

**ISIS NAUTICO  
“TOMASO DI SAVOIA DUCA DI GENOVA”  
TRIESTE**

**LEZIONI DI ELETTROTECNICA  
ELETTRONICA E CONTROLLI**

**CLASSI QUINTE  
CAPITANI E MACCHINISTI**

**Prof. A. Pascutti**

**A cura di Alessio Glavina,  
classe 5°A a.s. 2009/10**

**2° parte**

## **INDICE:**

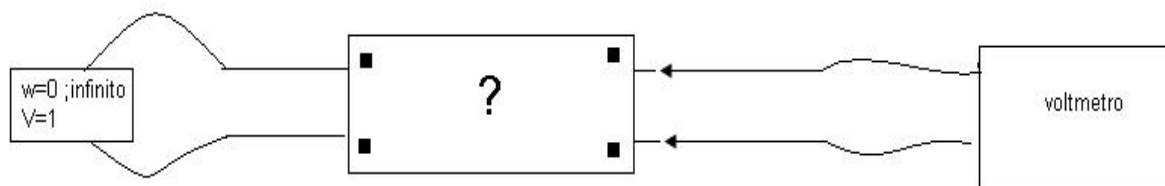
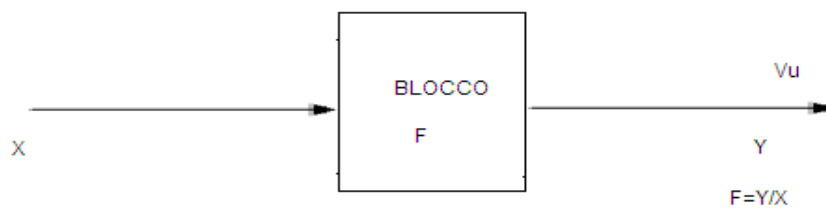
### **MODULO DI ELETTRONICA**

- I. Amplificatori operazionali**
- II. Studio dell'amplificatore operazionale in connessione invertente**
- III. Amplificatore operazionale in connessione non invertente**
- IV. Principio di sovrapposizione degli effetti**
- V. Amplificatore operazionale differenziale**
- VI. Amplificatore operazionale non invertente con partitore**
- VII. Amplificatore operazionale puro**
- VIII. Amplificatore operazionale sommatore**
- IX. Amplificatori in cascata**
- X. Dispositivo sommatore**
- XI. Grafici della somma di due segnali**
- XII. Onda quadra**
- XIII. Concetto di Banda**
- XIV. Filtraggio di un segnale**
- XV. Pericolosità della corrente elettrica**
- XVI. Protezione dell'uomo dai contatti diretti**
- XVII. Limitazione della tensione di contatto**

# Modulo di ELETTRONICA

## CAPITOLO I

### AMPLIFICATORI OPERAZIONALI



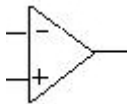
Nel caso in cui la tensione d'ingresso  $V_i$  è unitaria per ogni  $\omega$ , allora  $V_u = F$ , pertanto la  $F$  non è altro che la tensione di uscita quando all'ingresso si ha una tensione unitaria. In sede di misure elettroniche, per tracciare il grafico della  $F$  basta inserire all'ingresso un generatore di segnali (un generatore dove è possibile variare la tensione e la  $\omega$ ) e all'uscita inserire un semplice voltmetro. Si fissano i valori di  $\omega$ , si costruisce una tabella  $\omega$ ;  $F$  e poi si traccia il disegno della funzione.

Quando il modulo di  $F < 1$  il quadripolo si chiama **attenuatore**; mentre quando il modulo è  $> 1$  il quadripolo si chiama **amplificatore**.

- Se  $|F| < 1 \rightarrow$  attenuatore perché:  $V_u = F \cdot V_i \rightarrow V_u < V_i$
- Se  $|F| > 1 \rightarrow$  amplificatore perché:  $V_u = F \cdot V_i \rightarrow V_u > V_i$

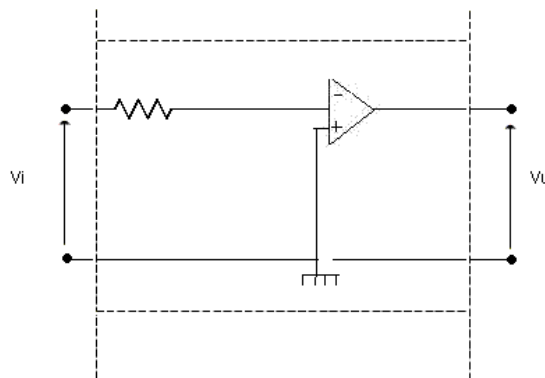
### Proprietà dell'Amplificatore Operazionali ideali;

L'amplificatore operazionale ha il seguente simbolo:

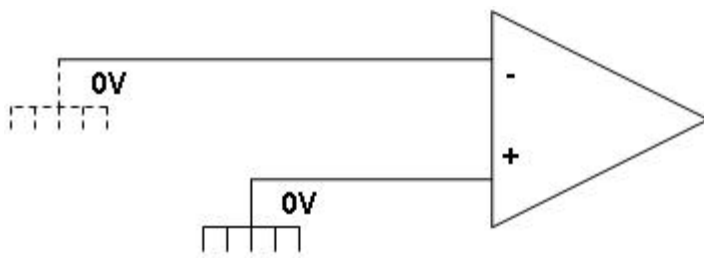


- ingresso invertente
- + ingresso non invertente

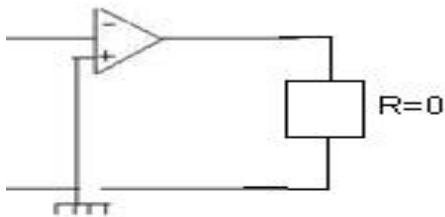
Il quadripolo formato dall'operazionale è il seguente:



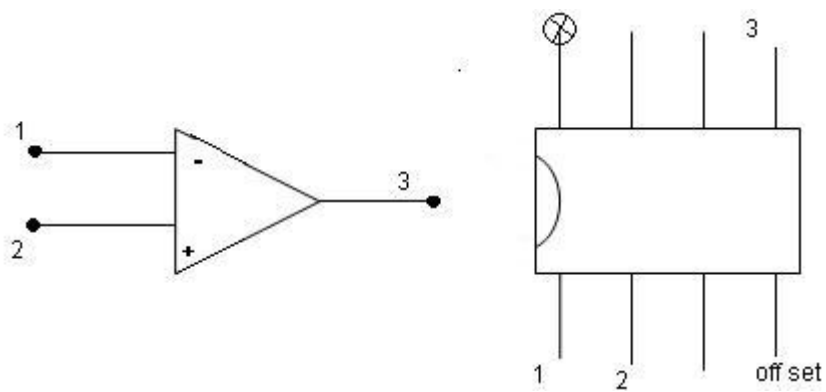
**1 PROPRIETA':** La resistenza tra morsetto  $-$  e  $+$  è chiamata resistenza di ingresso dell'operazionale  $R_i$ . Essa è molto elevata, dell'ordine dei  $100\text{M}\Omega$ , nella teoria è ritenuta  $R_i = \infty\Omega$ . Pertanto fra  $-$  e  $+$  c'è un collegamento con infiniti  $\Omega$ . All'interno di questo collegamento la corrente  $I_i = 0$ , perciò la tensione derivante dalla caduta sulla resistenza  $R_i = 0$ . Ciò significa che il potenziale del morsetto  $+$  è uguale al potenziale del morsetto  $-$  pur non essendoci il collegamento tra  $+$  e  $-$ . Nel nostro caso essendoci il morsetto  $+$  posto a  $0\text{V}$  si ricava che anche il morsetto  $-$  risulta esteso a  $0\text{V}$ . Questo fenomeno si chiama massa virtuale.



**2 PROPRIETA':** La R di uscita è 0.

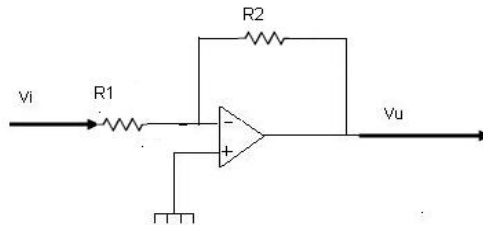


CHIP DELL'AMPLIFICATORE OPERAZIONALE  
CHE TROVEREMO IN LABORATORIO



## CAPITOLO II

### STUDIO DELL'AMPLIFICATORE OPERAZIONALE IN CONNESSIONE INVERTENTE



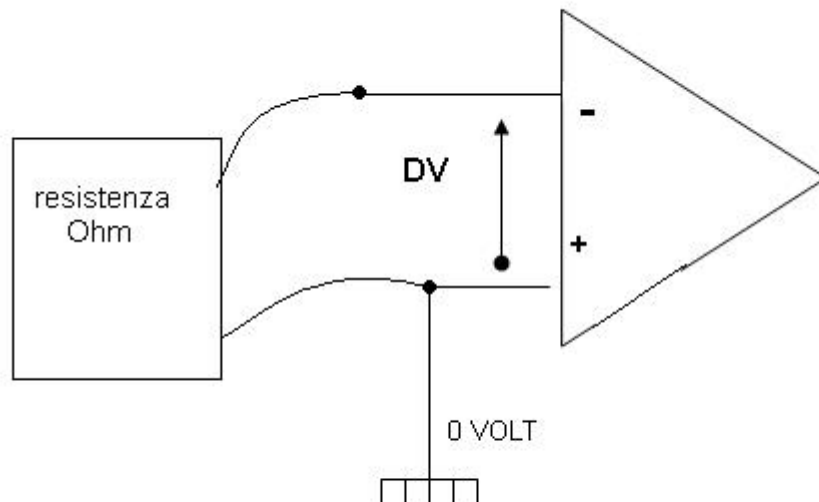
CALCOLARE:

$F=?$

$$F = \frac{Vu}{Vi}$$

Per calcolare la funzione di trasferimento si applicano le seguenti proprietà dell'operazionale:

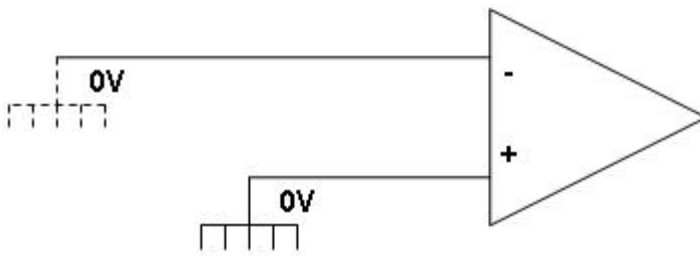
1. **MASSA VIRTUALE:**



$$Ri = \infty * \Omega(100M\Omega)$$

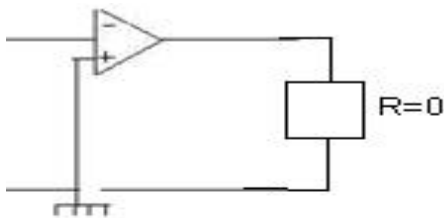
$$Ii = \frac{\Delta v}{Ri} = 0(Ii \cong 0 = 10^{-5} A)$$

$$Ri * Ii \cong 0$$

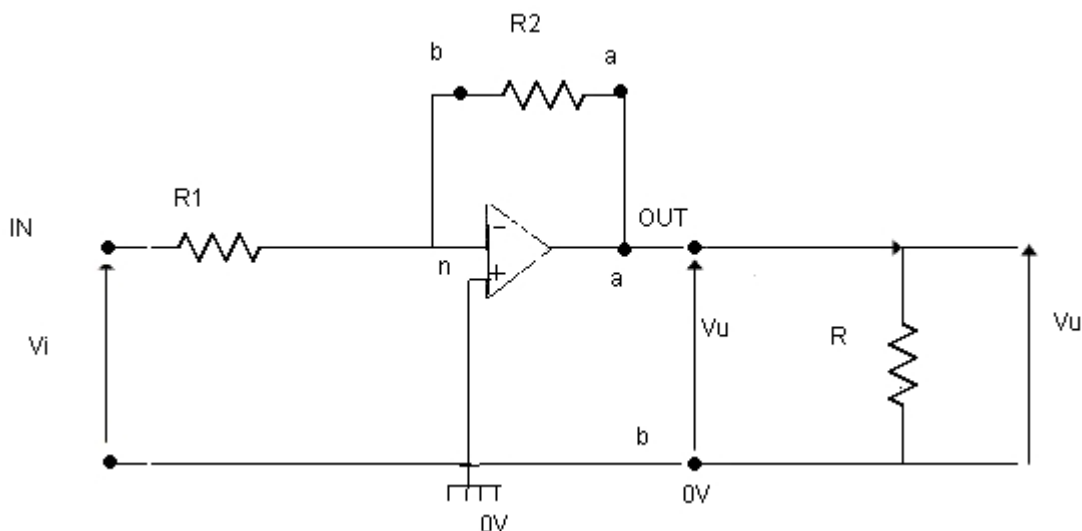


**1 PROPRIETA':** La resistenza tra morsetto - e + è chiamata resistenza di ingresso dell'operazionale  $R_i$ . Essa è molto elevata, dell'ordine dei  $100\text{M}\Omega$ , nella teoria è ritenuta  $R_i = \infty\Omega$ . Pertanto fra - e + c'è un collegamento con infiniti  $\Omega$ . All'interno di questo collegamento la corrente  $I_i=0$ , perciò la tensione derivante dalla caduta sulla resistenza  $R_i=0$ . Ciò significa che il potenziale del morsetto + è uguale al potenziale del morsetto - pur non essendoci il collegamento tra + e -. Nel nostro caso essendoci il morsetto + posto a 0V si ricava che anche il morsetto - risulta esteso a 0V. Questo fenomeno si chiama massa virtuale.

