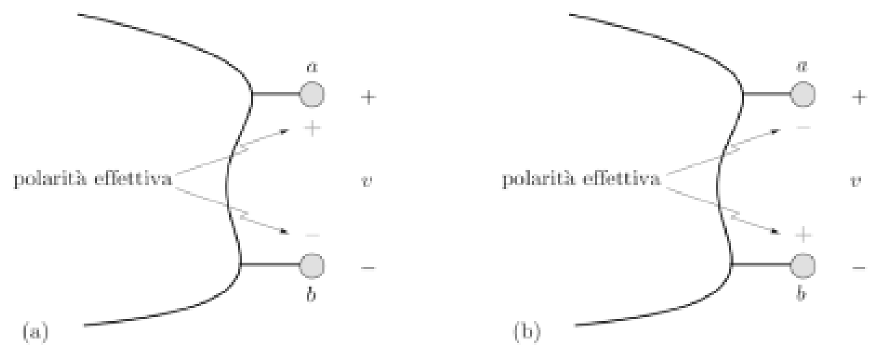
10

<u>Nota, tensione nei dispositivi elettronici di "segnale":</u>
dai mV (rumore) ai V (tensione di trasporto dell'informazione su scheda e cavo)

Tensione (2)



- Polarità di riferimento:
  - si indica con una coppia di segni + e - ed è totalmente arbitrario;
  - *v > 0*: la polarità effettiva coincide con quella di riferimento (a).
  - *v < 0*: la polarità effettiva è opposta a quella di riferimento (b).

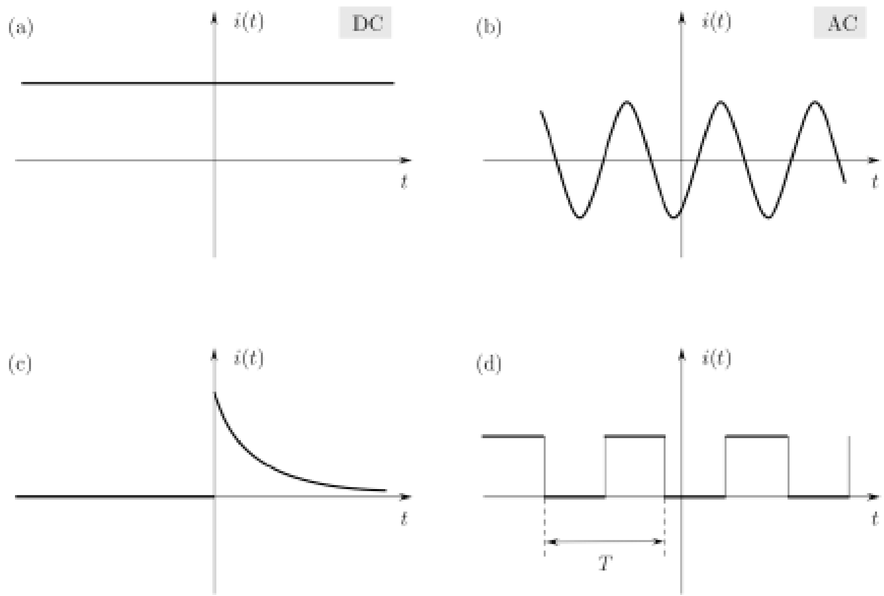


Nota: la tensione che si utilizza nell'analisi elettronica è sempre una differenza di potenziale, ossia la tensione di un punto rispetto ad un altro

$$v_{ab} = v_a - v_b$$

Segnali di tensione e corrente

- DC (Direct Current):
  - corrente continua.
- AC (Alternating Current):
  - corrente alternata.

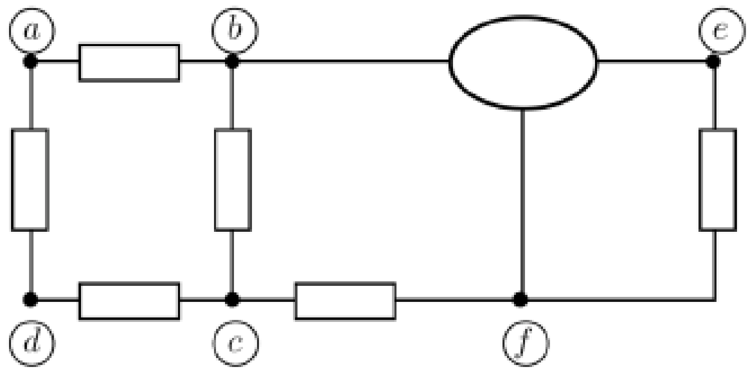


Nota:

- **I tipici segnali in DC sono i segnali di alimentazione (es. batteria)**
- **Un segnale AC può essere aperiodico (es. un impulso) o periodico, ossia che si ripete identico dopo un tempo T, ed è quindi caratterizzato da una frequenza F[Hz] = 1/T**
- **Un segnale DC è un'astrazione; si parla di segnali d'ingresso DC quando il segnale cambia molto lentamente (variazioni piccole in decine o centinaia di secondi)**

Legge di Kirchhoff delle correnti (1)

- Concetto di <u>nodo</u>:
  - un punto al quale sono connessi due o più elementi (es. 6 nodi)



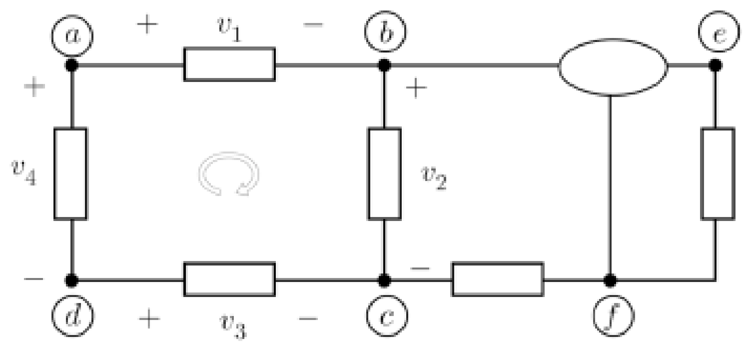
- la somma algebrica delle correnti che entrano/escono in un nodo è 0.

$$\sum_k i_k(t) = 0$$

Legge di Kirchhoff delle tensioni (1)

$$\sum_k v_k(t) = 0$$

- Il campo elettrostatico è conservativo:
  - una carica che si muove lungo un percorso chiuso presenta una variazione di energia nulla;
  - la somma algebrica delle tensioni (variazioni di energia per unità di carica) lungo una sequenza chiusa di nodi è nulla.



