# ELETTRONICA ANALOGICA 2018/2019

**GRANDEZZA ANALOGICA** : può assumere con continuità qualunque valore (entro un certo intervallo)

! A differenza di una grandezza logica [DIGITALE] che può assumere solo due valori.

) Parametri caratteristici di una grandezza analogica è il suo andamento temporale :

$$G = \underline{\underline{G(t)}}$$

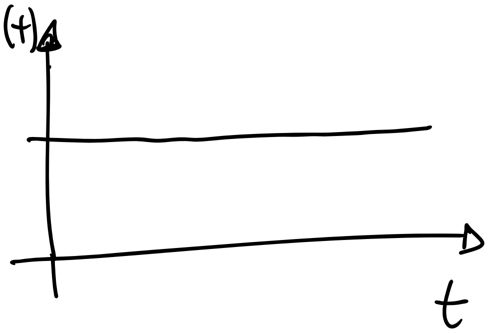
In generale con i dispositivi elettronici analogici si elaborano segnali elettrici analogici con specifiche dipendenze temporali.

## Dipendenze temporali grandezze analogiche

Possiamo distinguere quattro dipendenze temporali:

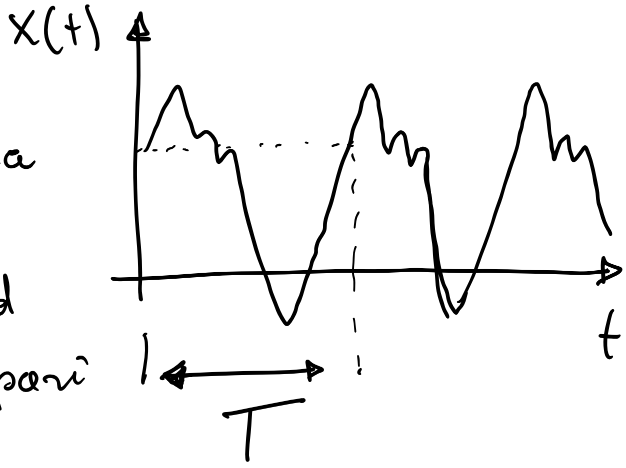
### 1) COSTANTE

La grandezza è costante al variare del tempo.




### 2) PERIODICA

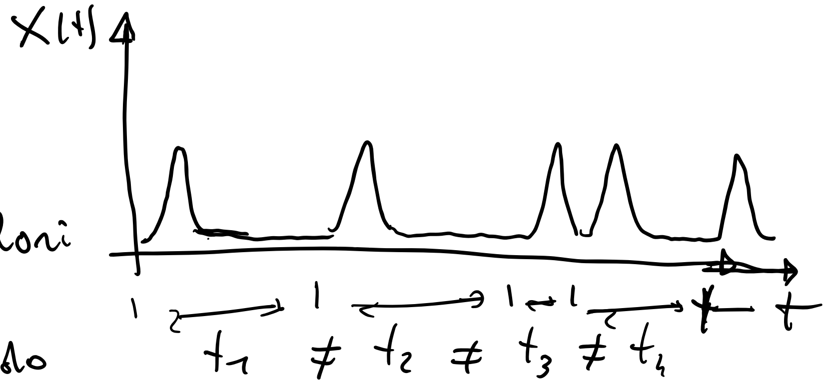
Una particolare forma d'onda si ripete sistematicamente ad intervalli di tempo pari al periodo T.




$$X(t+T) = X(t)$$

### 3) TRANSITORIA (o IMPULSIVA)

La grandezza assume valori $\neq 0$ per un intervallo di tempo finito definendo una forma d'impulso.



L'impulso si può ripetere nel tempo, ma senza seguire una periodicità definita.

⇒ La sequenza temporale della successione degli impulsi potrebbe essere legata al fenomeno fisico che origina gli impulsi

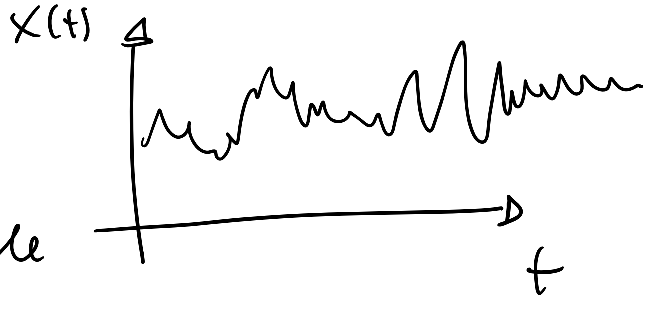
⇒ per esempio segnali provenienti da rivelatori di raggi cosmici seguono una sequenza temporale governata dalla statistica di Poisson.

! Lo stesso impulso si può ripetere in forma, anche se con parametri variabili:

* AMPIEZZA PICCO-PICCO 
* CARICA INTEGRATA 

....

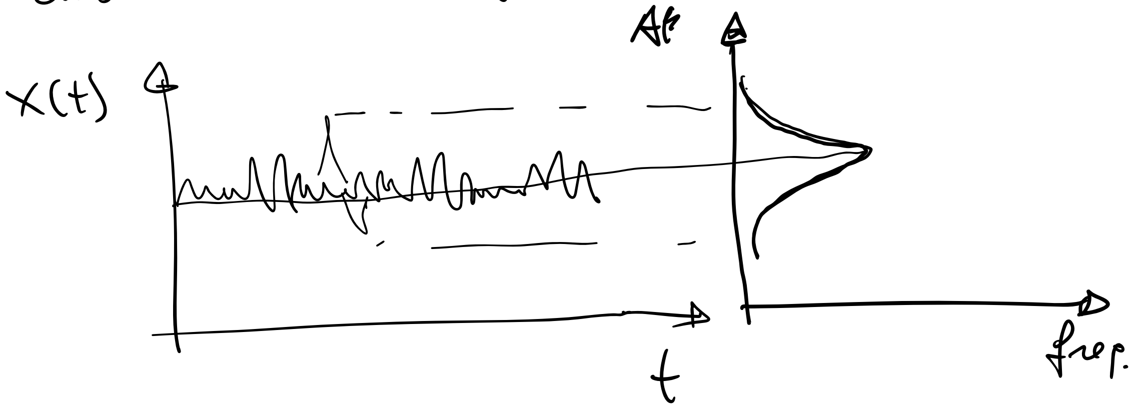
## 4) CASUALI




La grandezza ha un andamento casuale nel tempo.

⇒ di queste grandezze si può studiare lo spettro delle ampiezze.

! Per esempio i segnali dovuti al "RUMORE" elettronico hanno un andamento casuale nel tempo, ma mostrano una distribuzione Gaussiana delle ampiezze:




Il dispositivo elettronico va progettato in base alle caratteristiche dei segnali che si vogliono studiare.