**2 PROPRIETA':** La R di uscita è 0.



CALCOLO DELLA F:



$$\begin{cases} V_u = R2 * I_u \\ I_u = -I_i \quad \Rightarrow V_u = R2 * \left(-\frac{V_i}{R1}\right) = -\frac{R2 * V_i}{R1} \\ I_i = \frac{V_i}{R1} \end{cases}$$

$$F = \frac{V_u}{V_i} = -\frac{R2}{R1} = -\frac{R2}{R1}$$

$$F = -\frac{R2}{R1}$$

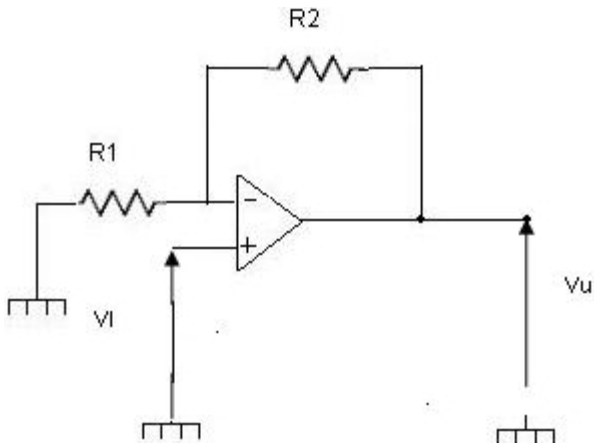
$$V_u = -\frac{R2}{R1} * V_i$$



### CAPITOLO III

#### AMPLIFICATORE OPERAZIONALE IN CONNESSIONE NON INVERTENTE

**SCHEMA A.O. NON INVERTENTE:**



**CALCOLO DI A.**

**Dati:**  $R_1$ ;  $R_2$

**Trovare:**  $A=?$

$$A = \frac{V_u}{V_i} \Rightarrow \text{cerco } V_u \text{ dallo schema}$$

$$\begin{cases} (V_u - V_i) = R_2 * I_u \\ I_u = \frac{V_i}{R_1} \end{cases}$$

$$V_u - V_i = R_2 * \frac{V_i}{R_1}$$

$$V_u = V_i + \frac{R_2}{R_1} * V_i$$

$$V_u = V_i * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\frac{V_u}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

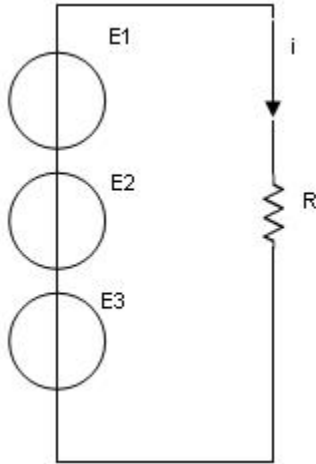
$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- $$F = 1 + \frac{R2}{R1}$$
- Il numero A è sempre positivo quindi non è invertente.
- Inoltre il numero A è sempre >1, quindi questo circuito non può funzionare da attenuatore.

## CAPITOLO IV

### PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI

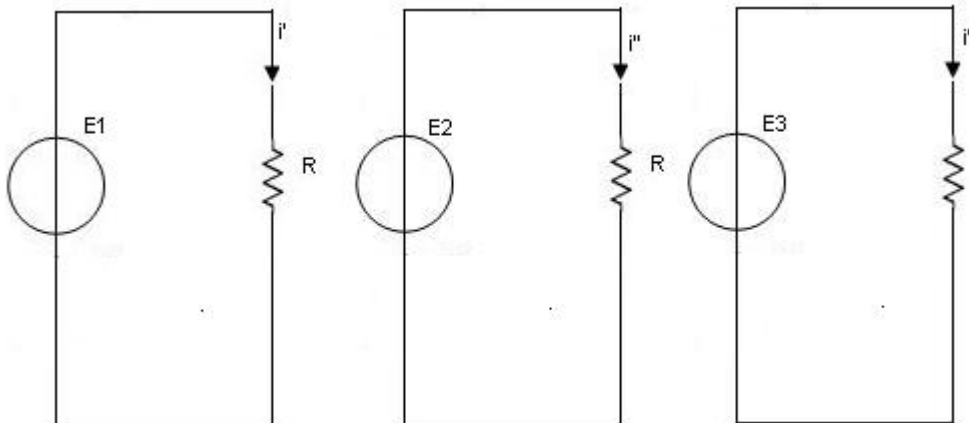
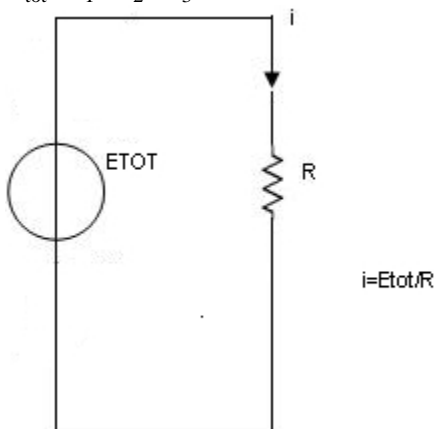
Questo principio si può applicare in tutte le materie scientifiche e vale quanto segue.  
Si consideri il seguente circuito comprendente tre effetti:



DATE LE CAUSE E LA R, TROVARE  $i$ .

SOLUZIONE:

$$E_{\text{tot}} = E_1 + E_2 + E_3$$



$$i = \frac{E_{\text{tot}}}{R} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R} = \frac{E_1}{R} + \frac{E_2}{R} + \frac{E_3}{R} = i' + i'' + i'''$$

### SOMMA DEGLI EFFETTI (ALGEBRICA)

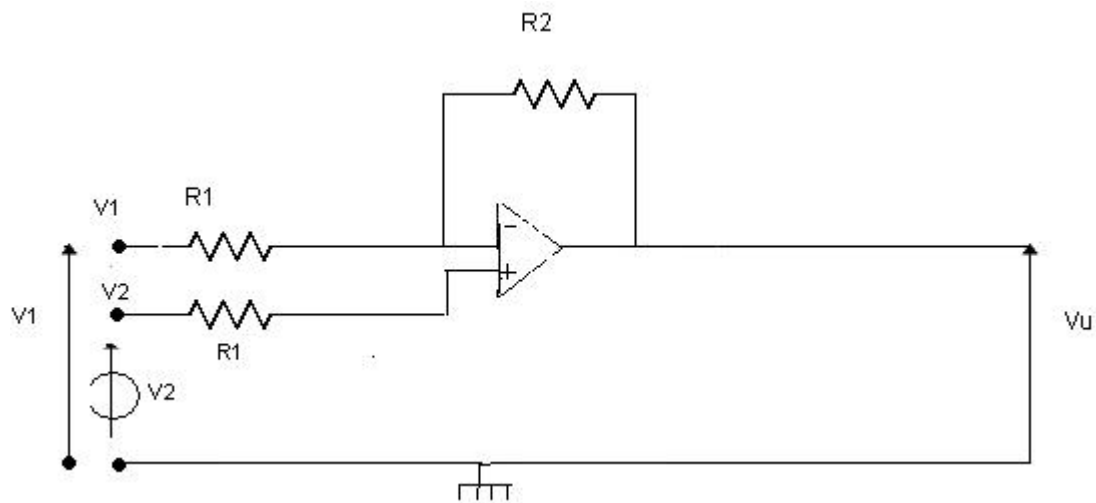
Da questi semplici passaggi si ottiene che, un sistema soggetto a più cause, risponde con un effetto che risulta essere la somma degli effetti singoli.

Un effetto singolo risulta il comportamento del sistema (o la risposta) sollecitato da un singolo effetto.

OSSERVAZIONE: per somma s'intende la somma algebrica, pertanto possono esserci sia segni +, che segni -, ricordando che un effetto è negativo se è contrario agli altri effetti.

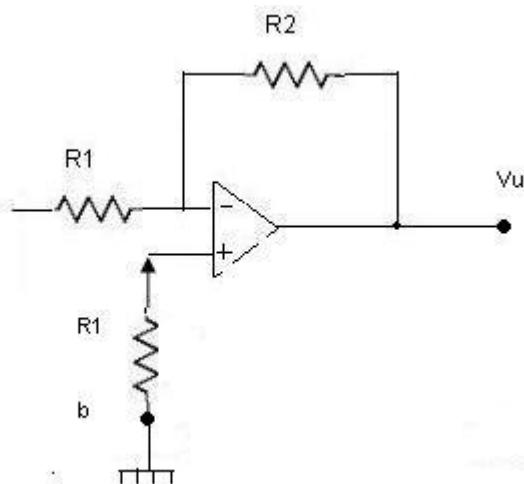
## CAPITOLO V

### AMPLIFICATORE OPERAZIONALE DIFFERENZIALE



Questo schema amplificatore ha due cause ( $V_1$  e  $V_2$ ), pertanto la tensione di uscita è formata da due effetti;  $V_u = V_u' + V_u''$

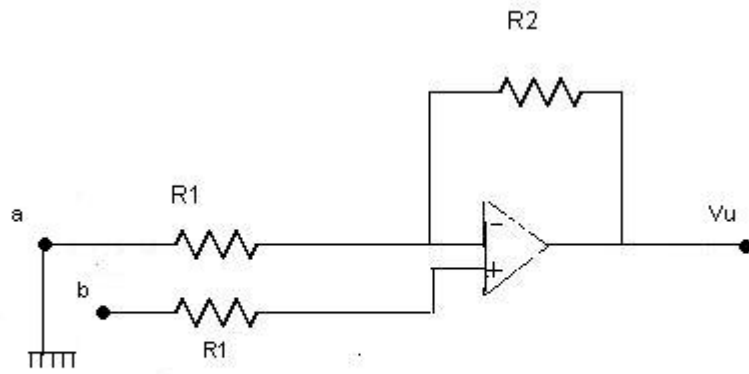
Calcolo di  $V_u'$ : PRIMO EFFETTO.



$$A1 = -\frac{R2}{R1}$$

$$V_u' = A1 * V1$$

Calcolo di  $V_u''$ : SECONDO EFFETTO.



$$A_2 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_u'' = A_2 * V_2$$

SOMMA DEGLI EFFETTI.

$$V_u = V_u' + V_u''$$

$$V_u = A_1 * V_1 + A_2 * V_2$$

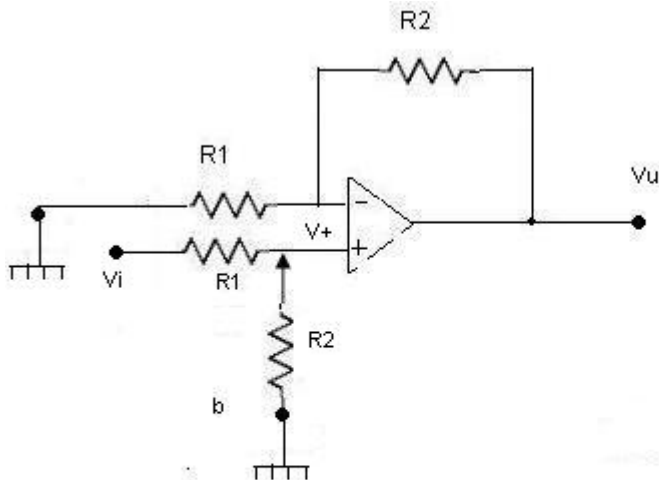
$$V_u = -\frac{R_2}{R_1} * V_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) * V_2$$

## CAPITOLO VI

### AMPLIFICATORE OPERAZIONALE NON INVERTENTE CON PARTITORE DI INGRESSO

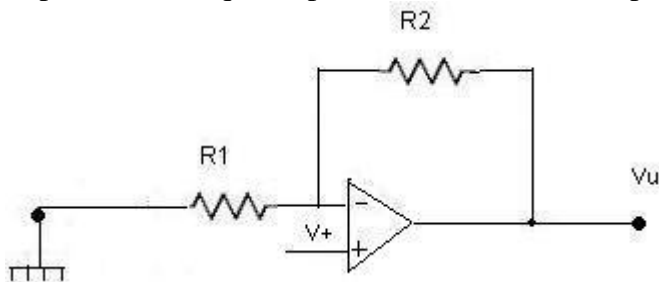
Questo amplificatore serve per arrivare all'amplificatore operazionale differenziale puro.