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

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

$$v_3 + v_4 = v_1 + v_2$$

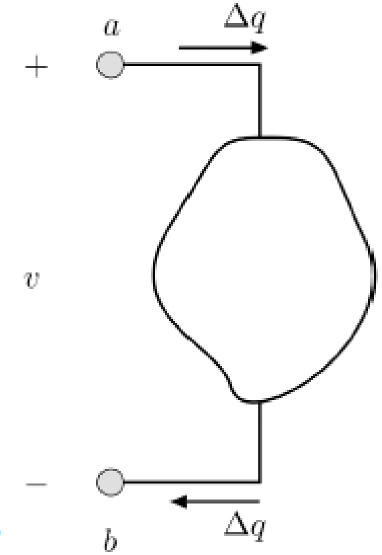
16

Nota:

- **Nei circuiti elettronici che affronteremo, le "maglie" si presentano come "rami" che partono dalla tensione di alimentazione Vp e, attraverso i vari componenti scendono verso Gnd (ground = riferimento di tensione nullo). In un ramo la somma delle differenze di tensione sui vari componenti è pari alla tensione Vp**

Potenza (1)

- Una carica $\Delta q > 0$ attraversa un generico bipolo da *a* a *b* in un tempo Δt. Supponendo $v > 0$ si ha: $\Delta w = v\Delta q$



- La <u>potenza</u> è l'energia perduta per unità di tempo:

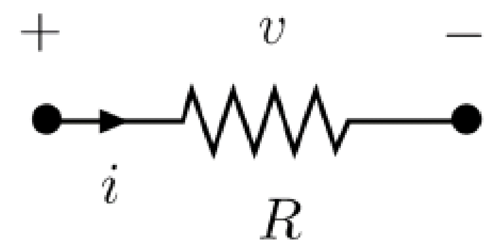
$$P = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{dw}{dt} \quad \Rightarrow \quad P = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{v\Delta q}{\Delta t} = vi$$

- La potenza *P* si misura in *Watt* [W].
- L'energia perduta dalla carica è assorbita dal bipolo.

Nota:

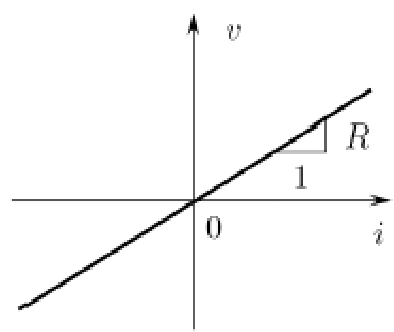
- **L'energia w è legata alla tensione, la potenza è la derivata nel tempo dell'energia**
- **La potenza elettrica è data dal prodotto di tensione per corrente**
- **Normalmente la potenza dissipata dai dispositivi elettronici si trasforma in calore**
- **NOTA: un laptop consuma circa 50-100W, uno Smartphone meno di 5W**

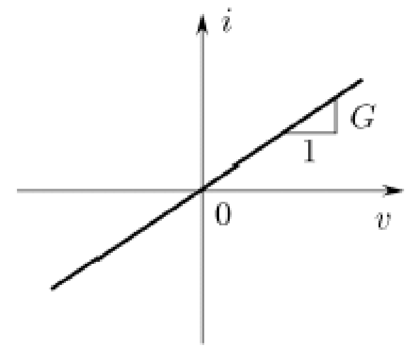
Bipoli resistivi (2)



- <u>Resistore</u> (1):
  - relazione caratteristica (legge di Ohm): $v = Ri \qquad i = Gv$
  - R (> 0) è detta <u>resistenza</u> e si misura in ohm [Ω], G si dice <u>conduttanza</u> e si misura in Siemens [S];
  - la caratteristica I-V (V-I) è una retta passante per l'origine.

$$G = \frac{1}{R}$$





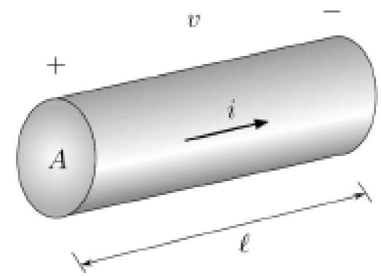
34

Nota:

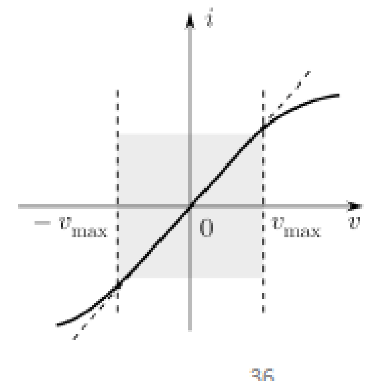
- **Il resistore è un bipolo simmetrico lineare che ha resistenza R sia in DC che in AC**
- **La potenza dissipata da un resistore è $P = V*I = R*I^2$**

Bipoli resistivi (4)

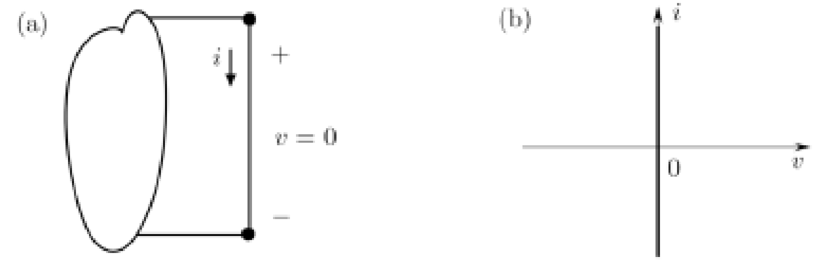
- Resistore (3): $p(t) = v(t)i(t) = Ri^2(t) = \dfrac{v^2(t)}{R}$
  - la potenza (assorbita) è sempre positiva ($R > 0$);
  - elemento <u>passivo</u>: l'energia assorbita è sempre positiva;
  - l'energia assorbita è convertita in calore (effetto Joule).