# ANALOGICO ⟺ DIGITALE

Un altro aspetto fondamentale dell'elettronica è la conversione fra segnali analogici e digitali e viceversa.

⇒ In generale ACQUISIZIONE
ELABORAZIONE
STORAGE

si eseguono con dispositivi

DIGITALI :
- MICROCONTROLLORI
- FPGA
- CPU
- PC in generale.

⇒ è fondamentale poter convertire un segnale analogico in digitale

$\boxed{\text{ADC}}$ : Analog to Digital Converter.

⇒ È anche necessario controllare grandezze analogiche attraverso dispositivi digitali

⇒ $\boxed{\text{DAC}}$ Digital to Analog Converter.

# DISPOSITIVI A SEMICONDUTTORI

* Le porte logiche utilizzate in elettronica DIGITALE sono basate su dispositivi a semiconduttori, i quali vanno studiati da un punto di vista analogico.

⇒ DIODO e TRANSISTORE

⇒ si possono realizzare diversi dispositivi più complessi molto utilizzati in elettronica, in particolare:

1) PORTE LOGICHE ⇒ EL. DIG.

2) AMPLIFICATORI !!!

⇒ applicazioni di molti tipi:

- conversione A/D
- discriminatori
- adattatori d'impedenza
- oscillatori
- ....

3) TRASDUTTORI

per convertire in grandezza elettrica una grandezza fisica da misura, per esempio Temperatura ⇒ Tensione.

# TRASDUTTORI

In un setup sperimentale è spesso necessario misurare una grandezza fisica e acquisirla con dispositivi elettronici.
È quindi necessario utilizzare dispositivi definiti trasduttori: dispositivi in grado di fornire un segnale elettrico con una particolare dipendenza funzionale dalla grandezza fisica che si vuole misurare.

ESEMPIO

La resistenza elettrica di un conduttore ha una dipendenza lineare con la temperatura.

$$R(T) = R(T_0)\left[1 + \alpha (T - T_0)\right]$$

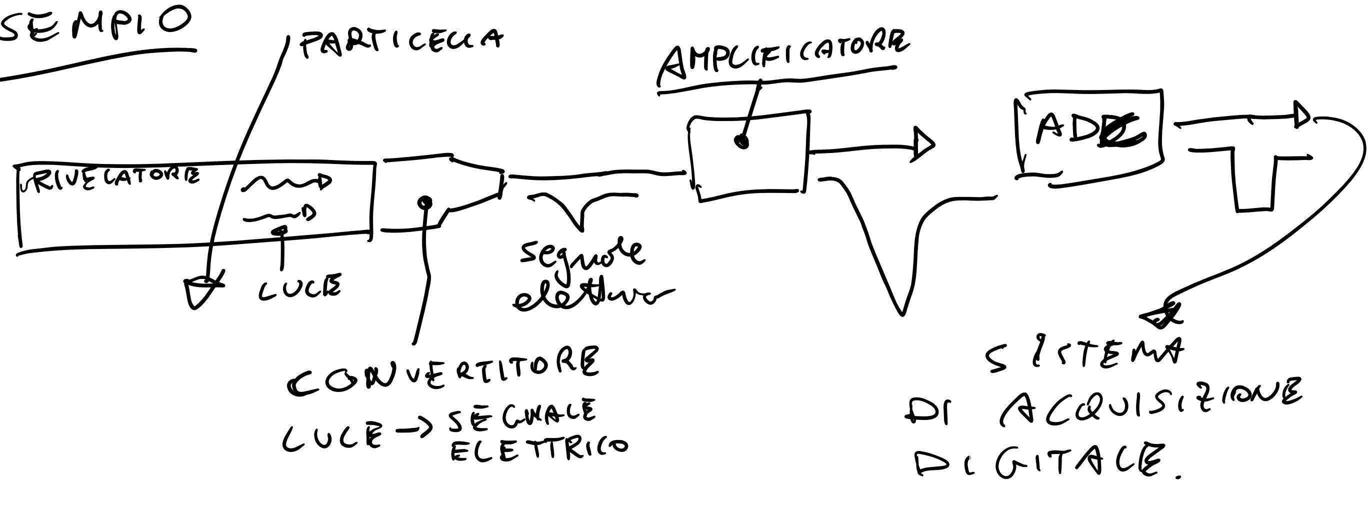
$\alpha$ = coefficiente termico dipendente dal materiale scelto.

Con un sistema elettronico in grado di misurare la resistenza elettrica è quindi possibile misurare indirettamente una temperatura.