SCHEMA ELETTRICO:



TROVARE L'AMPLIFICAZIONE  $A = \frac{V_u}{V_i}$ :

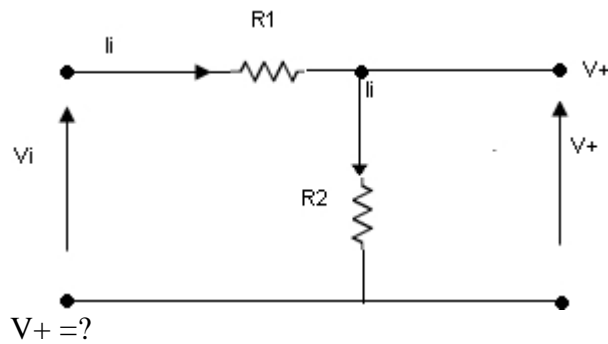
Si può risolvere questo problema dividendolo in piccoli "problemi":



$$A = \frac{V_u}{V_+} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

$$V_u = A * V_+$$

### CIRCUITO DEL PARTITORE DI TENSIONE:



$V_+ = ?$

$$\begin{cases} V_+ = R_2 * I_1 \\ I_1 = \frac{V_i}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$V_+ = R_2 * \frac{V_i}{R_1 + R_2}$$

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_i$$

### FORMULA DEL PARTITORE DI TENSIONE

- DA  
AMPLIFICATORE  
OPERAZIONALE  
NON INV:
  - DAL PARTITORE
- $$\begin{cases} V_u = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) * V_+ \\ V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_i \end{cases}$$

### SOSTITUENDO:

$$V_u = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) * \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_i$$

$$A = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) * \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow A = + \frac{R_2}{R_1}$$

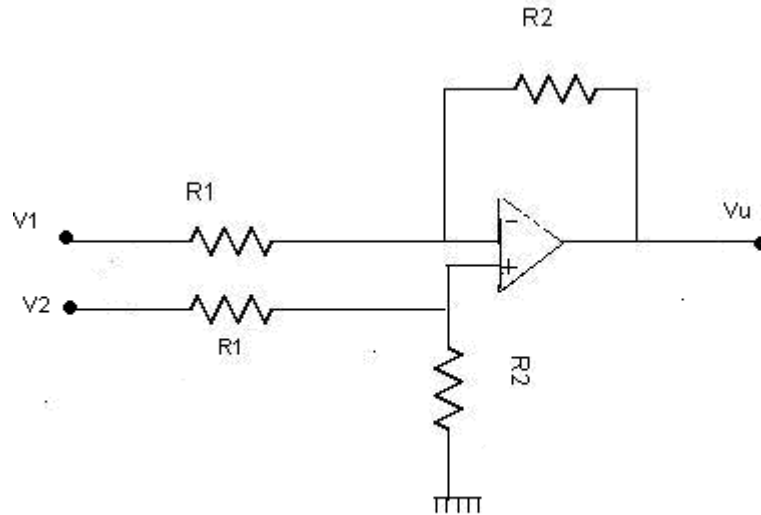
Si deduce quindi che l'aggiunta del partitore produce un'amplificazione uguale a quella dell'invertente, ma con l'aggiunta del segno positivo.

$$F = + \frac{R_2}{R_1}$$



## CAPITOLO VII

### AMPLIFICATORE DIFFERENZIALE PURO

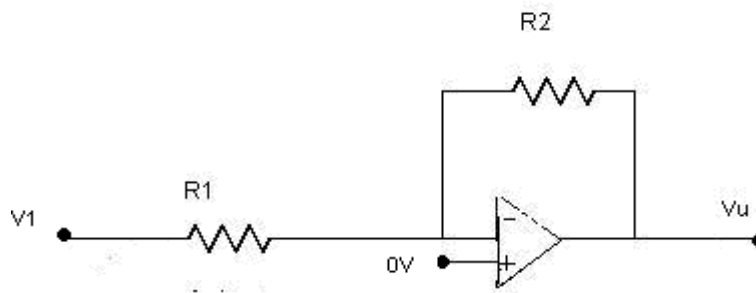


In questo caso abbiamo due segnali di ingresso,  $V_1$  e  $V_2$ . Pertanto, applicheremo il principio di sovrapposizione degli effetti:

$$V_u = V_u' + V_u''$$

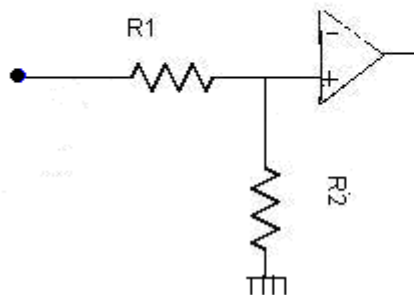
Il primo effetto tiene conto della  $V_1$  e la  $V_2$  va a massa; mentre il secondo effetto tiene conto della  $V_2$  e la  $V_1$  va a massa.

- 1) EFFETTO: si tiene conto della  $V_1$  e la  $V_2$  va a massa:



## FOTOGRAMMA:

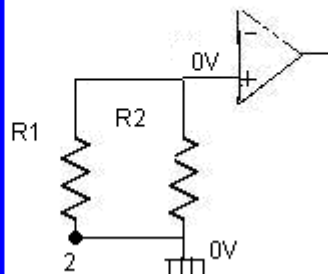
1°



1° EFFETTO:

$$Vu' = -\frac{R2}{R1} * V1$$

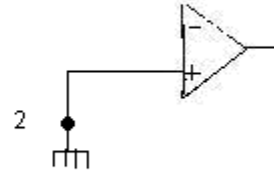
2°



2° EFFETTO:

$$Vu'' = +\frac{R2}{R1} * V2$$

3°



PER CONCLUDERE SOMMIAMO GLI EFFETTI:

$$Vu = Vu' + Vu''$$

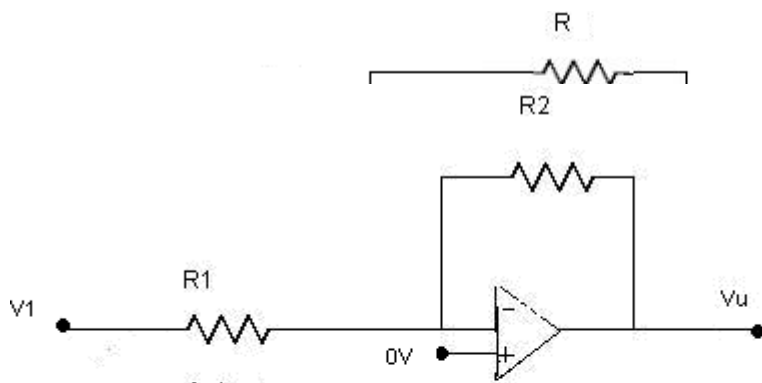
$$Vu = -\frac{R2}{R1} * V1 + \frac{R2}{R1} * V2$$

$$Vu = -\frac{R2}{R1} * (V1 - V2)$$

$$Vu = -\frac{R2}{R1} * \Delta v$$

## CAPITOLO VIII

### AMPLIFICATORE SOMMATORE



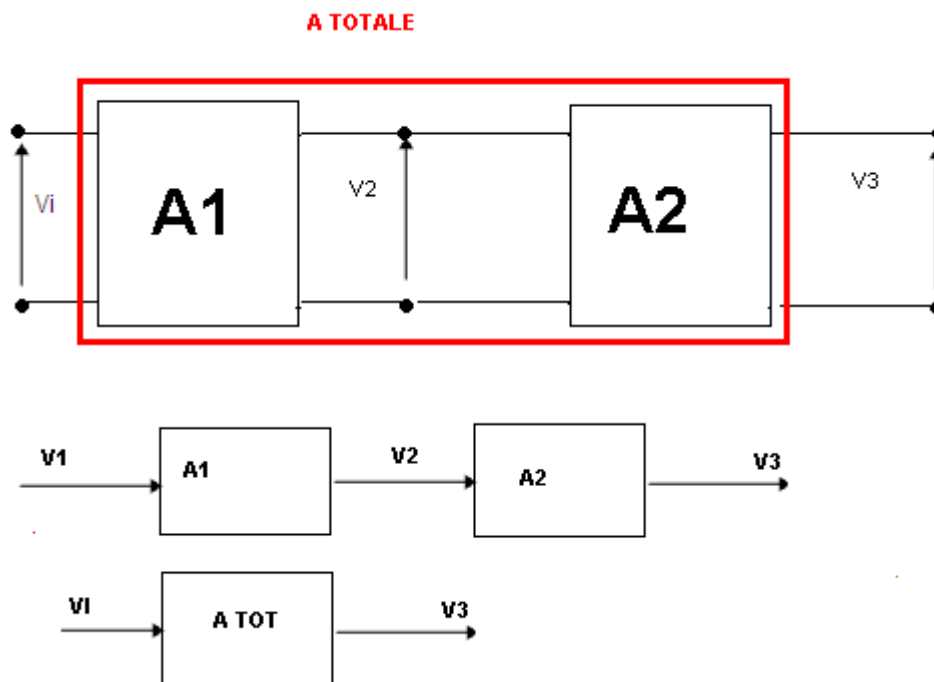
#### **SOLUZIONE:**

$$V_u = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) * V_i \quad \text{SOMMA DEGLI EFFETTI: } V_u = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) * \sum_1^n i * V_i$$

## CAPITOLO IX

### AMPLIFICATORI IN CASCATA

Due o più amplificatori si dicono collegati in cascata quando l'uscita dell'uno è collegata con l'ingresso dell'altro, come in figura:



**Dati:**

$A_1$  E  $A_2$

**Trovare:**

$A_{tot}=?$

SOLUZIONE:

$$\text{essendo: } \begin{cases} A_1 \cong \frac{V_2}{V_1} \rightarrow V_2 = A_1 * V_1 \\ A_2 \cong \frac{V_3}{V_2} \rightarrow V_3 = A_2 * V_2 \end{cases}$$

$$V_3 = A_2 * (A_1 * V_1) \rightarrow V_3 = A_1 * A_2 * V_1$$

$$A_{tot} \cong \frac{V_3}{V_1} \rightarrow V_3 = A_{tot} * V_1$$

Si osserva che l'amplificazione totale di due o più blocchi in cascata si calcola eseguendo il prodotto delle singole amplificazioni.

Nel caso in cui l'amplificazione è espressa in db allora vale la seguente espressione:

$$A_{totdb} = 20 * \log A_{tot}$$

$$A_{totdb} = 20 * \log(A_1 + A_2)$$

$$A_{totdb} = 20 * (\log A_1 + \log A_2)$$

$$A_{totdb} = 20 \log A_1 + 20 \log A_2$$

$$A_{totdb} = A_{1db} * A_{2db}$$

## CAPITOLO X

### DISPOSITIVO SOMMATORE

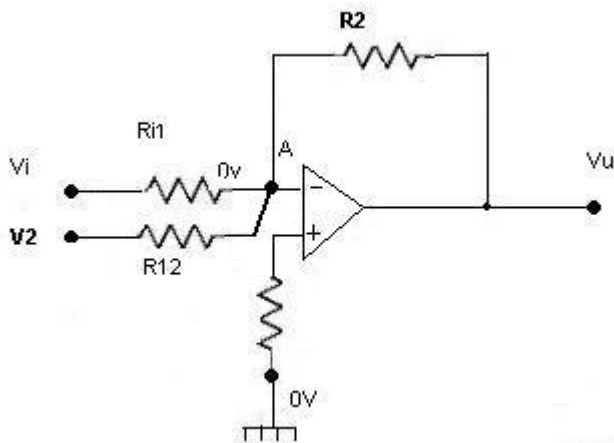
Abbiamo visto che l'amplificatore differenziale esegue la differenza dei segnali di ingresso. Allo stesso modo è possibile avere un amplificatore operazionale che esegue la somma dei segnali di ingresso. Il circuito è il seguente:

**Dati:**

$R_2$ ;  $R_1$ ;  $R_{i2}$ ;  $R_{i1}$ ;  $V_1$  e  $V_2$

**Trovare:**

$V_u = ?$



Soluzione:

$$\begin{cases} V_u = R_2 * I_2 \\ I_2 = (I_{i1} + I_{i2}) \\ I_{i1} = \frac{V_1}{R_{i1}} \\ I_{i2} = \frac{V_2}{R_{i2}} \end{cases} \quad \text{KIRCHHOFF AL NODO A}$$

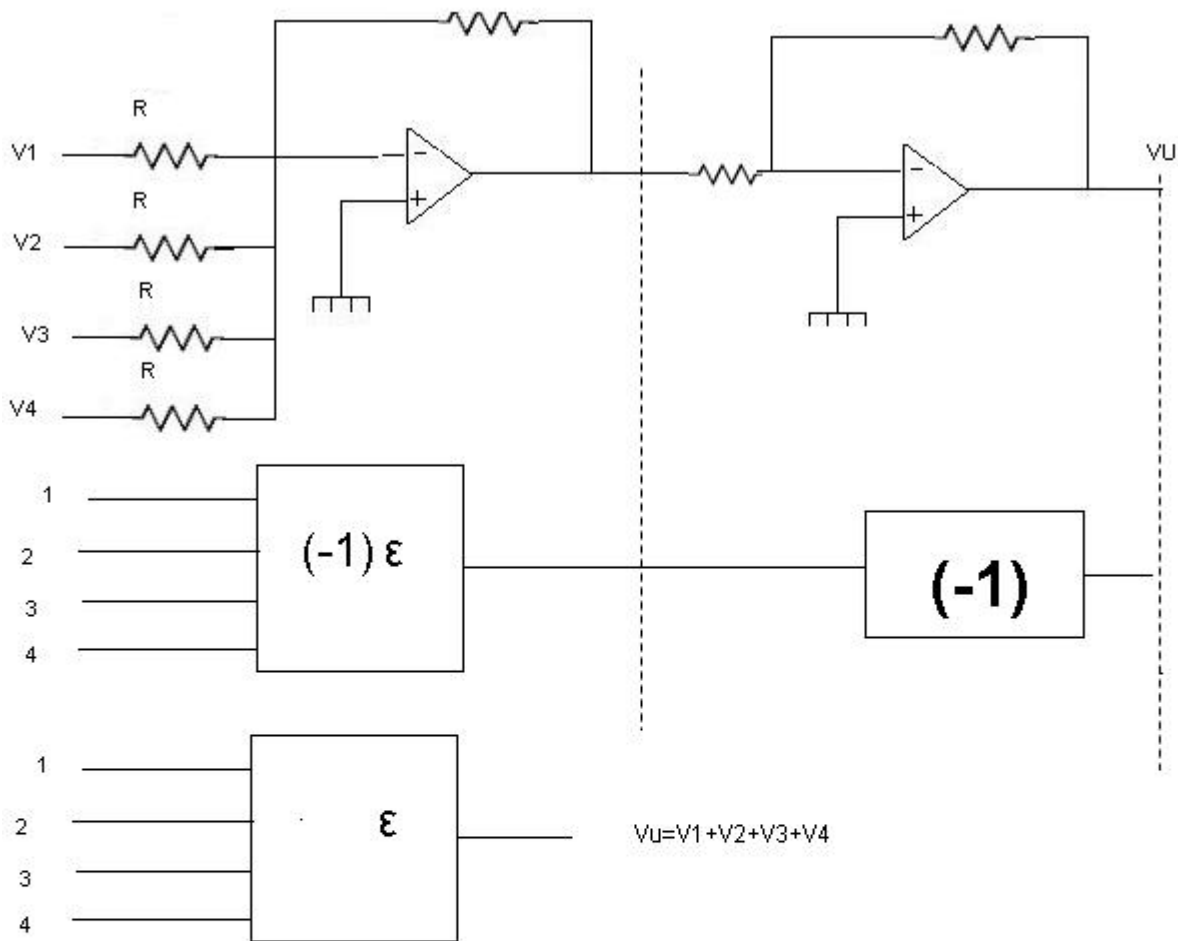
$$V_u = -R_2 * \left( \frac{V_1}{R_{i1}} + \frac{V_2}{R_{i2}} \right) = -R_2 * \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_1} \right) = -R_2 * \left( \frac{V_1 + V_2}{R_1} \right) = -\frac{R_2}{R_1} * (V_1 + V_2) = A * (V_1 + V_2)$$

Da quest'ultima formula si osserva che il dispositivo esegue la somma di  $V_1$  e  $V_2$  e la amplifica di un numero  $A$ .