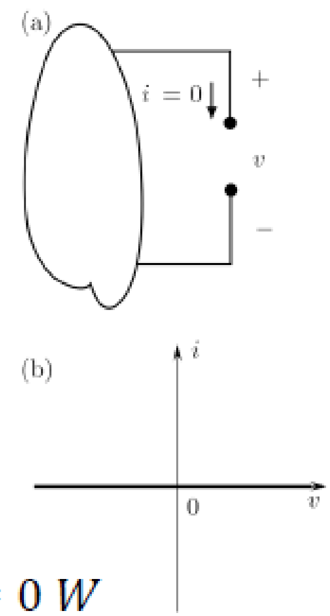
- Resistore reale:
  - filo con resistività ρ percorso da corrente $R = \rho \dfrac{l}{A}$
  - la caratteristica non può essere perfettamente lineare!
  - dispositivi fisici vs. elementi circuitali ideali.



Bipoli resistivi (5)



- **Corto circuito**:
  - la tensione è nulla, la corrente è libera: $v = 0$
  - la caratteristica coincide con l'asse delle correnti.
- **Circuito aperto**:
  - la corrente è nulla, la tensione è libera: $i = 0$
  - la caratteristica coincide con l'asse delle tensioni.
- Casi degeneri di resistore con *R* e *G* nulle.
- Elementi duali.

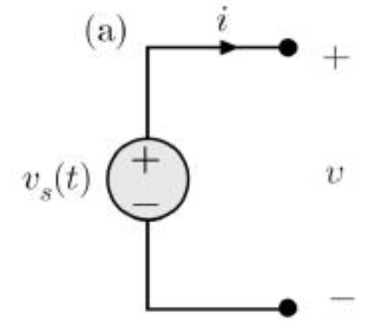


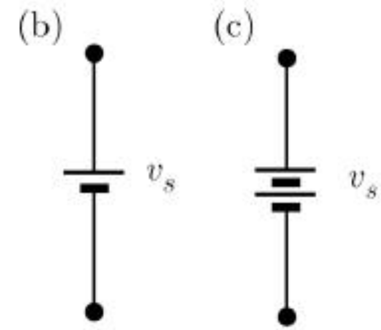
$$p(t) = 0\ W$$

37

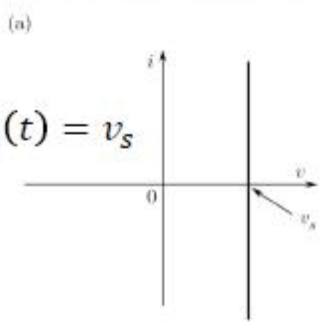
Bipoli resistivi (6)

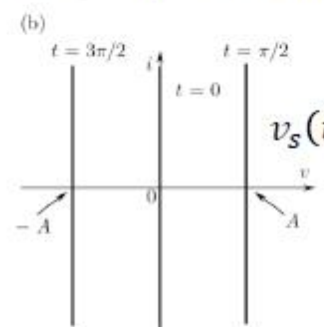
- <u>Generatore indipendente di tensione:</u> $v = v_s(t)$
  - impone una tensione che non dipende dalla corrente;
  - <u>batteria</u>: la tensione imposta è costante nel tempo;
  - se la tensione imposta è 0 degenera nel corto circuito;
  - la caratteristica, in generale, è <u>tempo-variante</u>.



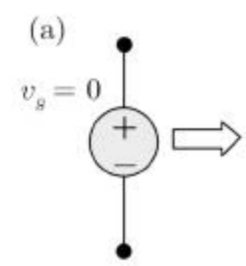


$v_s(t) = v_s$





$v_s(t) = \mathrm{A} \cdot \sin t$



Nota:

- **In un generatore di tensione la corrente, di valore positivo, esce dal polo +**
- **Il generatore reale è modellizzato da un generatore ideale con un resistore di basso valore connesso in serie al polo +**
- **Nei circuiti che affronteremo ci sarà un solo generatore di tensione Vp (tensione di alimentazione)**

Resistenze parallelo e serie, partitore

- **Resistenze parallelo**
  - **Due resistori si dicono in parallelo se hanno i due terminali in comune e $V_{R1}=V_{R2}$**
  - **Nel circuito in alto si ha $V = V_{R1}=V_{R2}$**
  - **L'equazione di Kirkoff al nodo A è**

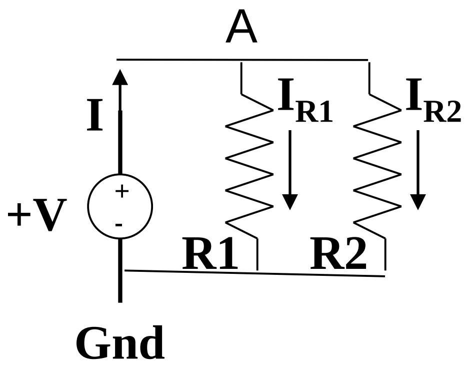
  $I = I_{R1}+I_{R2} = (V_{R1}/R1) + (V_{R2}/R2) = (V_{R1}*G1) + (V_{R2}*G2)$