## RIVELATORI

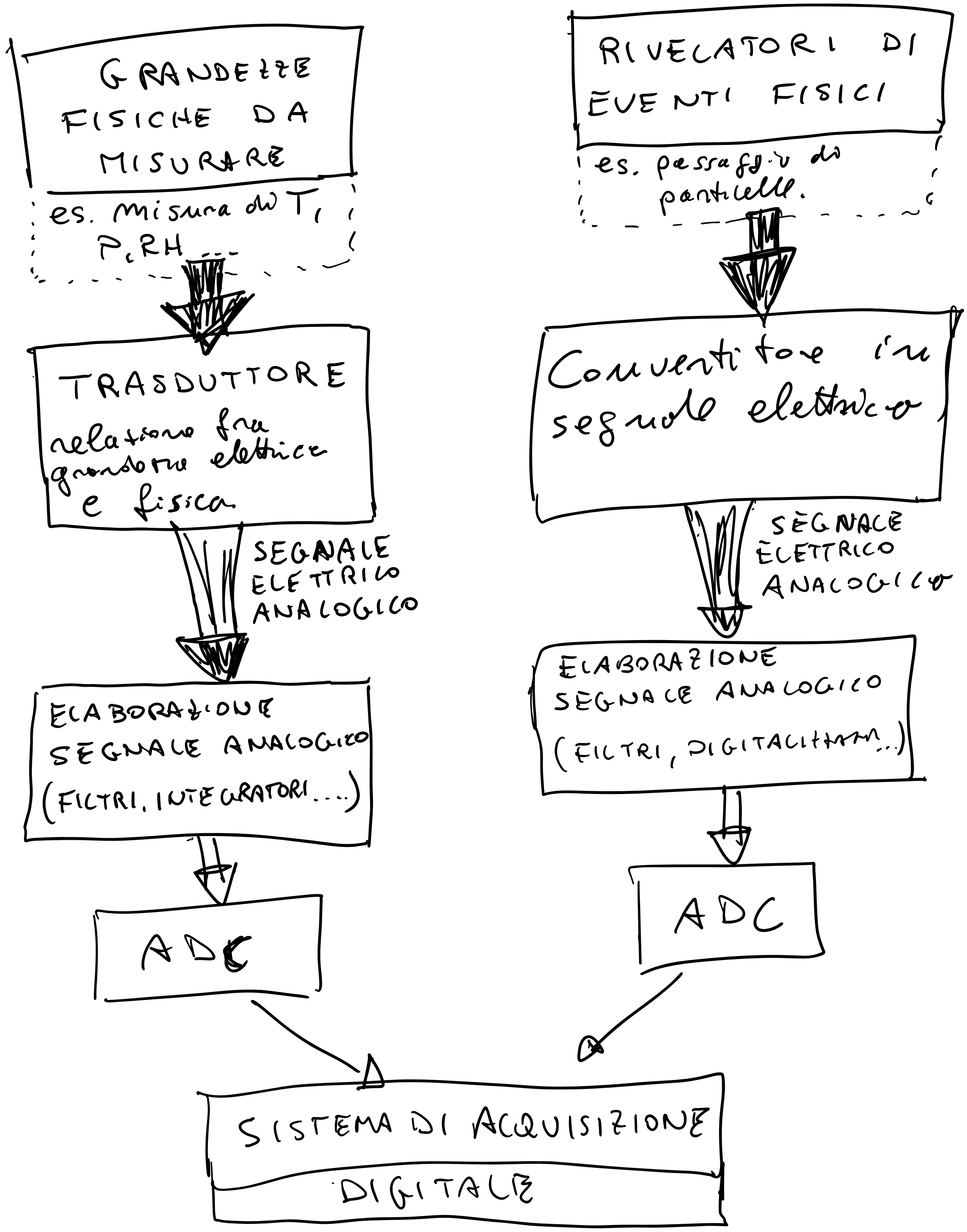
In un setup sperimentale, spesso alcuni eventi fisici sono rivelati attraverso particolari rivelatori. Per esempio per rivelare il passaggio di una particella carica (elettricamente) si utilizzano specifici rivelatori che al passaggio delle particelle emettono luce. Utilizzando particolari dispositivi di conversione della luce in segnale elettrico è possibile studiare "elettronicamente" il passaggio della particella.
Il segnale elettronico primario, in generale necessita di un sistema di elaborazione e acquisizione per poter essere registrato, acquisito e analizzato.

ESEMPIO



# ELETTRONICA PER LA FISICA

Una visualizzazione generale per le applicazioni elettroniche nel campo della fisica può essere schematizzata come segue:



# STRUMENTI UTILI PER L'ANALOGICA

1) NUMERI COMPLESSI → per la rappresentazione delle grandezze sinusoidali con i vettori di Fresnel

2) SVILUPPO IN SERIE DI FOURIER
→ per lo studio delle grandezze el. periodiche.

3) GRANDEZZE ELETTRICHE e loro unità di misura

4) ELEMENTI CIRCUITALI "CONDUTTIVI"

5) LEGGI E PRINCIPI DELLE RETI ELETTRICHE IN CORRENTE CONTINUA E IN REGIME SINUSOIDALE.

* Questi argomenti saranno solo ripassati, in quanto già trattati in Fisica Generale II.

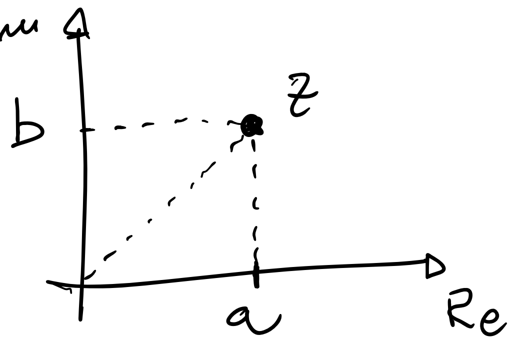
# 1 NUMERI COMPLESSI E GRANDEZZE SINUSOIDALI

Un numero complesso z è costituito da due elementi: REALE + IMMAGINARIA

$$Z = \underbrace{a}_{\text{parte reale}} + \underbrace{j}_{\text{unità immaginaria}}\ \underbrace{b}_{\text{parte immaginaria}}$$

**Def** di unità immaginaria $j^2 = -1$

Z si rappresentano sul piano immaginario (in analogia con i vettori nel piano cartesiano):




Rapp. cartesiana: $Z = a + jb$

Rapp. trigonometrica: $Z = r(\cos\varphi + j\sin\varphi)$

con $r = \sqrt{a^2+b^2}$ <u>modulo</u> di Z

e $\varphi = \operatorname{arctg}\frac{b}{a}$ <u>argomento</u> di Z

Rapp. esponenziale: $Z = r\,e^{j\varphi}$ secondo la formula di Eulero $e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi$.

## Algebra dei $\mathbb{C}$

$$z_1 = a + jb$$
$$z_2 = c + jd$$

## Complesso coniugato

dato $z = a + jb$

il complesso coniug. $z^* = a - jb$

## Somma e sottrazione

$$z_1 \pm z_2 = (a+jb) \pm (c+jd) = (a \pm c) + j(b \pm d)$$

## Prodotto

$$z_1 \cdot z_2 = (a+jb)(c+jd) = ac + jad + jbc + \underbrace{j^2}_{-1} bd$$
$$= (ac - bd) + j(ad + bc)$$
$$z \cdot z^* = (a+jb)(a-jb) = a^2 - j^2 b^2 = a^2 + b^2 = |z|^2$$

## Inverso

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{a+jb} = \frac{(a-jb)}{(a+jb)(a-jb)} = \frac{a-jb}{a^2+b^2}$$
$$= \frac{a}{|z|^2} - j\frac{b}{|z|^2} \Rightarrow \frac{1}{z} = \frac{z^*}{|z|^2}$$

## Quoziente

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_1 \cdot z_2^*}{|z_2|^2}$$

Prodotto / quoziente

$$z_1 z_2 = r_1 e^{i\varphi_1} r_2 e^{i\varphi_2} = r_1 r_2 e^{i(\varphi_1+\varphi_2)}$$
$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1 e^{i\varphi_1}}{r_2 e^{i\varphi_2}} = \frac{r_1}{r_2} e^{i(\varphi_1-\varphi_2)}$$