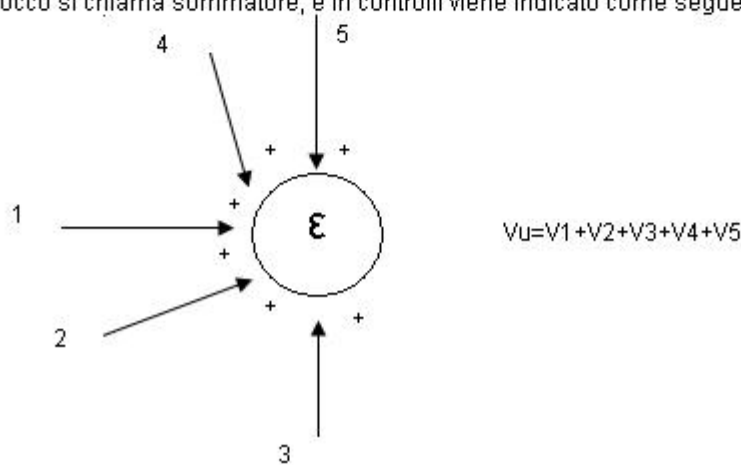
Se vogliamo una semplice somma dovremo ottenere  $A=1$ , quindi basterà porre  $R_1=R_2$ .

Il segno meno può essere superato mettendo in cascata un altro A.O. invertente con  $A = -1$

Come nella figura seguente:



Quest'ultimo blocco si chiama sommatore, e in controlli viene indicato come segue:



## CAPITOLO XI

### GRAFICI DELLA SOMMA DI DUE SEGNALI

DATI:

1 ONDA: 1,5 sen(wt)

R1 50 Ω

2 ONDA: 0,5 sen(wt)

R2 100 Ω

SOLUZIONE:

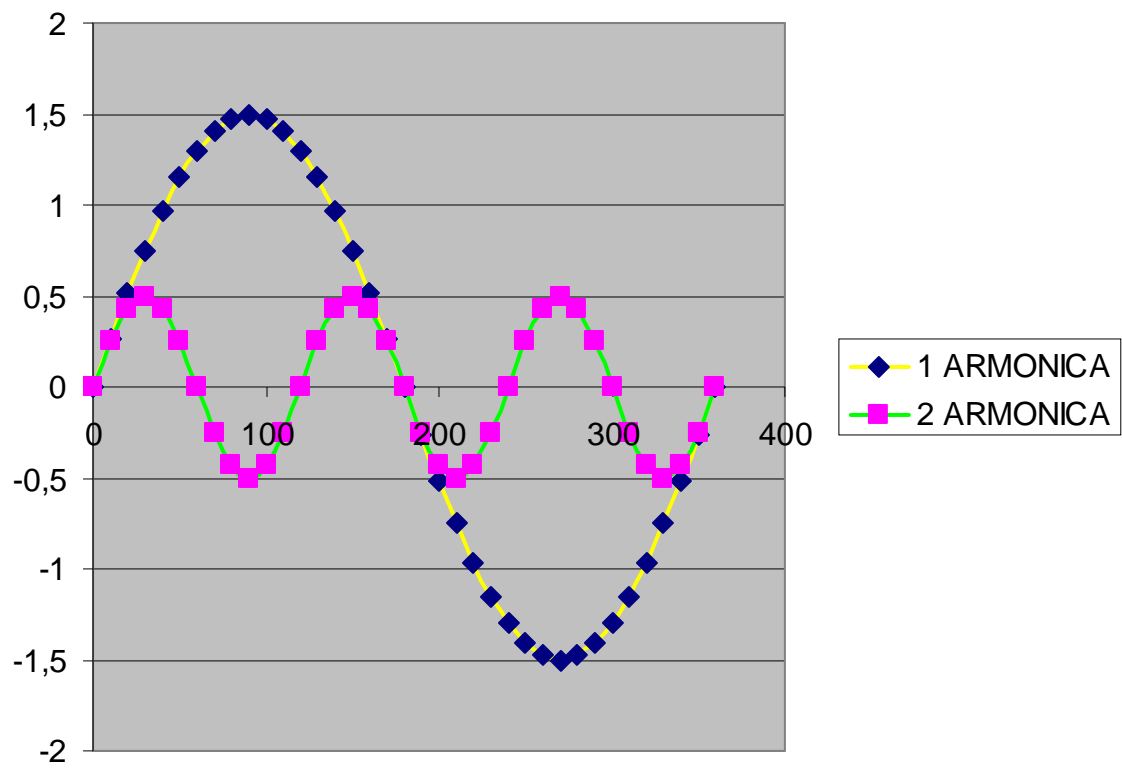
$$A = -\frac{R2}{R1}$$

A= -2

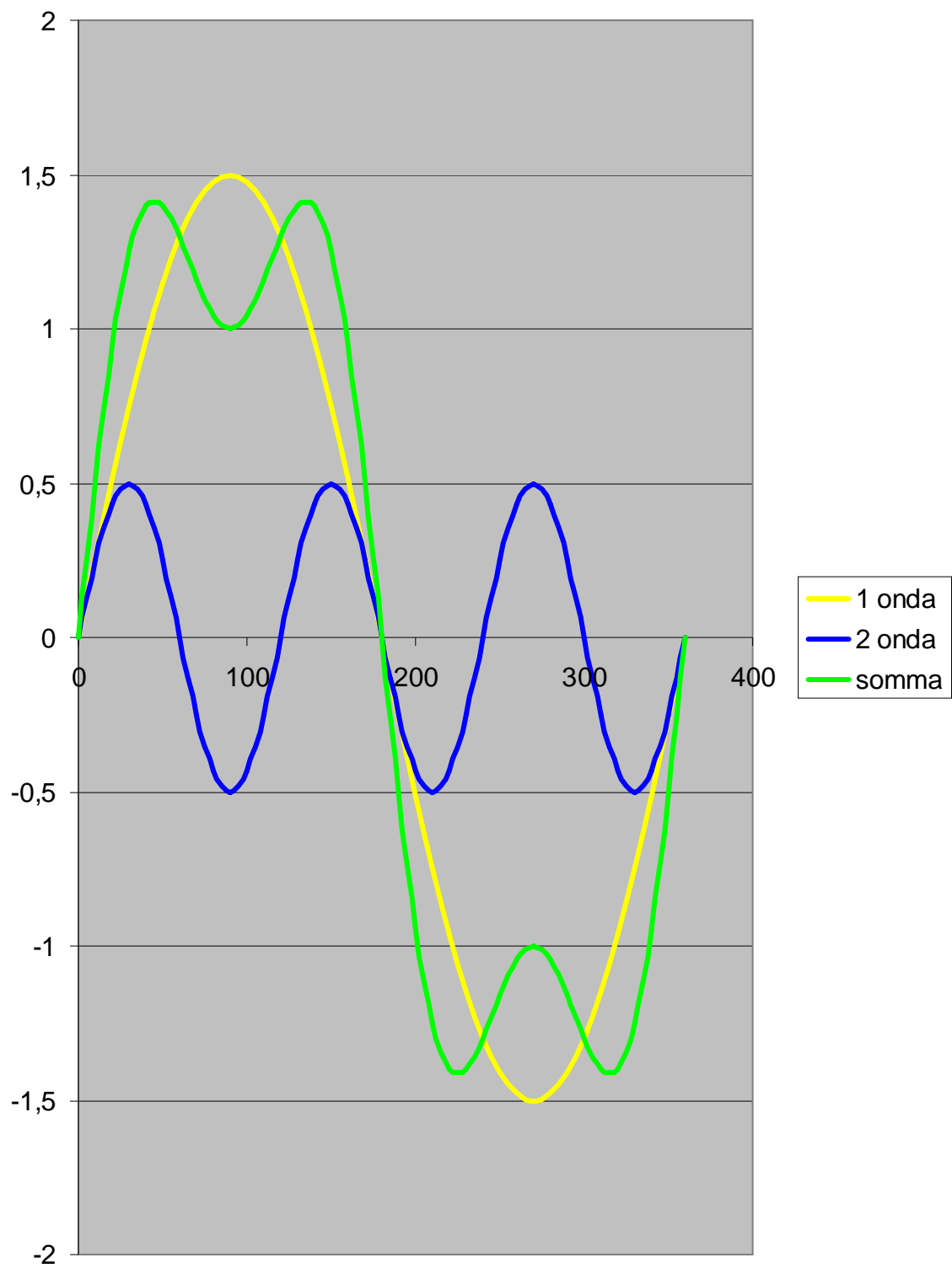
α	V1	V2	VS
0	0	0	0,00
10	0,26	0,25	0,51
20	0,51	0,43	0,95
30	0,75	0,50	1,25
40	0,96	0,43	1,40
50	1,15	0,25	1,40
60	1,30	0,00	1,30
70	1,41	-0,25	1,16
80	1,48	-0,43	1,04
90	1,50	-0,50	1,00
100	1,48	-0,43	1,04
110	1,41	-0,25	1,16
120	1,30	0,00	1,30
130	1,15	0,25	1,40
140	0,96	0,43	1,40
150	0,75	0,50	1,25
160	0,51	0,43	0,95
170	0,26	0,25	0,51
180	0,00	0,00	0,00
190	-0,26	-0,25	-0,51
200	-0,51	-0,43	-0,95
210	-0,75	-0,50	-1,25
220	-0,96	-0,43	-1,40
230	-1,15	-0,25	-1,40
240	-1,30	0,00	-1,30
250	-1,41	0,25	-1,16
260	-1,48	0,43	-1,04
270	-1,50	0,50	-1,00
280	-1,48	0,43	-1,04
290	-1,41	0,25	-1,16
300	-1,30	0,00	-1,30
310	-1,15	-0,25	-1,40
320	-0,96	-0,43	-1,40
330	-0,75	-0,50	-1,25
340	-0,51	-0,43	-0,95
350	-0,26	-0,25	-0,51
360	0,00	0,00	0,00



## 2 SEGNALI



## somma di 2 segnali

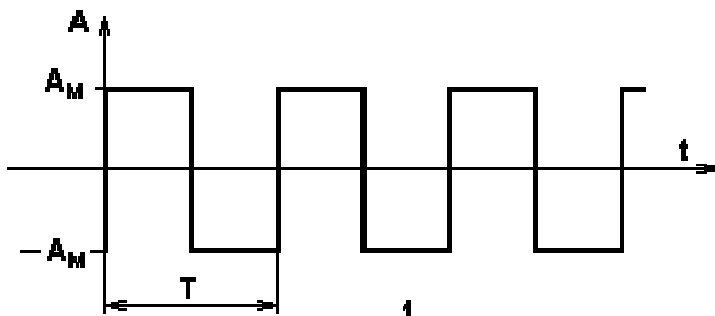
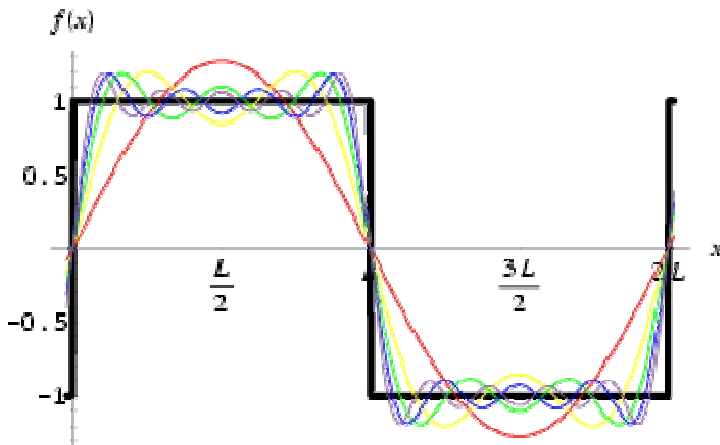


## CAPITOLO XII

### ONDA QUADRA

Se aggiungo i segnali aumento la frequenza e la curva si inclina sempre di più.  
Quindi se aggiungo infiniti segnali avrò un'onda quadra.