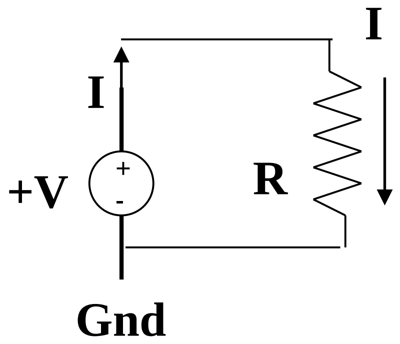
  Dove $G = 1/R$ è la conduttanza

  - **Nel circuito in basso si ha $I = V/R = V*G$, da cui**

  $I = (V_{R1}*G1) + (V_{R2}*G2) = V*G$, ossia $G = G1 + G2$

  $(1/R) = (1/R1) + (1/R2)$ $\qquad$ $R = R1*R2/(R1+R2)$

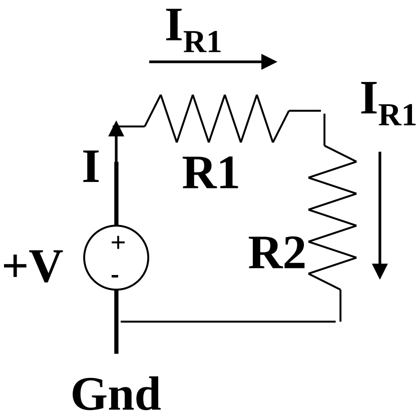


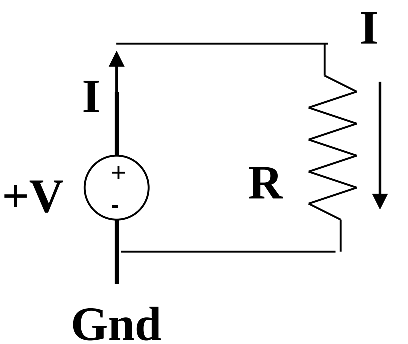


- **Note: la resistenza è la capacità di opporsi alla corrente**
  - **Se creo un percorso in parallelo ad una resistenza, con resistenza di qualunque valore, la resistenza globale diminuisce**
  - **Se le due resistenze sono diverse, la maggior parte della corrente va sulla minore (la R equivalente "assomiglia alla minore")**

Resistenze parallelo e serie, partitore

- **Resistenze serie**
  - Due resistori si dicono in serie se hanno un terminale in comune e vi scorre la stessa corrente, ossia $I_{R1}=I_{R2}$
  - La corrente I che esce dal generatore di tensione V attraversa entrambi i resistori R1 e R2, ossia $I=I_{R1}=I_{R2}$
  - L'equazione di Kirkoff alla maglia è $V = V_{R1} + V_{R2}$ ossia $V = R1*I_{R1}+R2*I_{R2} = I*(R1+R2)$. Il circuito è quindi equivalente al circuito a lato dove i due resistori in serie sono stati sostituiti da un resistore equivalente la cui resistenza R è pari a $R = R1 + R2$
  - **NOTA:** la resistenza è la capacità di opporsi al flusso di corrente; se aggiungo una resistenza in serie la resistenza globale aumenta





- **Partitore**

  Con riferimento al circuito in alto, la tensione V_{R2} ai capi di R2 è anche detta tensione di partitore di V su R2 ed R1. $V_{R2} < V$

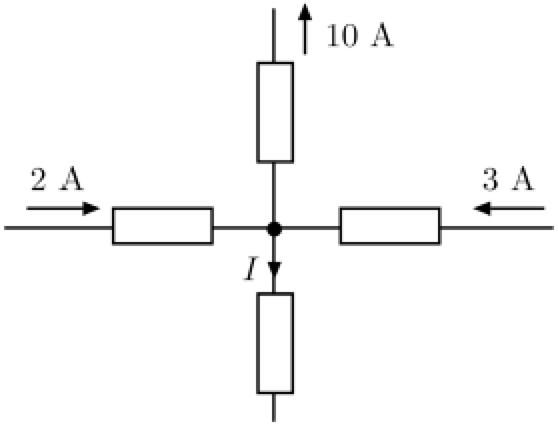
  Si ha: $V_{R2} = R2*I_{R2} = R2*I$ dove $I=V/R= V/(R1+R2)$

  Quindi $V_{R2} = V*R2/(R1+R2)$

Esercizi

- Ricavare il valore della corrente *I*.

  $I = -5\ A$



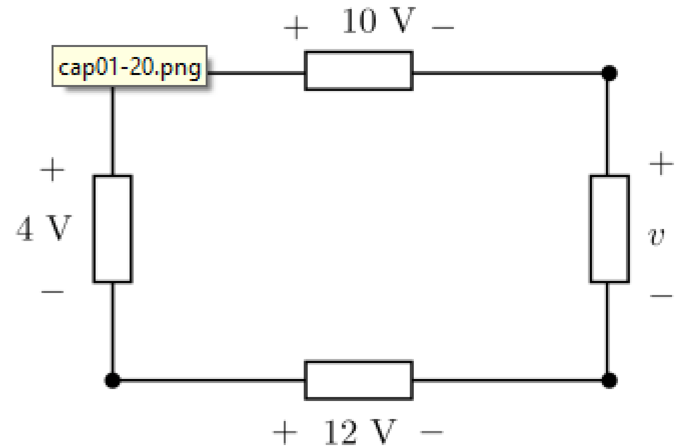
- **Corrente al nodo**

  La somma delle correnti è nulla,

  I = 2A+3A-10A = -5A

- Ricavare la tensione *v*.

  $v = 6\ V$



- **Tensione di maglia**

  La somma delle tensioni è nulla,

  V + 10V – 4V -12V = 0

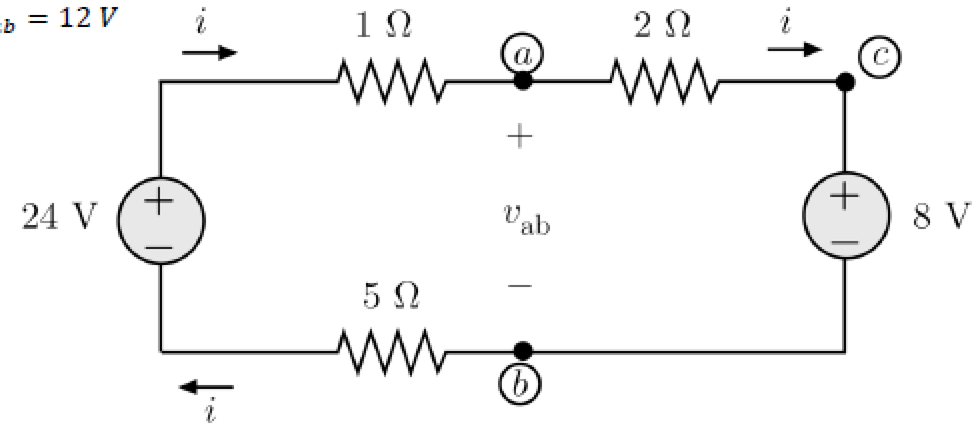
- **NOTA: i generatori di tensione si possono mettere in serie e in parallelo?**
  - **la serie è permessa (la serie implica uguale corrente) e il generatore equivalente è la somma algebrica dei due**
  - **il parallelo non è permesso (il parallelo implica uguale tensione)**

Esercizi

❑ Calcolare la corrente i e la tensione v_{ab}.