13

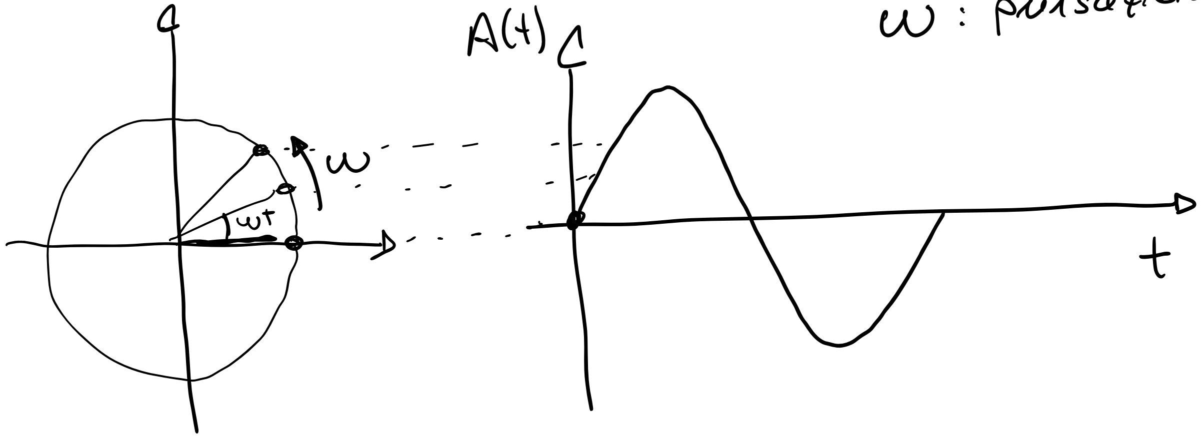
Potenza

$$z^n = (a+jb)^n = r^n e^{jn\varphi}$$

Numeri complessi e grandezze sinusoidali

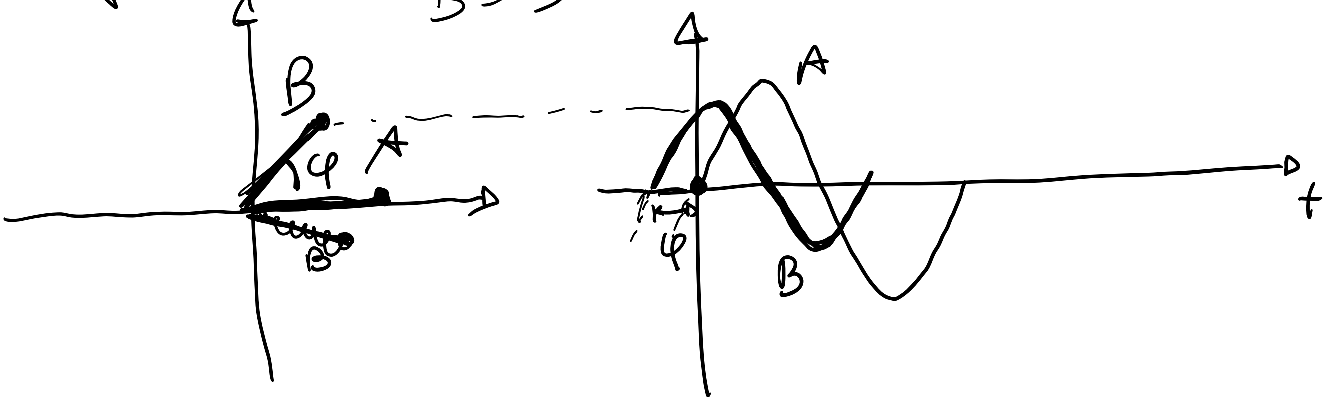
grandezza sinusoidale $\quad A = A_0 \sin \omega t$

$\omega$ : pulsazione




La funzione sinusoidale si può vedere come la proiezione di un vettore ruotante nel piano.

Due grandezze sinusoidali sfasate di una fase $\varphi$ e stessa pulsazione possono essere rappresentate da due vettori ruotanti sfasati :
$$A = A_0 \sin \omega t$$
$$B = B_0 \sin (\omega t + \varphi)$$



comporre $A+B$, $A \cdot B$ .... è più comodo usare $A, B$ espressi come numeri complessi piuttosto che con la funzione sinusoidale.

$$A = A_0$$
$$B = B_0 \cos\varphi + j B_0 \sin\varphi$$

$$A+B = \underbrace{A_0 + B_0 \cos\varphi}_{Re} + j \underbrace{B_0 \sin\varphi}_{Im}$$

oppure

$$A+B = A_0 \sin \omega t + B_0 \sin(\omega t + \varphi)$$
$$= A_0 \sin \omega t + B_0 \sin \omega t \cos\varphi + B_0 \cos \omega t \sin\varphi$$

Perché sono così importanti le grandezze sinusoidali ???

$\Rightarrow$ ogni funzione periodica può essere rappresentata come una sovrapposizione di tante sinusoidi secondo lo sviluppo in serie di Fourier.

## 2 SVILUPPO IN SERIE DI FOURIER

Data una funzione periodica $f(t)$ di periodo $T$ (integrabile), questa si può esprimere secondo lo sviluppo in serie di Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin(n\omega_0 t)$$

dove:

⇒ $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ = PULSAZIONE DELL'ARMONICA FONDAMENTALE

⇒ $n\omega_0$ = pulsazioni delle armoniche di ordine $n$

⇒ $a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t)\, dt$ TERMINE COSTANTE Valor medio di $f(t)$.

⇒ $a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t)\, dt$

⇒ $b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \sin(n\omega_0 t)\, dt$

Ampiezze armoniche di ordine $n$.