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{M}{i} \sin(i\omega\tau) \right] \quad i = 1; 3; 5; 7; \text{ecc.}$$



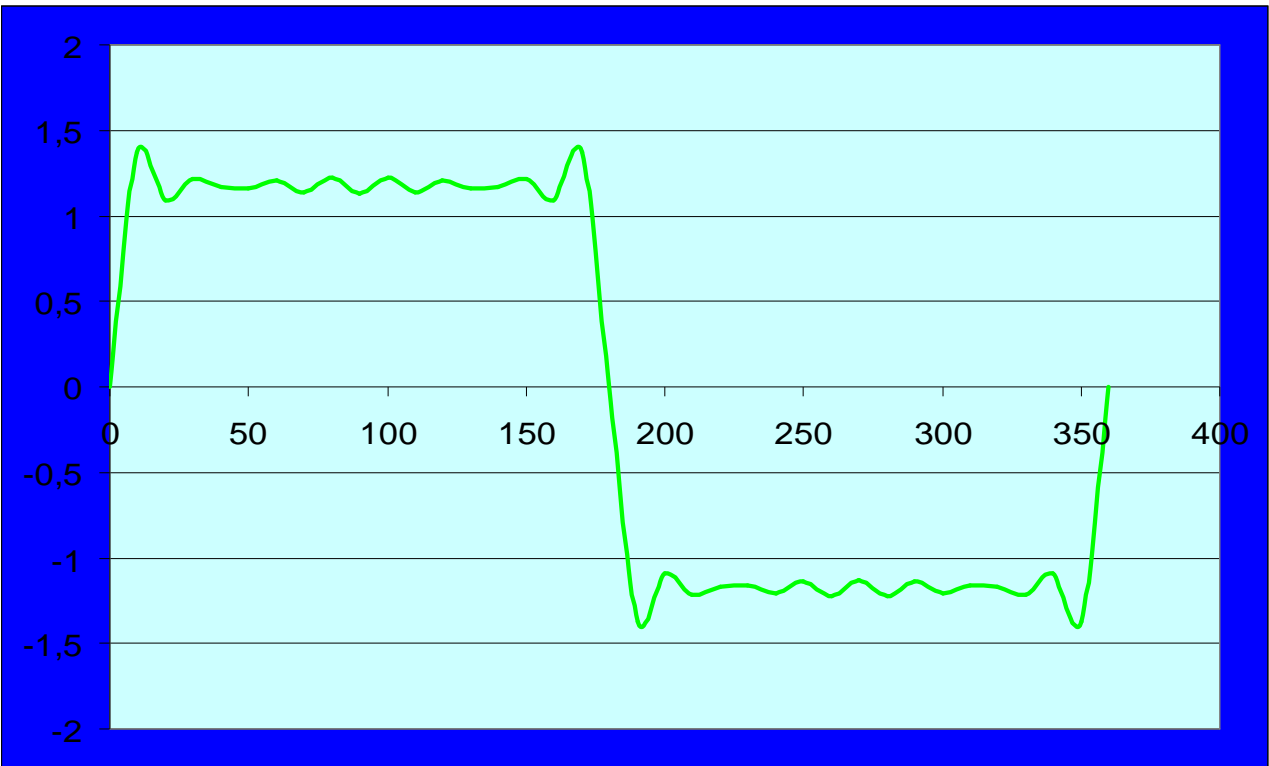
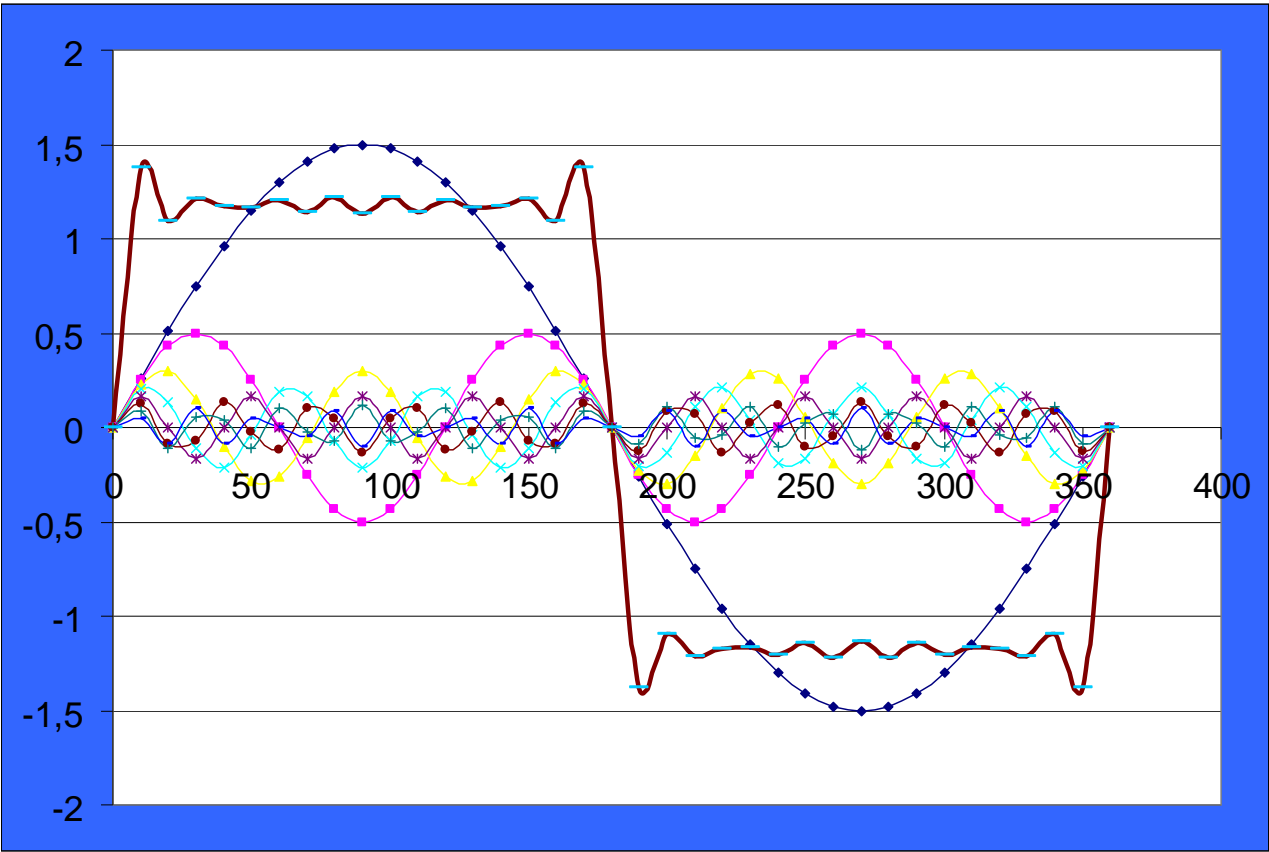
**T = periodo**

**f<sub>0</sub> = frequenza**

$$f_0 = \frac{1}{T}$$

**A<sub>M</sub> = valore massimo**

Da EXCEL:



Il fisico Fourier ha scoperto che i segnali sono composti da infinite armoniche.

**Con il metodo deduttivo sperimentale**, abbiamo trovato che l'onda quadra è formata dalla somma di infinite armoniche dispari aventi valore massimo  $M/i$ .

Fourier ha dimostrato che qualsiasi segnale periodico è formato dalla somma di infinite armoniche.

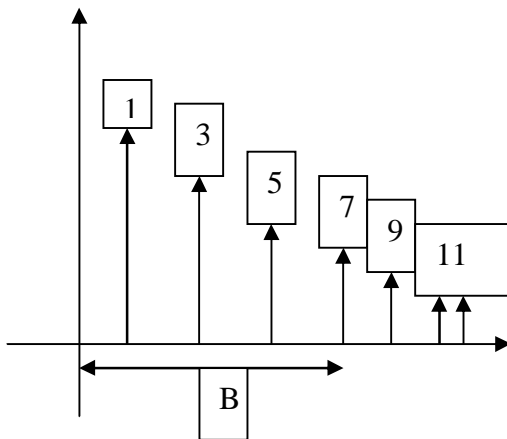
Un segnale qualsiasi è dunque scomponibile sempre in serie di Fourier.

Più in generale, la scomposizione vale anche per un segnale generico non periodico.

## CAPITOLO XIII

### CONCETTO DI SPETTRO e di BANDA di un SEGNALE

Abbiamo visto che l'onda quadra è scomponibile nella somma delle armoniche dispari, è quindi possibile disegnare un grafico che rappresenta le armoniche mediante un istogramma in cui la singola armonica viene collocata sull'asse della frequenza col proprio modulo. Questo grafico è chiamato lo spettro di frequenze dell'onda quadra:



B=BANDA

Il segmento si chiama B=banda.

Dalla nona armonica le ampiezze delle sinusoidi sono molto piccole e quindi trascurabili, quindi con buona approssimazione si può dire che l'onda quadra è formata da frequenze fino alla settima armonica e quindi di banda risulta essere  $7 \cdot f$ . In generale ogni segnale ha la sua lunghezza di banda.

#### **Esempio - Segnale telefonico:**

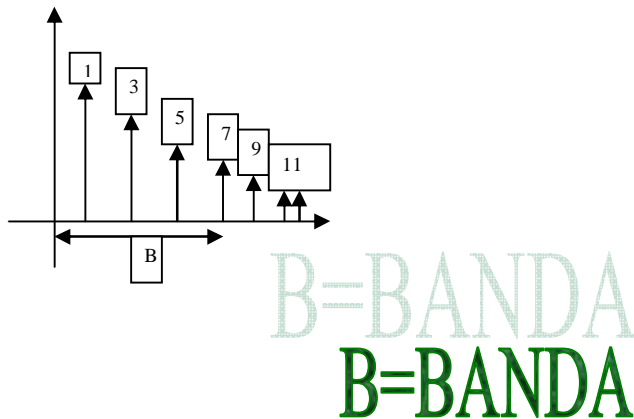
$$B = \{f : 300 \leq f \leq 3400\}$$

$$LB = 3400 - 300 = 3100$$

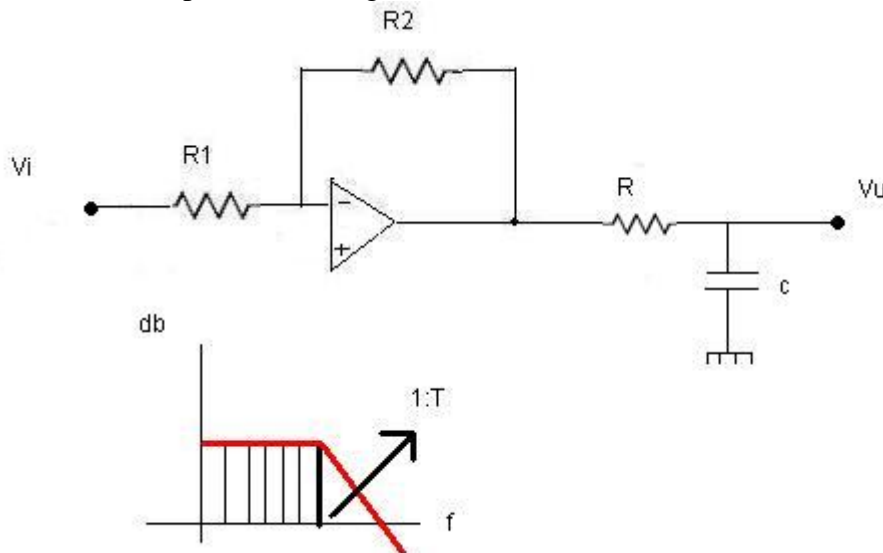
## CAPITOLO XIV

### FILTRAGGIO DI UN SEGNALE

Si consideri il segnale avente sette armoniche.



Si consideri l'operazionale seguente:



Nel filtro entra un certo numero di frequenze: alcune passano, altre invece vengono bloccate da esso.

Si osserva che la prima e la terza armonica sono amplificate con un numero costante mentre la quinta e la settima vengono attenuate e quindi ridotte ai minimi termini tanto da poter essere trascurate. Perciò all'uscita troveremo solo la prima e la terza armonica. Siccome sono passate le frequenze basse rispetto a  $1:\tau$ . Questo filtro si chiama filtro PASSA BASSO.

## MODULAZIONE DI AMPIEZZA E DI FREQUENZA



## ONDE ELETTROMAGNETICHE (TRATTO DAL SITO ENEA)

Le onde elettromagnetiche sono una successione continua di impulsi elettromagnetici prodotti da una variazione del campo elettrico o del campo magnetico. Queste variazioni producono delle ‘perturbazioni’ elettromagnetiche che si propagano nel tempo e nello spazio secondo le leggi sviluppate da Maxwell intorno al 1860. Tali onde non necessitano di un mezzo in cui propagarsi, pertanto si diffondono anche nel vuoto con una velocità costante detta velocità della luce nel vuoto: essa è legata alla frequenza ( $f$ ) ed alla lunghezza d’onda ( $\lambda$ ) dalla seguente relazione

$$c = \lambda \cdot f \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Le onde elettromagnetiche sono classificate in termini di lunghezza d’onda e frequenza, che peraltro in funzione di ciò dipendono gli effetti che esse hanno sui corpi irradiati e il comportamento della radiazione stessa quando essa incide su particolari materiali. Nello schema sottostante è riportato lo spettro elettromagnetico con la suddivisione per frequenze e lunghezze d’onda.

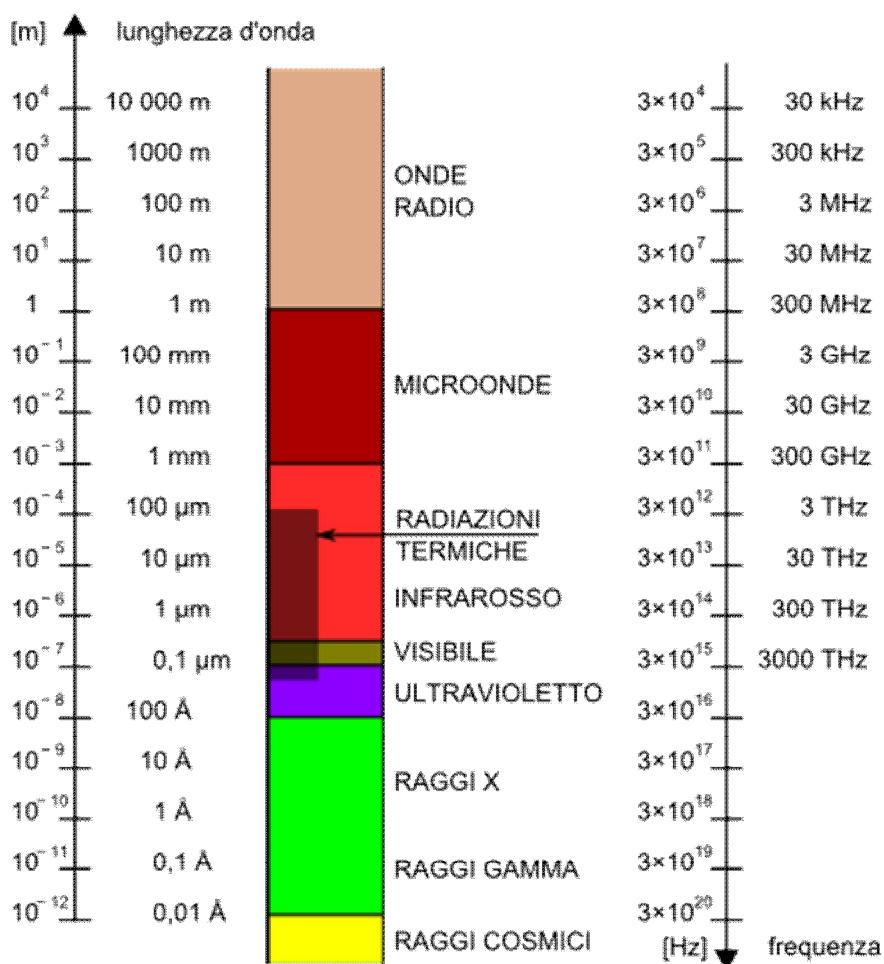


Fig. 1 - spettro elettromagnetico

Essendo legate dalla grandezza costante  $c$ , mentre la lunghezza d’onda  $\lambda$  diminuisce passando dalle onde radio ai raggi gamma, la frequenza  $f$  cresce progressivamente e con essa anche il contenuto energetico dell’onda stessa. È allora possibile distinguere una regione della lunghezza d’onda, e quindi della frequenza, in cui la radiazione è ionizzante ( $f > 3000 \text{ THz}$ ,  $\lambda < 0,1 \mu\text{m}$ ) e una in cui non lo è: l’energia posseduta dai raggi gamma e dai raggi X è tale da interferire con la struttura atomica dei

materiali che attraversano, cioè provocano la deviazione di elettroni dalla loro orbita con la conseguente formazione di ioni. Tali [radiazioni ionizzanti](#) hanno quindi un elevato potere di penetrazione. Pur avendo analoghe proprietà e generando analoghi effetti sui materiali, queste due radiazioni differiscono nel metodo di generazione: i raggi X possono essere prodotti da macchine, i raggi gamma invece sono il risultato di una disintegrazione spontanea di radioisotopi, i quali sono atomi di un elemento chimico aventi un differente numero di neutroni nel nucleo, ma stesso numero atomico, e che si trasformano in un altro elemento con rilascio di energia mediante reazione nucleare.