$i = 2\ A$

$v_{ab} = 12\ V$



- **Ci sono vari modi per risolvere un circuito**
- **Tensione di maglia**

Calcolo della corrente I di maglia

Dato che in una maglia isolata posso scambiare posizione agli elementi la maglia è equivalente ad una maglia con un generatore a 24V-8V=16V e un resistore R = (1+2+5)Ohm = 8Ohm.

La corrente i di maglia è quindi 16V/8Ohm=2A

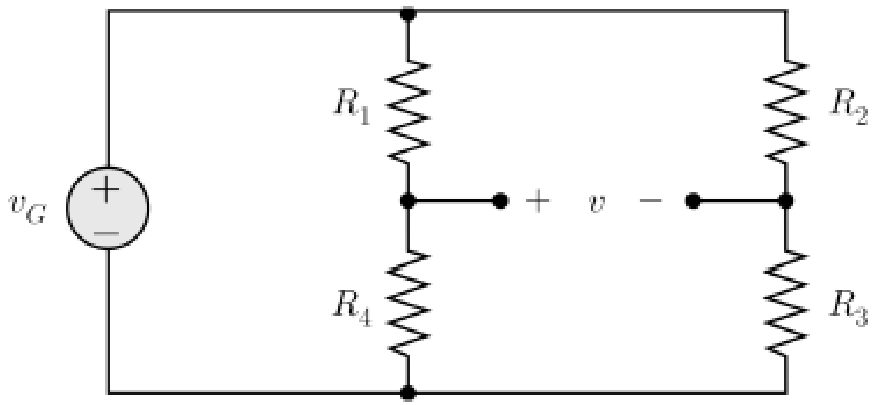
La tensione Vab è pari a 8V più la caduta sul resistore da 2Ohm.

Vab = 8V + 2Ohm*2A

Nota: ponendo Vb=0, allora Vc=+8V e Va-Vc= 2Ohm*2A quindi Va= Vc + 2Ohm*2A

Esercizi

- Ricavare la tensione *v* all'uscita del cosiddetto circuito a ponte, noto anche come <u>ponte di Wheatstone</u>. $v = v_G \left(\frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) V$

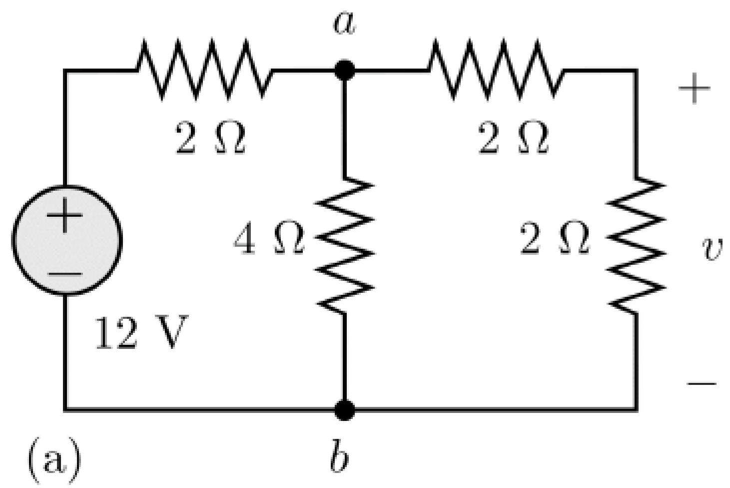


- **La tensione v è pari alla differenza tra la tensione del polo + e il punto comune e la tensione del polo – e il punto comune**
- **La tensione tra il polo + e il punto comune è la tensione di partitore di V_G su R4 e R1 e, analogamente, la tensione tra il polo - e il punto comune è la tensione di partitore di V_G su R3 e R2**

Esercizi

- Calcolare la tensione *v* sfruttando il principio di sostituzione.

$v = 3\,V$



- **La tensione v si ricava da Vab secondo la legge del partitore e Vab è la tensione di partitore su R e sul resistore connesso al generatore da 12V, dove R è la resistenza equivalente alla rete resistiva costituita dal parallelo tra il resistore da 4Ohm e la serie dei due resistori da 2 Ohm**
- **R = 2Ohm, quindi Vab = 12V*2Ohm/4Ohm = 6V**
- **quindi V=Vab*2Ohm/4Ohm = 3V**

Bipoli non lineari, soluzione analitica

• Si supponga un bipolo lineare che, al contrario del resistore che è un bipolo lineare definito dalla legge di Ohm v=R*i, è definito dalla relazione non lineare i = v^3

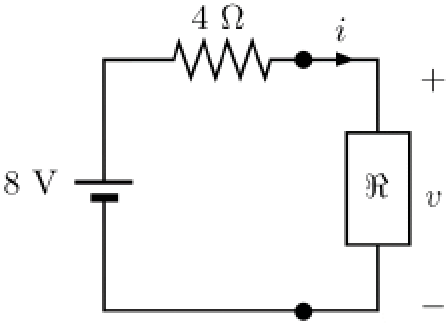
- Come si procede per via analitica?
  - si ricava l'equivalente di Thevenin della parte lineare:

$$-8 + 4i + v = 0$$

  - il resistore nonlineare impone $i = v^3$
  - sostituendo si ottiene:

$$4v^3 + v - 8 = 0$$

  - risolvendo numericamente si ottiene la soluzione.