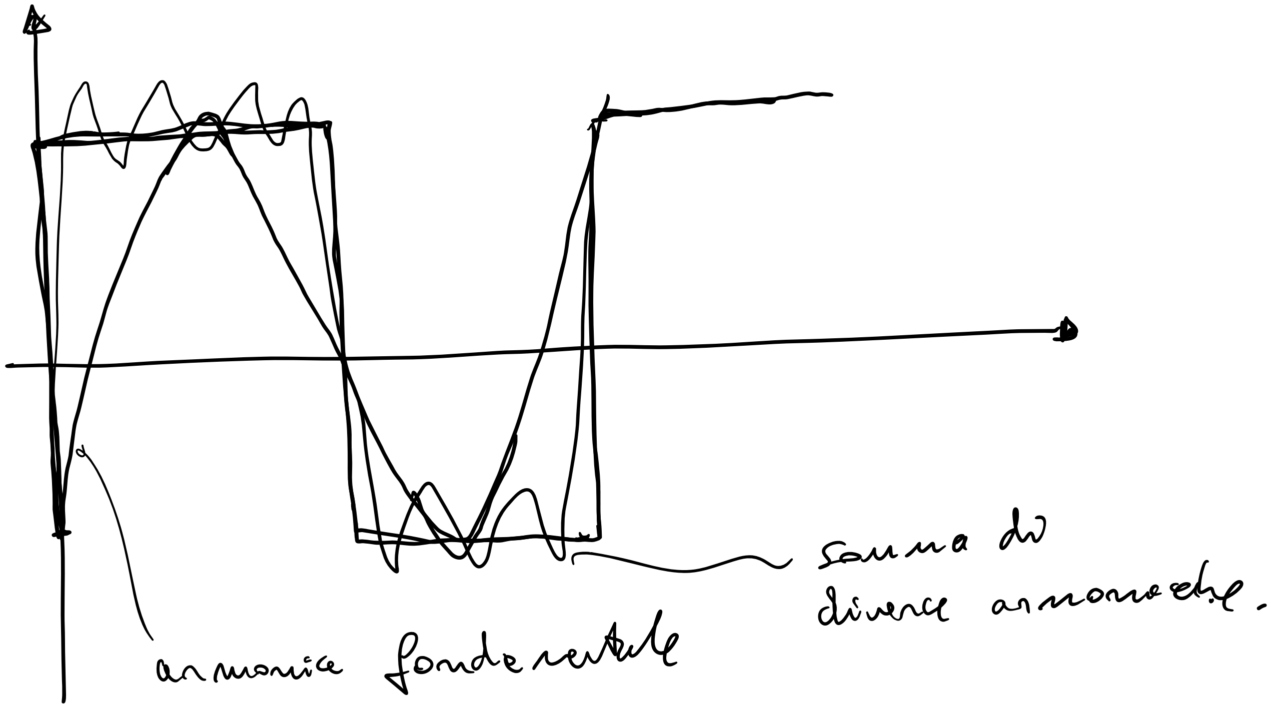
Alcune considerazioni

*) se $f(t)$ è una funzione pari $f(t) = f(-t)$

$\Rightarrow$ avrà solo componenti di tipo $b$

*) se $f(t)$ è dispari $f(t) = -f(-t)$

$\Rightarrow$ avrà solo componenti di tipo $a$

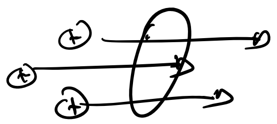



Vedi esercizio con R-Statistics.

# GRANDEZZE ELETTRICHE

**INTENSITÀ DI CORRENTE**: quantità di carica elettrica che attraversa una superficie nell'unità di tempo.

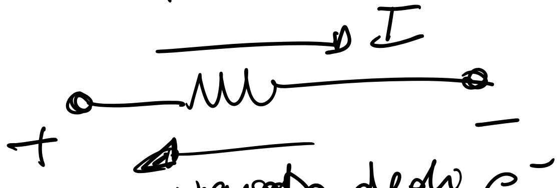
$$\boxed{i = \frac{dQ}{dt}}$$



unità di misura A : Ampere

$$1 A = \frac{1 C}{1 s}$$

Nei conduttori i portatori di carica sono gli $e^-$
$\Rightarrow$ $i$ assume valore negativo, ma nei circuiti si indica sempre il verso degli ipotetici portatori positivi




verso degli $e^-$

**DIFFERENZA DI POTENZIALE ELETTRICO** (d.d.p.)

che si verifica in presenza di un campo elettrico.

Chiamata anche TENSIONE ELETTRICA.

Si misura in Volt [V]

→ Forza em: d.d.p. fornita da un generatore di tensione

→ caduta di tensione: d.d.p. che si verifica ai capi di una resistenza percorsa da corrente.

POTENZA ELETTRICA

Lavoro compiuto / dissipato nell'unità di tempo.

Dato che

$$\mathcal{L} = \Delta Q \cdot \Delta V \quad (\Delta V \text{ costante})$$

Potenza $P = \dfrac{d\mathcal{L}}{dt} = \dfrac{d\Delta Q}{dt} \cdot \Delta V$

$$\Rightarrow \quad P = I \cdot \Delta V$$

Se I e V dipendono dal tempo anche P dipenderà dal tempo.

Vedremo inoltre che nei circuiti in regime sinusoidale con elementi passivi e reattivi avremo due componenti della potenza:

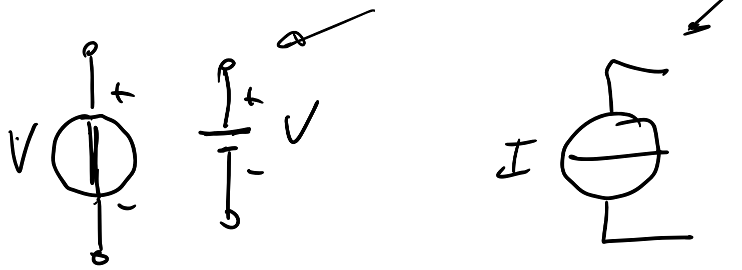
- potenza attiva : realmente dissipata
- potenza reattiva : componente scambiata fra generatore e componente.

## ELEMENTI CIRCUITALI "CONDUTTIVI"

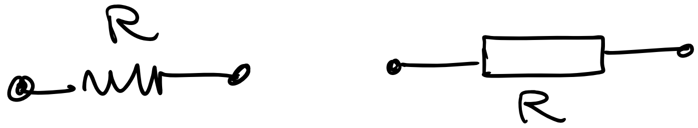
Per conduttori intendiamo non trattare al momento i dispositivi a semiconduttore

ATTIVI: in grado di fornire energia
Generatori di tensione e corrente

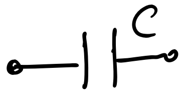
~~PASSIVI~~:

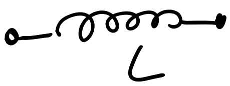



PASSIVI: utilizzano/dissipano energia elettrica, per esempio i resistori

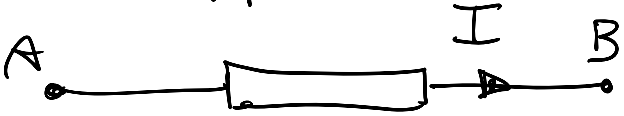



REATTIVI: sono in grado di accumulare energia per poi ricederla al sistema.

CONDENSATORI 


INDUTTANZE 

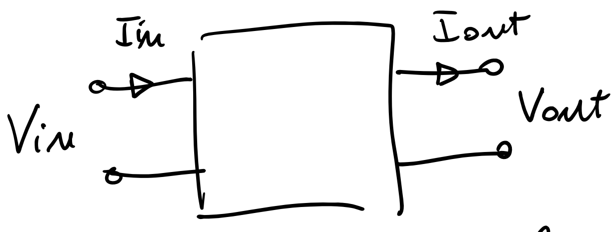

DIPOLI




$I = f(V_{AB})$

La corrente è una funzione della tensione applicata..