Tra le radiazioni non ionizzanti ( $f < 3000 \text{ THz}$ ,  $\lambda > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ) si hanno:

- Le **onde radio** ( $f < 0,3 \text{ GHz}$ ,  $\lambda > 1 \text{ m}$ ): avendo una elevata lunghezza d'onda possono aggirare e superare ostacoli non troppo grandi, come gli edifici. Sono principalmente utilizzate nelle telecomunicazioni, per le trasmissioni radio a distanza e per il servizio telegrafico;
- Le **microonde** ( $0,3 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$ ,  $1 \text{ mm} < \lambda < 1 \text{ m}$ ): hanno principalmente applicazione nelle radio-trasmissioni direzionali, nelle telecomunicazioni radar, nella televisione, nelle telecomunicazioni spaziali, ecc.;
- I **raggi infrarossi** ( $300 \text{ GHz} < f < 400 \text{ THz}$ ,  $0,76 \text{ }\mu\text{m} < \lambda < 1 \text{ mm}$ ): sono onde elettromagnetiche connesse con le oscillazioni termiche degli atomi. Esse sono dunque emesse da tutti i corpi con intensità crescente con la temperatura: le applicazioni sono principalmente termiche, come trattamento di materiali, riscaldamento, ecc.;
- La **luce visibile** ( $400 \text{ THz} < f < 800 \text{ THz}$ ,  $0,38 \text{ }\mu\text{m} < \lambda < 0,76 \text{ }\mu\text{m}$ ): sono onde emesse da corpi aventi temperature molto elevate, come il sole e le stelle, e sono visibili all'occhio umano;
- I **raggi ultravioletti** ( $800 \text{ THz} < f < 30000 \text{ THz}$ ,  $100 \text{ }\text{\AA} < \lambda < 0,38 \text{ }\mu\text{m}$ ): sono presenti nella radiazione solare e hanno un maggior potere di penetrazione rispetto alla luce visibile: risultano essere letali per talune cellule ed è per questo motivo che trovano applicazione nella sterilizzazione.

Particolari emissioni elettromagnetiche sono i [laser](#), acronimo di "*light amplification by stimulated emission of radiation*", caratterizzati dall'avere una emissione di luce coerente monocromatica (anche non visibile, nell'infrarosso e nell'ultravioletto) e particolarmente collimata.

## Infrarossi (IR)



La tecnologia ad infrarossi è una tecnologia che consente il riscaldamento tramite irraggiamento.

L'energia termica è generata da un emettitore e il riscaldamento è generato dall'impatto della radiazione sulla superficie del corpo che vuole essere riscaldato. Una volta riscaldata la superficie il riscaldamento avviene all'interno del corpo per conduzione.

La radiazione infrarossa (IR) è quell'emissione elettromagnetica che possiede una lunghezza d'onda che va da 1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  e che è compresa tra lo spettro della luce visibile e le microonde.

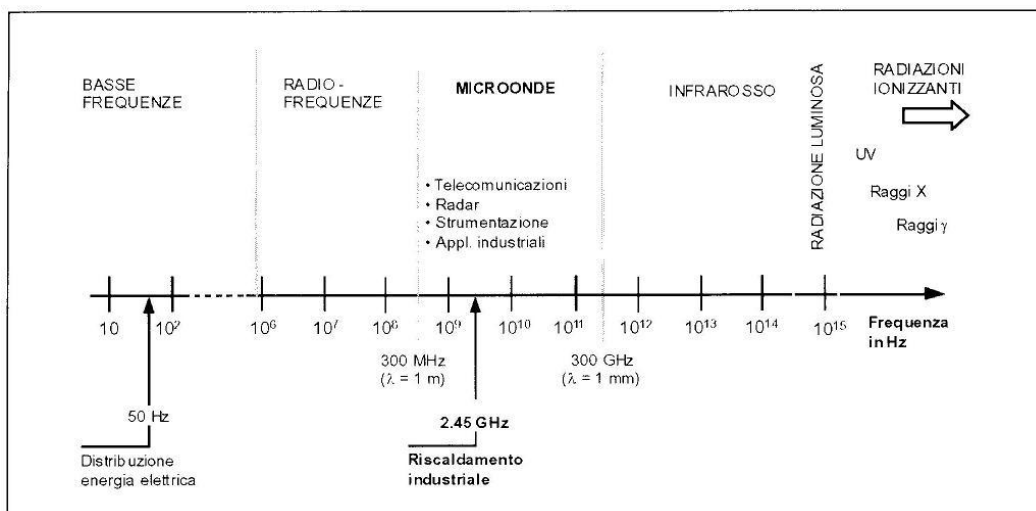


Fig 1: Spettro elettromagnetico[3]

Nei corpi che ne vengono investiti, la radiazione infrarossa si manifesta appunto come calore.

Tutti i corpi emettono raggi infrarossi in funzione del materiale di cui sono costituiti e della temperatura a cui si trovano.

In campo industriale, per le sue caratteristiche di trasmissione di calore per irraggiamento, l'infrarosso viene utilizzato in diversi trattamenti termici superficiali con lunghezze d'onda che vanno per lo più da 1 a 10  $\mu\text{m}$ .

La radiazione infrarossa viene classificata a seconda della lunghezza d'onda di emissione [1] come:

Onda corta (SW): da 1 a 2  $\mu\text{m}$

Onda media (MW): da 2 a 4  $\mu\text{m}$

Onda lunga (LW): da 4 a 10  $\mu\text{m}$

A queste lunghezze d'onda corrispondono radiazioni dal debole contenuto energetico inferiore a  $4 \cdot 10^{-19}$  J

che svolgono solo una funzione termica senza andare ad interferire con la struttura molecolare della materia. Delle tre, la radiazione ad onda lunga (LWIR) è la più vantaggiosa in quanto ha una maggiore penetrabilità, una bassa potenza specifica che consente di trattare materiali più delicati e una più alta efficienza in quanto con quelle lunghezze d'onda i materiali mostrano una maggiore capacità di assorbimento.

Gli emettitori sono i principali componenti della tecnologia e il principio di funzionamento consiste nel riscaldare un filamento metallico ad una opportuna temperatura attraverso il passaggio di una opportuna corrente elettrica. Le caratteristiche degli emettitori dipendono dalla frequenza della radiazione emessa.

Gli emettitori ad onda corta e media lavorano a temperature più elevate oltre i 2000 °C e quindi devono essere posti a distanze superiori rispetto agli oggetti trattati. Le densità di potenza arrivano oltre ai 400 kW/m<sup>2</sup>. [2]

Gli emettitori a onda lunga invece lavorando a temperature più basse, che vanno dai 100 °C ai 450 °C, non sono incandescenti e possono essere posizionati in prossimità del prodotto da trattare dando la possibilità di evitare sprechi di energia o di un eccessivo carico termico che potrebbe anche danneggiare il prodotto.

La tecnologia a infrarossi può essere utilizzata con grande efficacia nelle applicazioni quali la verniciatura industriale, la termoforazione e modellazione della plastica, la deumidificazione, l'essiccazione e l'incollaggio di superfici e di etichette.

In ambito industriale questa tecnologia viene utilizzata anche per il riscaldamento mirato delle sole zone destinate alla presenza di persone.

Nei modelli proposti l'utilizzo della tecnologia produce un incremento dei consumi elettrici finali dell'utente, tuttavia comportando un abbassamento in termini di energia primaria (in quanto va a sostituire l'uso di un altro vettore energetico).

Potenzialità nel settore articoli in gomma e plastica ([collegamento all'estratto della tabella TEC11-DH](#))

## **Reference**

[1] CESI, 2000, ESPLORAZIONE DEI PROCESSI PRODUTTIVI NELL'INDUSTRIA ITALIANA: INDIVIDUAZIONE DELLE ELETTROTECNOLOGIE UTILIZZABILI IN OGNI FASE DI PROCESSO  
Rapporto SFR-A0/021458. Pg 56

[2][www.stalam.com/downloadaddoc.php?f=all\\_123\\_1\\_LWIR\\_ITA.pdf&id=123&r=3](http://www.stalam.com/downloadaddoc.php?f=all_123_1_LWIR_ITA.pdf&id=123&r=3)

[3] Il riscaldamento a microonde. Principi ed applicazioni. Autori vari. 2008 Pitagora Editrice - Bologna

## Microonde MW

La tecnologia a microonde rientra tra le tecnologie di riscaldamento dielettrico e utilizza il principio del riscaldamento mediante onde elettromagnetiche. Il termine riscaldamento dielettrico viene usato per identificare quelle tecnologie adatte a riscaldare corpi che non sono buoni conduttori di calore. Queste tecnologie effettuano un riscaldamento con una trasmissione di energia e non con una trasmissione di calore. Utilizzare un campo elettromagnetico alternato è il modo migliore per scaldare quei corpi che presentano una cattiva conduzione del calore in quanto il corpo si scalda direttamente dall'interno della materia. In particolare sono definite microonde (MO) le onde elettromagnetiche comprese tra i raggi infrarossi e le onde radio con una lunghezza d'onda che va da 1 mm a 1 m e che operano ad una frequenza che va da 300 Mhz a 300 Ghz.

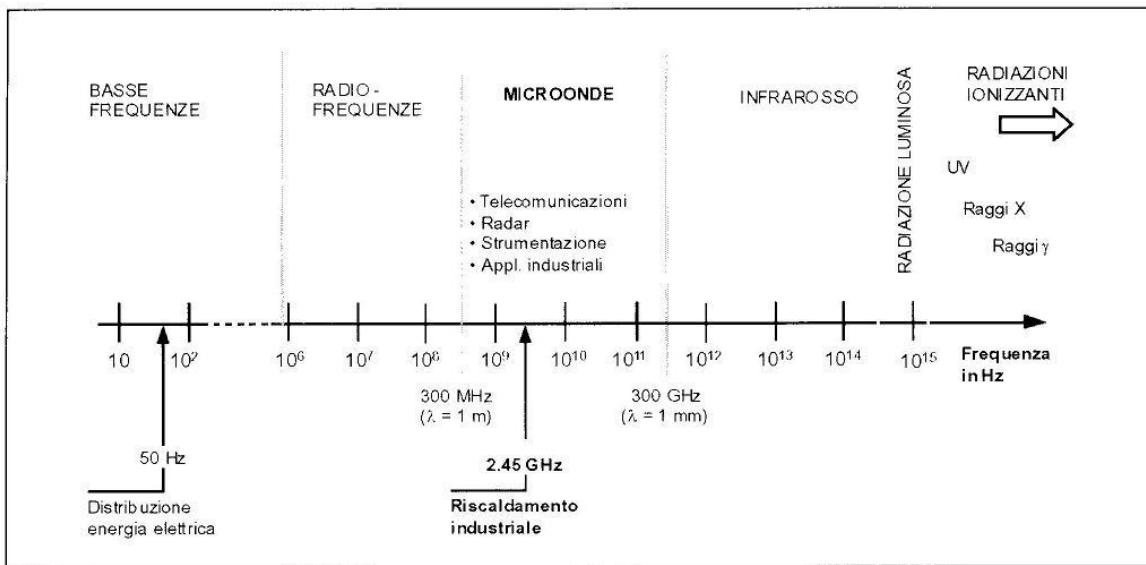


Fig 1: Spettro elettromagnetico [2]

A causa del diffuso impiego delle microonde nel campo delle comunicazioni, sono stati stipulati dei trattati internazionali che fissano le bande permesse per le altre applicazioni. È permesso quindi l'utilizzo, per scopi Industriali, Scientifici e Medici, delle sole frequenze di 433,92 2450 5800 e 24125 MHz che vengono per questo definite frequenze ISM.

I generatori di microonde sono basati sul principio della modulazione di un intenso fascio di elettroni ed i più comunemente usati nelle applicazioni sono il Klystron e il Magnetron.

Il principio di funzionamento del riscaldamento attraverso le microonde si basa sulla perdita dielettrica dovuta al movimento delle molecole dipolari (in particolare quelle dell'acqua) indotto dal campo magnetico alternato (fig. 2). L'attrito intermolecolare dovuto al movimento trasforma in calore parte dell'energia cinetica fornita dal campo applicato. In questo modo si ottiene un riscaldamento uniforme del corpo trattato. In particolare le microonde sono adatte per trattare materiali di modeste dimensioni.