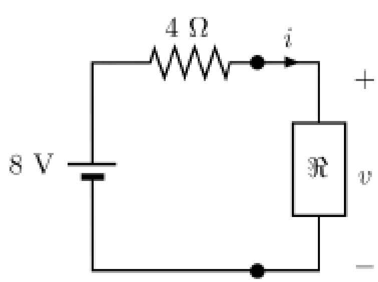
35

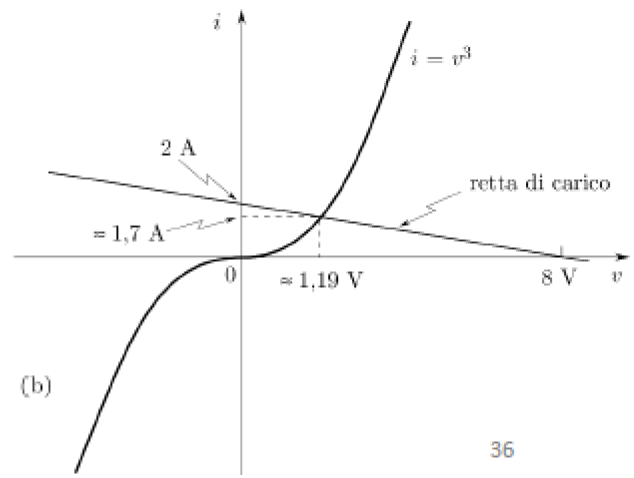
Bipoli non lineari, soluzione grafica

• **La soluzione del circuito può essere trovata come intersezione tra la relazione fissata dalla parte sinistra del circuito (Sx) e la relazione fissata dalla parte destra (Dx)**

Sx: $8V - i*4Ohm - v = 0$ **Dx: $i = v^3$**

- Interpretazione grafica:
  - la sorgente di Thevenin è rappresentata dalla sua <u>retta di carico</u>, sovrapposta alla caratteristica del resistore nonlineare;
  - l'intersezione fornisce il <u>punto di lavoro</u>:
    - in regime nonlineare può non essere unico!





36

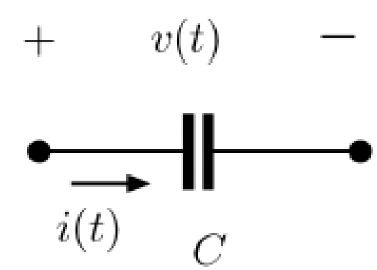
Condensatore

- **Il condensatore è un bipolo non lineare descritto da una caratteristica differenziale. I = C*dV/dt   V = (1/C)∫I*dt = Q/C**
- **In pratica, se si applica una tensione ai suoi capi, il condensatore subito genera/assorbe una corrente che provoca uno spostamento di cariche (in generale, la carica è l'integrale nel tempo della corrente) che si oppone alla tensione applicata, per questo si dice che il condensatore si oppone alle variazioni di tensione memorizzando uno stato di carica.**
- **In DC (dopo un tempo infinito) la corrente ai suoi capi è nulla (circuito aperto)**

❑ Condensatore (1):

❑ relazione caratteristica: $i(t) = C\dfrac{dv(t)}{dt}$

❑ la scelta del verso di riferimento determina il segno!

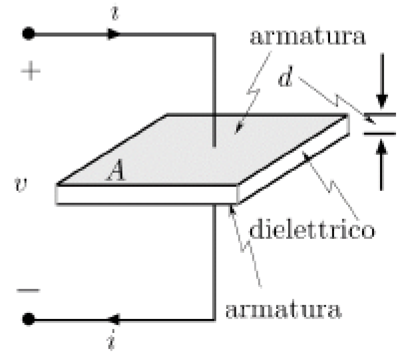


❑ C è detta capacità e si misura in farad [F];

❑ equazione differenziale lineare ➡ elemento dinamico lineare.

Condensatore

Componenti dinamici (2)



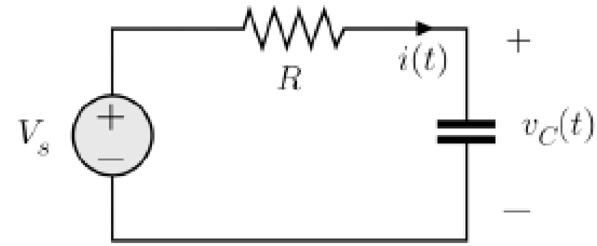
- Condensatore (2):
  - condensatore reale: coppia di conduttori (armature) separate da un isolante (dielettrico);
  - sulle armature si accumulano cariche *+q* e *−q* con $q = Cv$
  - derivando si ottiene proprio la relazione caratteristica $i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv}{dt}$
  - *C* dipende dalla geometria del condensatore;
  - es. per il condensatore a facce piane parallele si ha $C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$
  - valori tipici: tra qualche pF e qualche mF.

4

Condensatore, circuito RC

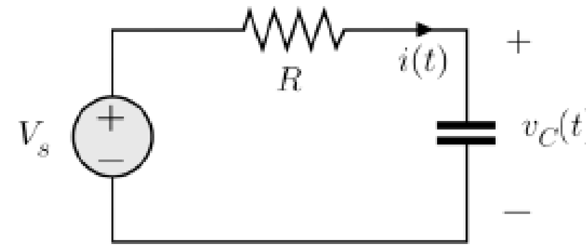
- **Il condensatore ha caratteristica inversa** $$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i(x)dx$$

Circuiti del primo ordine (6)



- <u>Circuito RC</u> (forzante costante):
  - condensatore carico con tensione iniziale $v_C(0)$, si calcola $v_C(t)$;
  - dalla LKT si ha: $V_s = Ri(t) + v_C(t)$
  - sfruttando la relazione caratteristica del condensatore: $V_s = RC\dfrac{dv_C(t)}{dt} + v_C(t)$
  - ovvero $\dfrac{dv_C(t)}{dt} + \dfrac{1}{\tau}v_C(t) = \dfrac{V_s}{\tau}$
  - con la costante di tempo $\tau = RC$ [s]
  - è un'equazione differenziale del primo ordine, lineare, <u>non omogenea</u>, a coefficienti costanti!