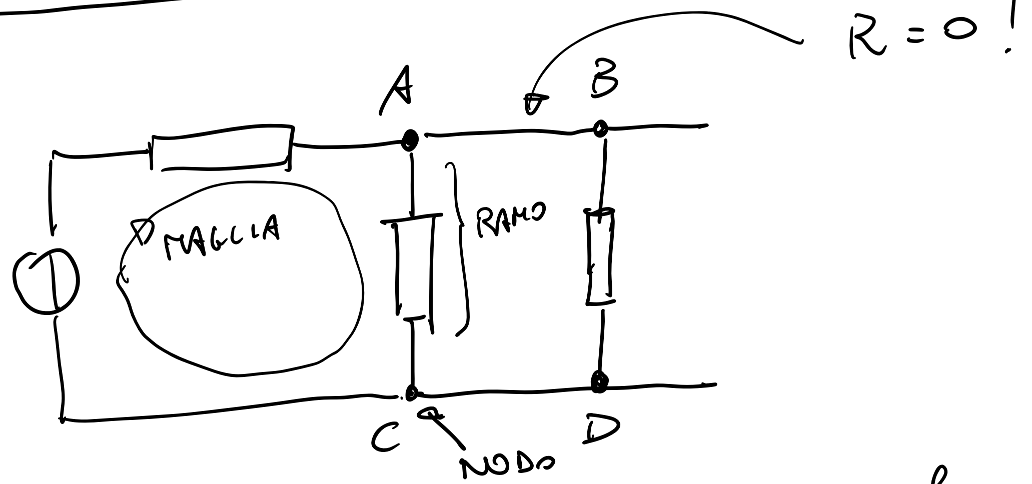
In maniera analoga si definiscono i **QUADRUPOLI**




per i quali si avrà in generale una o più **FUNZIONE DI TRASFERIMENTO**

$$V_{out} = f(V_{in}, I_{in})$$
$$I_{out} = g(V_{in}, I_{in})$$

## CIRCUITI ELETTRICI




**RAMO** : parte di circuito compreso fra due punti
I rami che non contengono dipolo sono intesi conduttori IDEALI con R = 0

**NODO** : parte di circuito in cui confluiscono PIÙ DI DUE RAMI

**MAGLIA** : tratto di circuito chiuso (almeno due rami).

# LEGGI E PRINCIPI RETI ELETTRICHE

## LEGGE DI OHM

$$V = RI$$

## I PRINCIPIO DI KIRCHHOFF (nodo)

per ogni nodo vale $\sum_{n} I_n = 0$

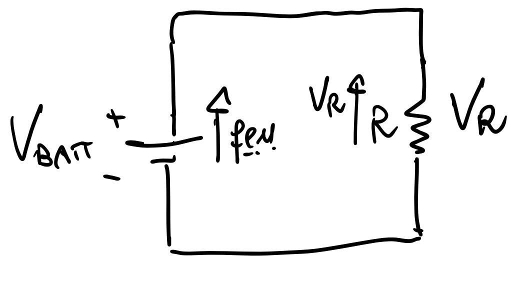
(per il principio di conservazione della carica elettrica)

## II PRINCIPIO DI KIRCHHOFF (maglie)

[deriva dal principio di conservazione dell'energia]

per ogni maglia $\sum_{n} \Delta V_n = 0$

da puntualizzare che percorrendo la maglia in un verso f.e.m. e c.d.t. hanno versi opposti.




$$V_{BATT} = V_R$$

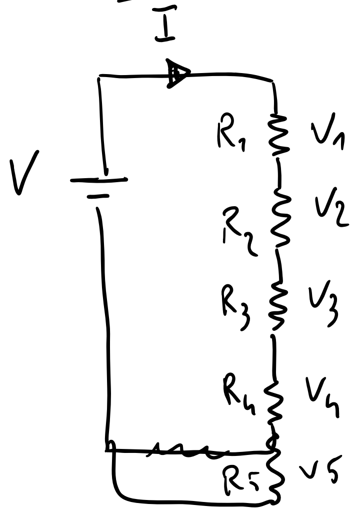
$$\Rightarrow \quad V_{BATT} - V_R = 0$$

oppure si può anche scrivere che

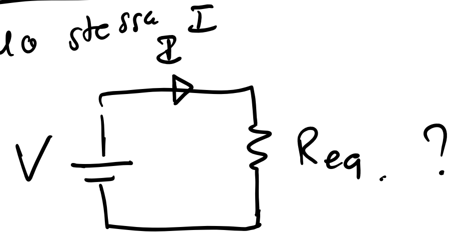
$$\sum f.e.m. = \sum \Delta V$$

# RESISTENZE SERIE e PARALLELO

**SERIE** : R percorse dalla stessa $I$




$\Rightarrow$




per il II Principio di Kirchhoff

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

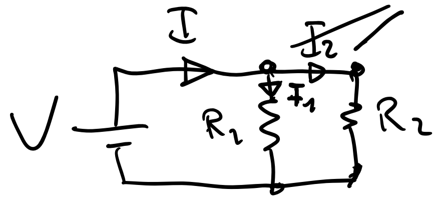
$$R_{eq} \cdot I = R_1 I + R_2 I + R_3 I + R_4 \cdot I + R_5 I$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

$$\Rightarrow \boxed{R_{eq} = \sum_{i=1}^{n} R_i}$$

**PARALLELO** : stessa d.d.p. a tutte le R

punti equipotenziali




$$V = V_1 = V_2$$

per il I Principio di Kirchhoff

$$I = I_1 + I_2$$

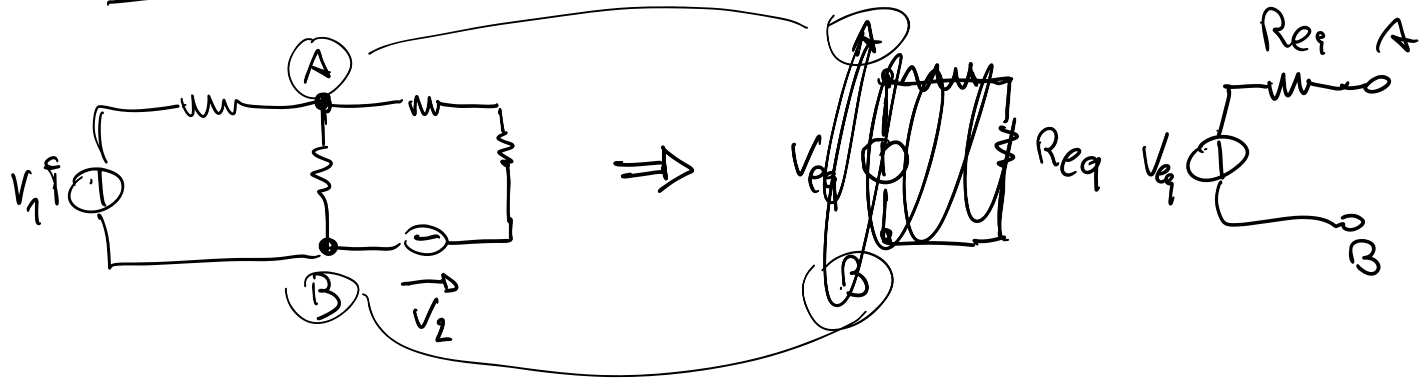
$$\frac{V}{R_{eq}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} \Rightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\Rightarrow R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}}$$