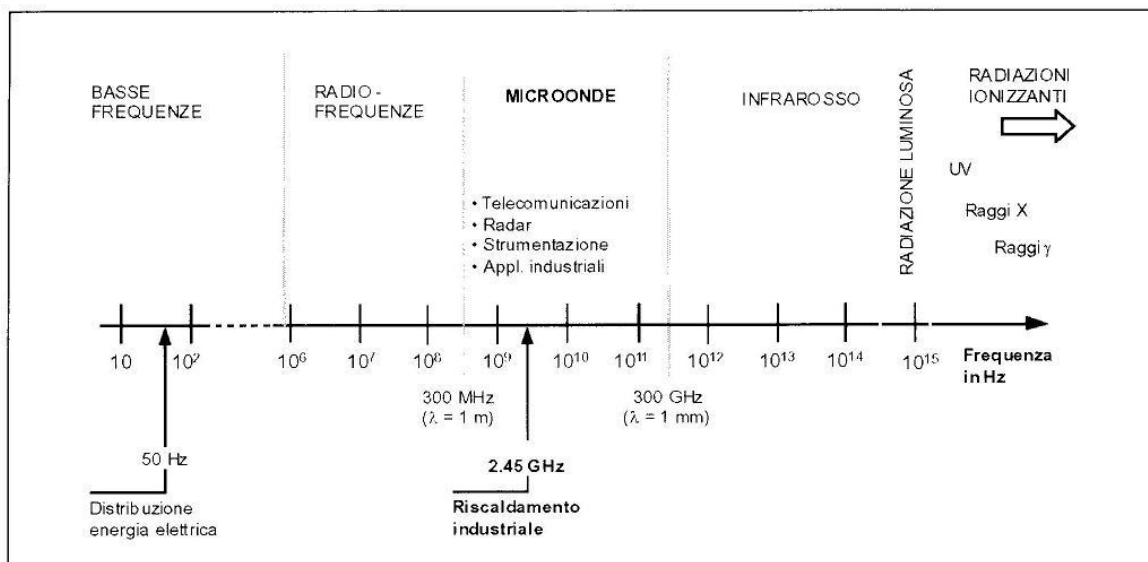


Fig 1: Spettro elettromagnetico [2]

A causa del diffuso impiego delle microonde nel campo delle comunicazioni, sono stati stipulati dei trattati internazionali che fissano le bande permesse per le altre applicazioni. È permesso quindi l'utilizzo, per scopi Industriali, Scientifici e Medici, delle sole frequenze di 433,92 2450 5800 e 24125 MHz che vengono per questo definite frequenze ISM.

I generatori di microonde sono basati sul principio della modulazione di un intenso fascio di elettroni ed i più comunemente usati nelle applicazioni sono il Klystron e il Magnetron.

Il principio di funzionamento del riscaldamento attraverso le microonde si basa sulla perdita dielettrica dovuta al movimento delle molecole dipolari (in particolare quelle dell'acqua) indotto dal campo magnetico alternato (fig. 2). L'attrito intermolecolare dovuto al movimento trasforma in calore parte dell'energia cinetica fornita dal campo applicato. In questo modo si ottiene un riscaldamento uniforme del corpo trattato. In particolare le microonde sono adatte per trattare materiali di modeste dimensioni

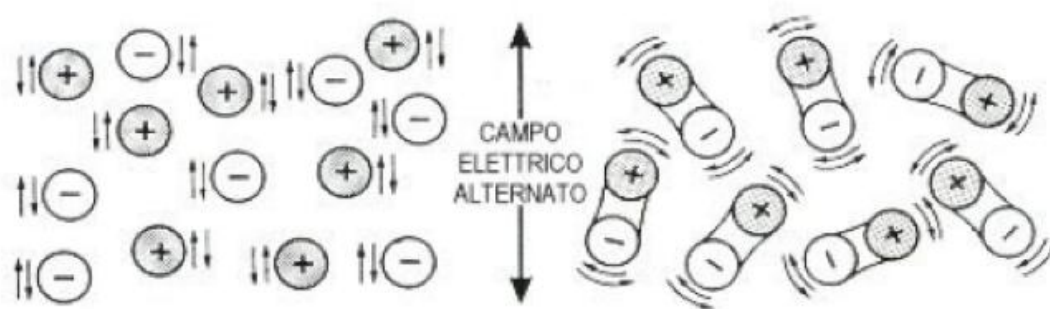


Fig 1: Meccanismo di polarizzazione

Secondo la formula :

$$W_{diss} = 2 \pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 / 4$$

la potenza dissipata per unità di volume  $W_{diss}$  [W/m<sup>3</sup>] è proporzionale alla frequenza  $f$ , al quadrato del campo elettrico  $E$  ed al fattore di perdita dielettrica  $\varepsilon''$  dei prodotti da trattare/riscaldare.

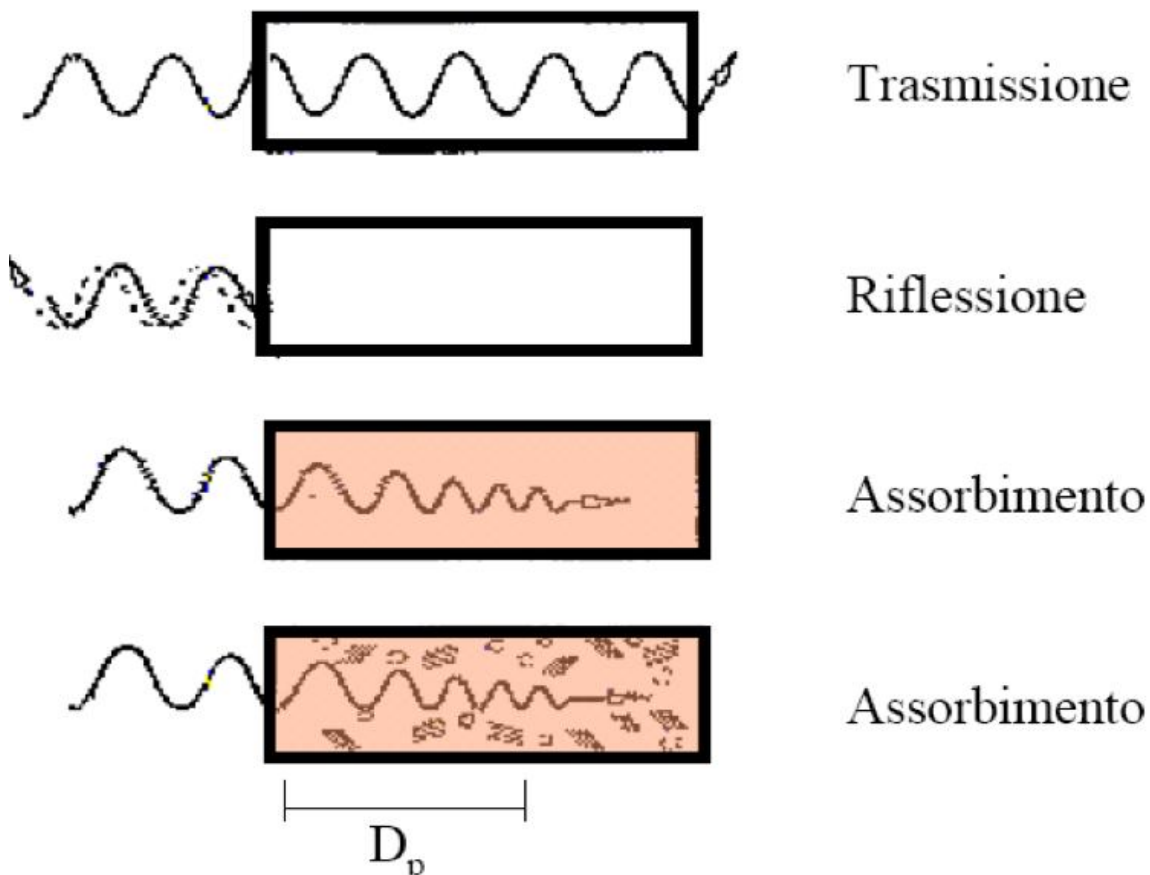


Fig 2: Penetrazione delle onde [2]

Come si vede in fig.3 i materiali possono trasmettere o riflettere l'onda elettromagnetica. L'effetto termico si ottiene solo nel caso in cui il materiale assorba l'onda, attenuandone la sua intensità. L'attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda e dalla tangente di perdita come indicato nelle formule seguenti:

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon'}$$

$$\tan \phi = \varepsilon'' / \varepsilon'$$



Dove  $\lambda_0$  è la lunghezza d'onda dell'aria e  $\epsilon'$  è la costante dielettrica.

La potenza trasmessa per unità di volume è direttamente proporzionale alla frequenza, al quadrato del campo elettrico ed al fattore di perdita dei prodotti da trattare. Inoltre la profondità di penetrazione delle radiazioni è inversamente proporzionale sia alla frequenza, sia al fattore di perdita dei prodotti stessi.

In ambito industriale la tecnologia a microonde ha il vantaggio rispetto ai sistemi tradizionali di riscaldare in maniera rapida, volumetrica e selettiva. Consente inoltre una uniformità di riscaldamento e un livellamento dell'umidità non raggiungibile con altre tecniche.

### **Ambiti di applicazione**

Viene utilizzata nell'industria alimentare per il tempering degli alimenti con potenze installate che vanno dai 50 ai 100 kW, per la cottura, l'essiccamento, la pastorizzazione, la sterilizzazione.

Nel processo di vulcanizzazione della gomma, consente attraverso un preriscaldamento una riduzione dei tempi di polimerizzazione.

Questa tecnologia viene inoltre utilizzata anche nel settore farmaceutico e nell'industria del legno.

E' da evidenziare comunque che la miglior efficienza energetica si trova dall'accoppiamento della tecnologia a microonde con le tecnologie tradizionali.

Per fare alcuni esempi nel settore del legno per l'essiccamento delle vernici ad acqua si passa da un tempo di trattamento di circa un'ora con sistema tradizionale (ad aria calda) da 15 kW ad un tempo inferiore ad un minuto con un sistema combinato da 3 kW (microonde) + 12 kW (aria calda).

Questa tecnologia produce dunque un aumento di energia elettrica, in quanto si pone come parziale sostituta nell'utilizzo di combustibile, ma in termini di energia primaria comporta tuttavia un beneficio.

Potenzialità nel settore alimentare ([collegamento all'estratto della tabella TEC12-DA](#))

Potenzialità nel settore legno ([collegamento all'estratto della tabella TEC12-DD](#))

Potenzialità nel settore chimico farmaceutico([collegamento all'estratto della tabella TEC12-DG](#))

### **Reference**

[1] CESI, 2000, ESPLORAZIONE DEI PROCESSI PRODUTTIVI NELL'INDUSTRIA ITALIANA: INDIVIDUAZIONE DELLE ELETTROTECNOLOGIE UTILIZZABILI IN OGNI FASE DI PROCESSO Rapporto SFR-A0/021458. Pg 56

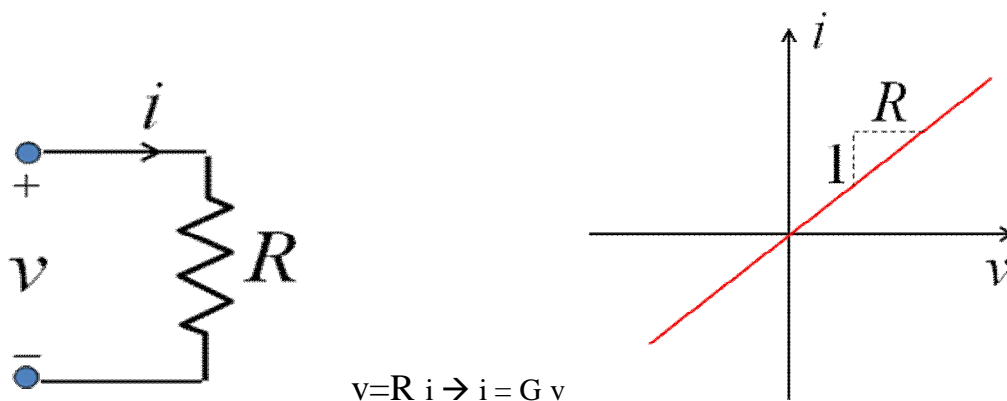
[2] Autori vari. 2008 Il riscaldamento a microonde. Principi ed applicazioni. - Pitagora Editrice Bologna

## CIRCUITI NON LINEARI

I circuiti elettrici rappresentabili tramite modelli contenenti resistori non lineari hanno assunto un'importanza notevole nell'ingegneria elettronica. In questo oggetto noi esamineremo, ad un livello molto elementare, alcune proprietà dei circuiti resistivi non lineari, di notevole interesse, sia dal punto di vista teorico che applicativo.

Metteremo, inoltre, in evidenza le difficoltà che si incontrano nello studio di un circuito non lineare, in particolare quelle legate al fatto che non esistono metodi analitici generali per risolvere equazioni non lineari. Introduciamo, infine, un metodo molto potente che consente di superare queste difficoltà, almeno nel caso in cui il circuito contiene un solo resistore.

### Elemento passivo lineare, Resistori:



L'elemento circuitale più comune è il resistore a due terminali che verifica la legge di Ohm: la tensione del resistore è direttamente proporzionale all'intensità della corrente elettrica che lo attraversa.

Il coefficiente di proporzionalità è la resistenza elettrica del resistore e lo si indica comunemente con la lettera  $R$ . Dunque, la relazione tra la tensione e la corrente di un resistore di tipo ohmico è una relazione lineare algebrica.

In realtà il resistore lineare è un concetto molto più ampio di quello che comunemente si associa ad un resistore di tipo ohmico. Esso può essere il modello di bipoli estremamente complessi composti da dispositivi la cui natura fisica è completamente diversa dai conduttori di elettricità di tipo ohmico. Ciò è ben noto a chi ha seguito un corso di introduzione alla teoria dei circuiti. In questa trattazione avremo modo di affrontare questa questione.

Se la resistenza  $R$  è costante nel tempo si dice che il resistore lineare è tempo-invariante, altrimenti si dice che il resistore lineare è tempo-variante. Due esempi di resistori lineari tempo varianti sono l'interruttore e il potenziometro.