Condensatore, circuito RC



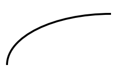
Approccio "fisico"

- Si suppone inizialmente che:

  il condensatore C sia scarico Vc(t0-)=Vs(t0-)=0, quindi i(t0-)=0
- Quando si applica Vs(t0+) = Vs, nella resistenza
scorre la corrente i che carica il condensatore
e Vc(t) aumenta secondo l'equazione di C

$$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i(x)dx$$

- La tensione Vc(t) aumenta, così come la carica immagazzinata in C (la carica è l'integrale nel tempo della corrente) e quindi diminuisce V_R ed i(t), fino a quando i=0 e il condensatore è carico a Vs
- la tensione iniziale aumenta lentamente fino alla tensione finale

  ($1-e^{-x}$ =  da 0 a 1)

$$v_C(t) = v_C(0) + (V_S - v_C(0))\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

Approccio "matematico"

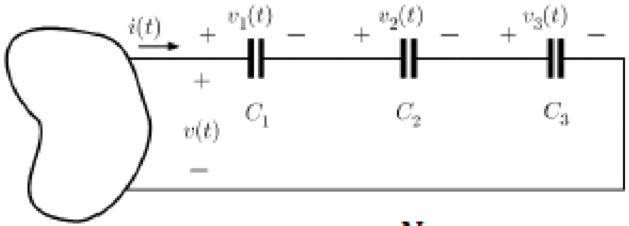
- Il circuito è descritto dall'equazione

$$\frac{dv_C(t)}{dt} + \frac{1}{\tau}v_C(t) = \frac{V_s}{\tau}$$

che ha soluzione $v_C(t) = (v_C(0) - V_s)e^{-t/RC} + V_s$ $\quad x(t) = (x(0) - x(\infty))e^{-t/\tau} + x(\infty)$

Condensatori in serie

Componenti dinamici (14)



- **Condensatori in serie**:

$$\frac{1}{C_s} = \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{C_k}$$

- dalla LKT: $v(t) = v_1(t) + v_2(t) + v_3(t)$
- dalla relazione caratteristica in forma integrale si ha:

$$v(t) = v_1(t_0) + \frac{1}{C_1}\int_{t_0}^{t} i(x)dx + v_2(t_0) + \frac{1}{C_2}\int_{t_0}^{t} i(x)dx + v_3(t_0) + \frac{1}{C_3}\int_{t_0}^{t} i(x)dx$$

- che è equivalente a

$$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C_s}\int_{t_0}^{t} i(x)dx$$

$$v(t_0) = v_1(t_0) + v_2(t_0) + v_3(t_0)$$

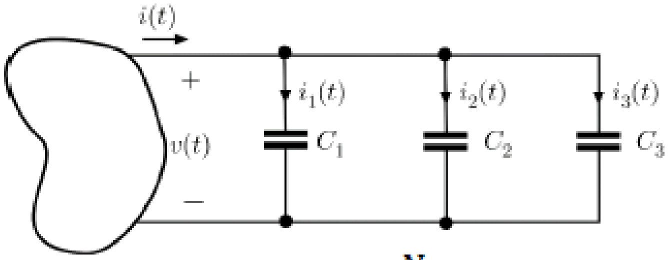
$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

- N condensatori in serie sono equivalenti a un condensatore con capacità C_s e tensione iniziale pari alla somma delle tensioni iniziali.

16

Condensatori in parallelo

Componenti dinamici (15)



- Condensatori in parallelo:
  - dalla LKC: $i(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t)$
  - dalla relazione caratteristica in forma differenziale si ha:

$$i(t) = C_1 \frac{dv}{dt} + C_2 \frac{dv}{dt} + C_3 \frac{dv}{dt}$$

$$C_p = \sum_{k=1}^{N} C_k$$

  - che è equivalente a

$$i(t) = C_p \frac{dv}{dt} \qquad C_p = C_1 + C_2 + C_3 \qquad v(t_0) = v_1(t_0) = v_2(t_0) = v_3(t_0)$$

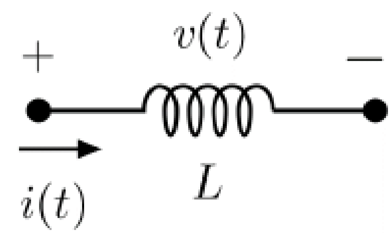
  - *N* condensatori in parallelo sono equivalenti a un condensatore con capacità C_p pari alla somma delle capacità.

17

Induttore

- **L’induttore si oppone alle variazioni di corrente**
- **In DC (dopo un tempo infinito dalla variazione di corrente) la tensione ai suoi capi è nulla (corto circuito)**

Componenti dinamici (9)



- Induttore (1):
  - relazione caratteristica:
    - la scelta del verso di riferimento determina il segno!

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

  - *L* è detta induttanza e si misura in henry [H];
  - è un elemento dinamico lineare.
  - elemento duale rispetto al condensatore:
    - tensione/corrente;
    - induttanza/capacità;
    - flusso/carica.

11

R, C, L: impedenze Z

• L'impedenza Z consta di una parte reale (resistiva) e di una parte immaginaria (reattiva) che dipende dalla frequenza della tensione o della corrente impressa. L'operatore jw si assimila alla derivata; l'operatore inverso 1/jw si assimila all'integrale ($w=2\pi f$)

• Resistori con resistenza R

V = R*I, impedenza resistiva pura, stesso comportamento in DC e in AC, resistenze in serie si sommano

• Capacitori con capacità C

V = I/jwC, impedenza reattiva pura, in DC (w=0) è un circuito aperto (impedenza infinita), alle alte frequenze ($w \to \infty$) è un corto circuito (impedenza nulla), capacità in parallelo si sommano

• Induttori con induttanza L

V = jwL*I, impedenza reattiva pura, in DC è un corto circuito, alle alte frequenze è un circuito aperto, induttanze in serie si sommano

Circuiti R,C,L: analisi qualitativa alle impedenze

- **Circuito RC**

Equazione alla maglia: Vs + RI + I/jwC =0, se Vs=Vs(w) allora

$$Vc(w) = Vs(w)\frac{1/_{jwC}}{R+1/_{jwC}} = Vs(w)\frac{1}{1+jwRC}$$

Alle basse frequenze (w~0, tempi lunghi), allora Vc(t) = Vs(t)

Alle alte frequenze (w~∞, tempi brevi), allora $Vc = \frac{1}{RC}\int Vs(t)dt$

Azione filtro passa-basso (integra le alte frequenze)

- **Circuito CR (stessa equazione alla maglia)**

$$V_R(w) = Vs(w)\frac{R}{R+1/_{jwC}} = Vs(w)\frac{jwRC}{1+jwRC}$$

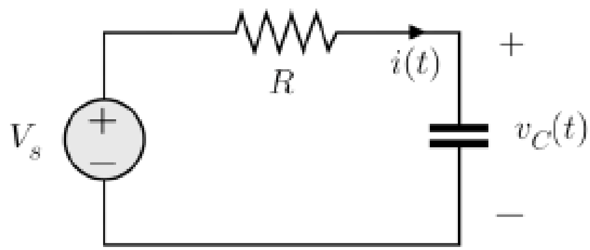
Alle basse frequenze (w~0, tempi lunghi), allora $V_R = RC\frac{dVs(t)}{dt}$