# Altri TEOREMI e PRINCIPI

## TEOREMA DI THEVENIN



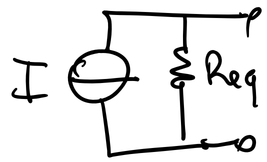

Scelti due nodi ⇒ $V_{eq} = V_{AB}$

Req quella vista da AB

CORTOCIRCUITANDO i gen tensione
aprendo i gen corrente

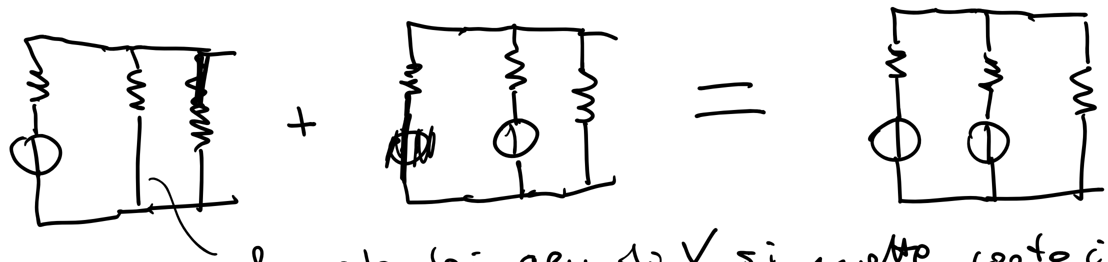
## TEOREMA DI NORTON

Come sopra ma il circuito equivalente sarà




## PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

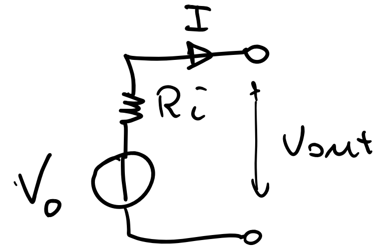
Le reti elettriche sono sistemi lineari, vale quindi il principio di sovrapposizione:



- al posto dei gen di V si mette cortocircuito
- " " " " di I si apre il circuito.

## Riprendiamo gli elementi circuitali

### GENERATORE DI TENSIONE REALE

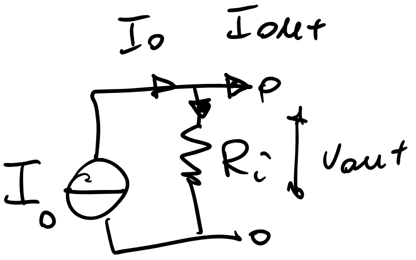



$R_i$ : è una resistenza interna che tiene conto della resistenza complessiva del dispositivo.

in generale $V_{out} = V_0$ SOLO SE NON CIRCOLA CORRENTE $I = 0$ !

$$V_{out} = V_0 - R_i I$$

### GENERATORE DI CORRENTE REALE




$R_i$ : come sopra

$$I_{out} = I_0 - \frac{V_{out}}{R_i}$$

### RESISTENZE

Per i conduttori cilindrici $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$

Offre resistenza al moto dei portatori di carica.

Una R dissipa potenza per effetto Joule riscaldandosi:

$$P = V \cdot I = R \cdot I \cdot I = R \cdot I^2$$

R si misura in Ω Ohm $1\Omega = \frac{1V}{1A}$

## CONDENSATORE

Dispositivo in grado di accumulare carica elettrica, caratterizzato dalla CAPACITÀ:

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$ si misura in Farad [F]

C dipende dalla geometria e dal dielettrico.

In generale il condensatore è caratterizzato da un regime <u>transitorio</u> di funzionamento $\sim$ { carica e scarica.

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \cdot \frac{dV(t)}{dt}$$

L'energia accumulata da un condensatore sarà:

$$W = \int_0^{+\infty} P(t)\,dt = \int_0^{+\infty} V(t) \cdot i(t)\,dt = C \int_0^{+\infty} V \frac{dV}{dt}\,dt$$

$$= C \int_0^{+\infty} V\,dV = \frac{1}{2} C V^2$$

$$\boxed{W = \frac{1}{2} C V^2}$$

# INDUTTANZA

Dispositivo in grado di accumulare energia sotto forma di campo magnetico.

Praticamente un avvolgimento: percorso da corrente crea un campo B il cui flusso è

$\Phi(B) = L \cdot I$ L : coefficiente di autoinduzione o induttanza.

si misura in Henry [H]

Nel caso di corrente variabile nel tempo ai capi si genera

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$ Legge di Neumann-Faraday-Lenz

$\Rightarrow$ il legame fra d.d.p. e corrente è

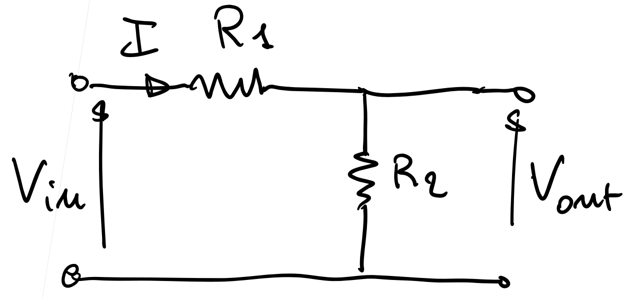
$$V_L(t) = -L\,\frac{d\,i(t)}{dt}$$

l'energia accumulata sarà $w = \frac{1}{2} L I^2$

(28)

# ALCUNI CIRCUITI

## PARTITORE RESISTIVO




Funzione di trasferimento a vuoto (senza $R_c$)

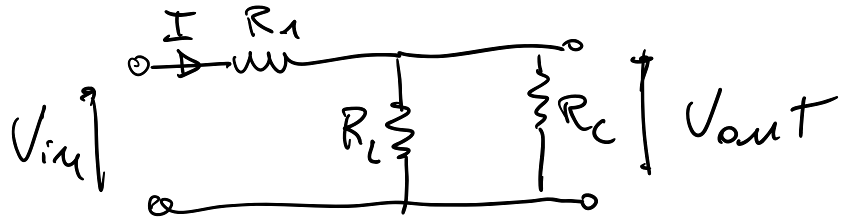
$$V_{out} = V_{in} - R_1 \cdot I \qquad I = \frac{V_{in}}{R_1+R_2}$$

$$= V_{in} - R_1 \frac{V_{in}}{R_1+R_2} = V_{in} \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_1+R_2}\right)$$

$$= V_{in} \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

$$\Rightarrow \quad T = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

Funzione di trasferimento con carico



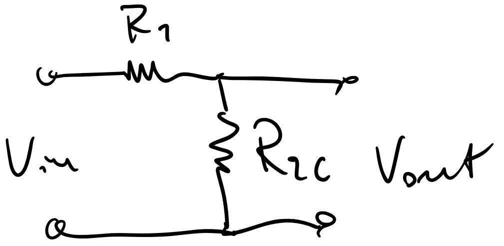

Come prima

$V_{out} = V_{in} - R_1 \cdot I$

ma questa volta I è diversa

$R_2$ ed $R_c$ sono in parallelo

chiamiamo quindi $R_{2c} = \dfrac{R_2 \cdot R_c}{R_2 + R_c}$




$\Rightarrow \quad I = \dfrac{V_{in}}{R_1 + R_{2c}}$

$$\Rightarrow \quad V_{out} = V_{in} \frac{R_{2c}}{R_1 + R_{2c}}$$

$$\Rightarrow \quad T_c = \frac{R_{2c}}{R_1 + R_{2c}}$$

se $R_c \gg R_2 \Rightarrow \dfrac{1}{R_{2c}} = \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_c}$

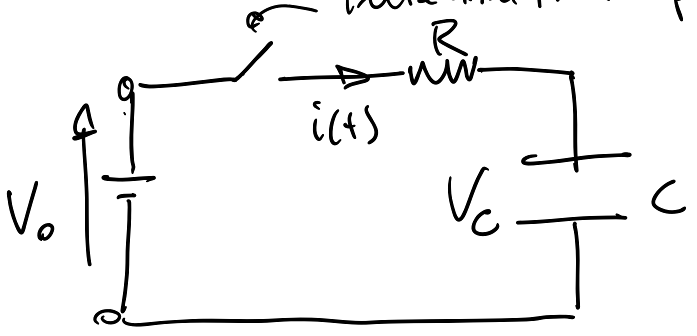
trascurabile

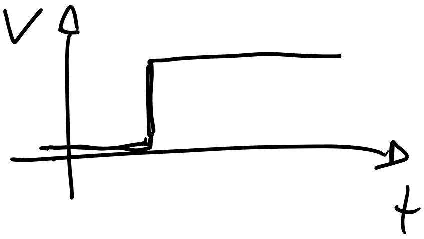
$$\Rightarrow \quad \frac{1}{R_{2c}} = \frac{1}{R_2}$$

$$\Rightarrow \quad T_c \xrightarrow[R_c \to +\infty]{} T$$

# CIRCUITO RC

interruttore per studiare il transitorio di risposta al gradino di tensione




quando si chiude l'interr.

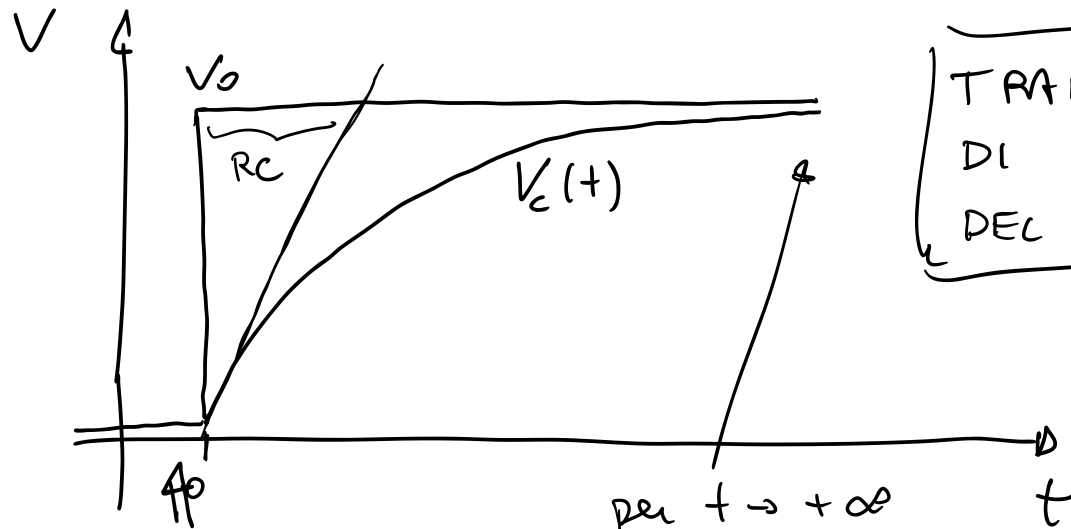
$$V_0 = R\,i(t) + V_c(t) \qquad i(t) = C\,\frac{dV_c(t)}{dt}$$

$$V_0 = RC\,\frac{dV_c(t)}{dt} + V_c(t)$$

eq. diff $\qquad \dfrac{dV_c(t)}{V_0 - V_c(t)} = \dfrac{dt}{RC}$

$$\Rightarrow \quad V_c(t) = V_0\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

$RC = \tau$
COSTANTE DI TEMPO



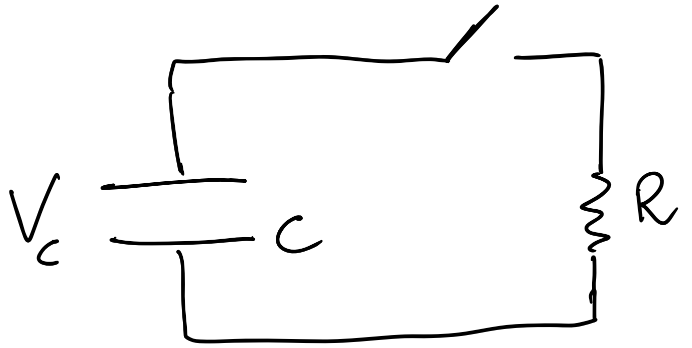

TRANSITORIO DI CARICA DEL CONDENSATORE

come corto circuito

per $t \to +\infty$
C è come circuito aperto.

# SCARICA DEL CONDENSATORE

Caricato il condensatore lo si può scaricare su una resistenza:




Se al tempo $t_0 = 0$ chiudiamo l'interruttore si avrà:

$$V_c(t) = V_0 \, e^{-t/\tau}$$

$V_0$ d.d.p. iniziale ai capi del C carico.