Alle alte frequenze (w~∞, tempi brevi), allora Vc(t) = Vs(t)

Azione filtro passa-alto (la derivata di segnali lenti è piccola)

Esercizi

- Calcolare la costante di tempo τ e la frequenza di taglio f_C



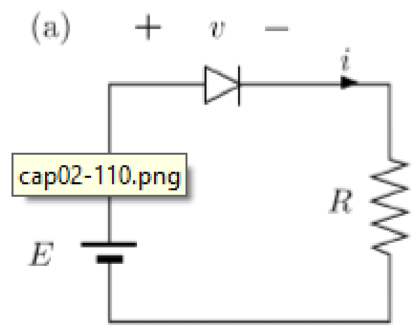
R= 5 kΩ
C= 10 μF
V_S=5 V
$V_C(0)$= 0 V

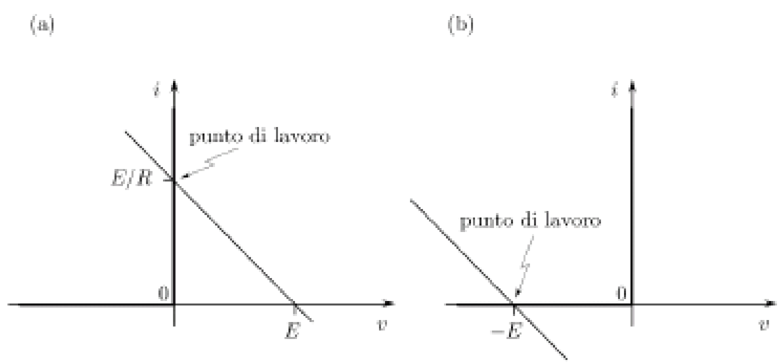
- **Il circuito ha un'equazione** $$\frac{dv_C(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} v_C(t) = \frac{V_s}{\tau}$$
  - **La soluzione dell'eq. differenziale è** $v_C(t) = v_C(0) + (V_S - v_C(0))\left(1 - e^{-t/RC}\right)$
- **La costante di tempo, τ, di un circuito RC è definita come:**
  - **τ = RC, quindi τ= 5 *10^3 * 10 *10^{-6}= 50 * 10^{-3} s = 0,05 s = 50 ms**
- **Dopo quanto tempo V_C = 1V?** $$v_C(t) = 1V = 5V\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$
- **Nel dominio delle frequenze,** $$Vc(w) = Vs(w)\frac{1/jwC}{R + 1/jwC} = Vs(w)\frac{1}{1 + jwRC}$$
  - **La frequenza di taglio, f_C, è la frequenza dove l'attenuazione è pari a 3dB (20log(Vc/Vs)=-3 -> Vc=0,7Vs) ed è il polo della funzione di trasferimento del primo ordine. f_C = 1/2πRC, -> f_C = 1/(2π50*10^{-3}) = 3.2 Hz**

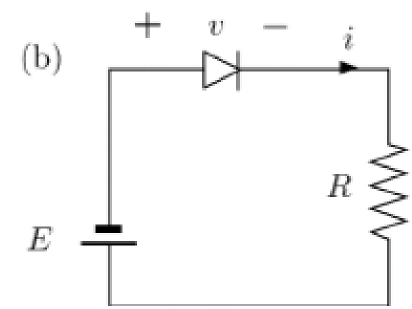
Il diodo visto come bipolo non lineare, DC

- **Il modello ultra-semplificato del diodo descrive un bipolo che in un senso (se v>0) lascia passare tutta la corrente, mentre nell'altro senso (v<0) blocca la corrente (i=0)**

- Esempio:
  - serie di batteria ($E > 0$), resistore, diodo ideale;
  - retta di carico (a), diodo ON: $E = v + Ri$
  - retta di carico (b), diodo OFF: $-E = v + Ri$
  - via analitica: si fanno ipotesi, si verifica lo stato del diodo.





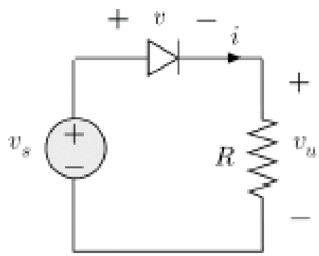


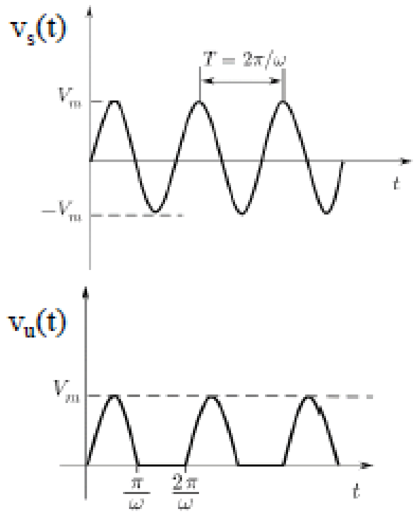
38

Il diodo visto come bipolo non lineare, AC

- **Circuito raddrizzatore**

- Raddrizzatore a una semionda:
  - ingresso sinusoidale $v_s(t) = V_m sin(\omega t)$
  - dalla trattazione precedente:
    - $v_u = v_s$ se $v_s > 0$;
    - $v_u = 0$ se $v_s < 0$.
  - l'uscita ha valor medio diverso diverso da zero:
    - primo passo per la conversione da AC a DC;
    - circuito usato negli alimentatori e nei caricabatterie!





39

Concetti fondamentali

- **Tensione e nodi maglia(/ramo), corrente e nodi, potenza**
- **Segnali DC e AC, periodo, frequenza**
- **Resistenza, parallelo, serie, legge di Ohm, partitore, opposizione al passaggio di corrente**
- **Capacità, parallelo, serie, opposizione a variazioni di tensione**
- **Induttanza, parallelo, serie, opposizione a variazioni di corrente**
- **Impedenze, analisi di circuiti mediante le impedenze**
- **Circuito RC e CR (vedi anche laboratorio)**