La curva caratteristica di un resistore lineare è una linea retta passante per l'origine del piano tensione-corrente. La pendenza della retta dipende dal valore della resistenza elettrica. Quando il valore della resistenza tende a zero, il resistore si comporta da corto circuito e la curva caratteristica tende a coincidere con l'asse delle ordinate, cioè con l'asse delle correnti. Invece, quando il valore della resistenza tende all'infinito, il resistore si comporta da circuito aperto e la curva caratteristica tende a coincidere con l'asse delle ascisse, cioè con l'asse delle tensioni.

La potenza elettrica assorbita da un resistore ohmico è positiva e, quindi, la sua curva caratteristica si trova nel primo e nel terzo quadrante del piano tensione - corrente. Un resistore di tipo ohmico è un

elemento passivo. Se la resistenza fosse negativa, la curva caratteristica si troverebbe nel secondo e nel quarto quadrante.

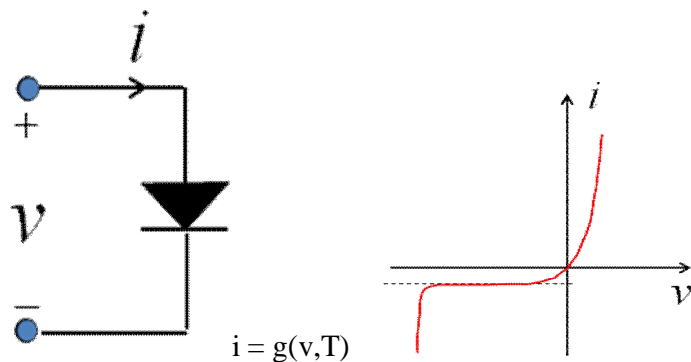
### Elementi passivi non lineari

Un elemento si dice non lineare se la sua curva caratteristica non è una linea retta. Un resistore si dice non lineare anche quando la curva caratteristica è una linea retta che non passa per l'origine del piano tensione - corrente. In entrambi i casi non valgono più le proprietà di omogeneità e di additività tipiche dei resistori lineari e che sono alla base della proprietà della sovrapposizione degli effetti.

Ora considereremo alcuni resistori non lineari di particolare interesse nelle applicazioni e ne descriveremo le curve caratteristiche.

### diodo a giunzione pn

Il diodo a giunzione pn è un dispositivo molto importante nelle applicazioni elettroniche. Questo è il suo simbolo



e questa è la curva caratteristica che ne descrive il funzionamento in condizioni lentamente variabili. La curva caratteristica del diodo passa per l'origine ma non è una linea retta.

A differenza della curva caratteristica del resistore lineare, la curva caratteristica del diodo non è simmetrica rispetto all'origine del piano tensione-corrente. Infatti, il funzionamento del diodo a giunzione pn non è simmetrico rispetto ai suoi due terminali. Se i terminali di un diodo di un circuito si invertono, cambia il funzionamento del circuito. Per tale ragione il simbolo del diodo indica un orientamento.

La curva caratteristica del diodo a giunzione pn è monotona crescente. Di conseguenza per ogni valore di tensione corrisponde un solo valore di corrente sulla curva caratteristica. E' vero anche il viceversa, per ogni valore di corrente corrisponde un solo valore di tensione sulla curva caratteristica. Un resistore non lineare avente tale proprietà è controllato sia in tensione che in corrente.

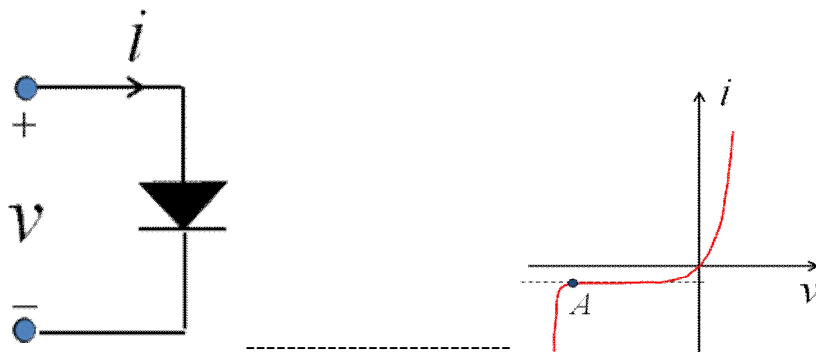
La potenza elettrica assorbita da un diodo a giunzione pn è positiva perché la curva caratteristica passa solo per il primo e terzo quadrante del piano tensione-corrente. Il diodo a giunzione pn è un elemento passivo.

Sono molte le applicazioni in cui vengono utilizzati i diodi a giunzione pn. Ricordiamo qui i circuiti raddrizzatori e i circuiti per la demodulazione di ampiezza.

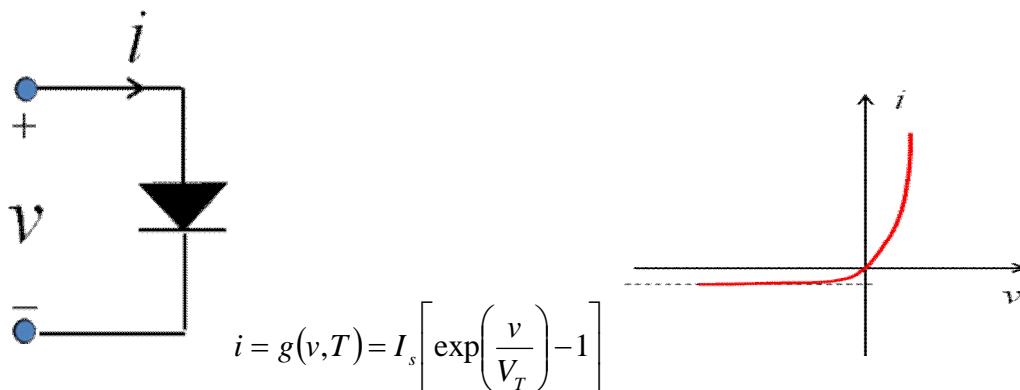
In tutte le applicazioni il punto di funzionamento del diodo a giunzione pn si trova a destra del punto A, prossimo al ginocchio della curva. In queste condizioni di funzionamento la corrente del diodo può essere espressa in funzione della tensione attraverso la semplice formula analitica

Alcune applicazioni:

- [rettificatore](#);
- [peak-detector](#);



*modello esponenziale*



corrente di saturazione inversa =  $I_s$

$V_T = kT / e$  : tensione termica.

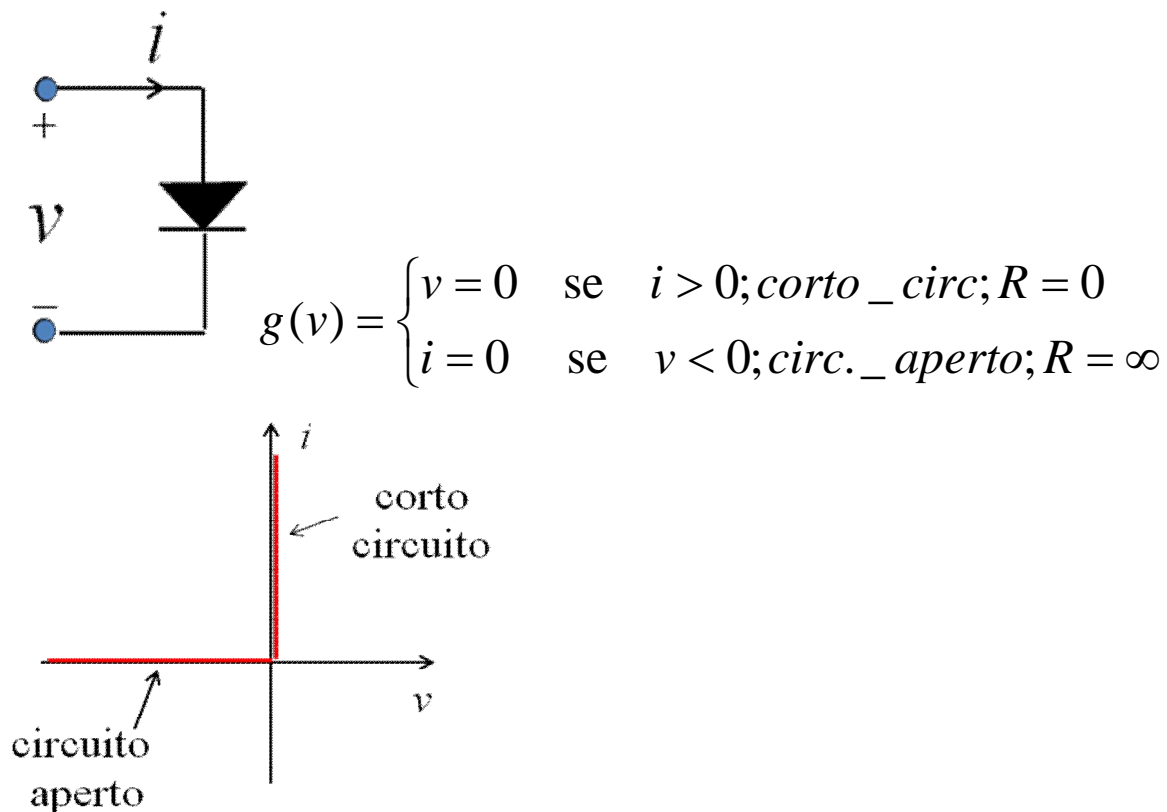
Il coefficiente  $I_s$  prende il nome di corrente di saturazione inversa ed è dell'ordine del microampere.

La tensione  $V_t$  è la cosiddetta tensione termica:  $T$  è la temperatura del dispositivo espressa in Kelvin,  $k$  è la costante di Boltzmann ed “ $e$ ” è la carica, espressa in valore assoluto, dell’elettrone. A temperatura ambiente  $V_t$  è approssimativamente 26 millivolt.

Quando il diodo è polarizzato inversamente con un’elevata tensione, la corrente elettrica che lo attraversa è uguale alla corrente di saturazione inversa. Se, invece, il diodo è polarizzato direttamente, cioè la tensione applicata è positiva, la corrente è positiva e può assumere valori molto più grandi della corrente di saturazione. Ad esempio, se la tensione applicata è dieci volte più grande della tensione termica, la corrente è circa duemila volte più grande della corrente di saturazione inversa.

Un’approssimazione sufficientemente accurata della legge del diodo a giunzione è quella lineare a tratti: la curva caratteristica è approssimata tramite una linea spezzata composta da linee rette. Se le correnti e tensioni in gioco nell’applicazione di interesse sono, in valore assoluto, molto più grandi rispettivamente della corrente di saturazione inversa e della tensione termica, è possibile approssimare la legge del diodo con due sole linee rette spezzate:

### Diodo ideale



In questa approssimazione, se il diodo è polarizzato inversamente la corrente che lo attraversa è zero, ovvero il diodo si comporta da circuito aperto. Se, invece, il diodo è in conduzione, cioè la corrente è positiva, la tensione è uguale a zero, ovvero il diodo si comporta da corto circuito. A questo modello approssimato si dà il nome di diodo ideale.

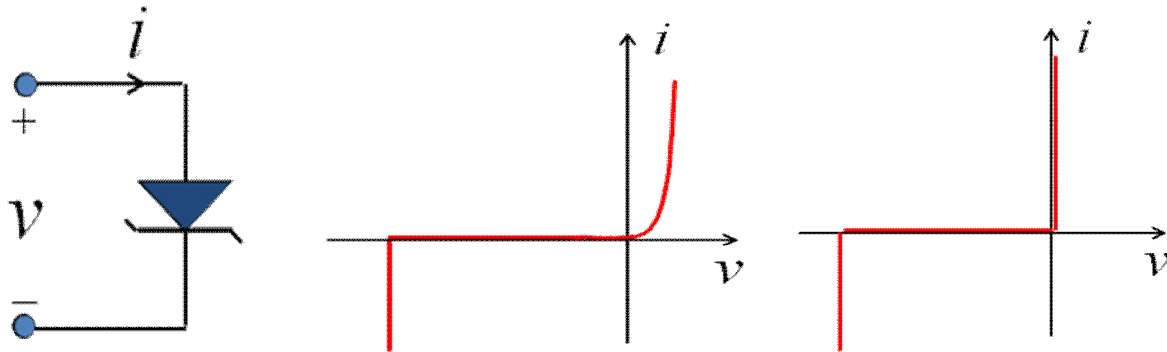
La potenza elettrica assorbita dal diodo ideale è sempre uguale a zero.

Il diodo ideale è un modello circuitale di grande utilità per la sua estrema semplicità. Esso è utilizzato non solo per descrivere il funzionamento di diodi a giunzione pn, ma anche per rappresentare il comportamento di molti dispositivi e circuiti elettronici estremamente più complessi.

### **diodo zener**

*caratteristica reale*

*caratteristica ideale*

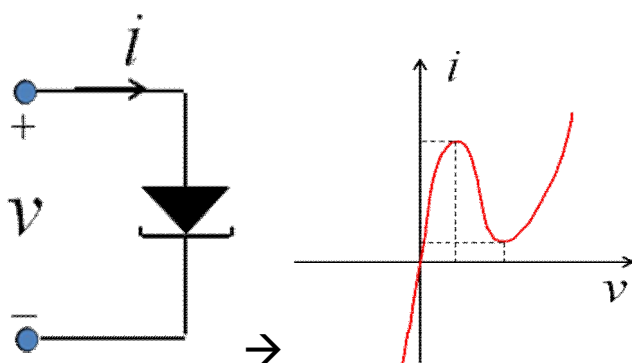


In questa sezione illustriamo il simbolo del diodo zener e la sua curva caratteristica:  $V_z$  è la tensione di breakdown del diodo.

Il diodo zener, a differenza del diodo a giunzione **pn** classico, è progettato e realizzato in modo tale da poter funzionare nella cosiddetta regione di breakdown, in cui il diodo è polarizzato inversamente con una tensione, in valore assoluto, uguale a quella di breakdown.

Il diodo zener è utilizzato come dispositivo regolatore di tensione

### **Diodo tunnel**

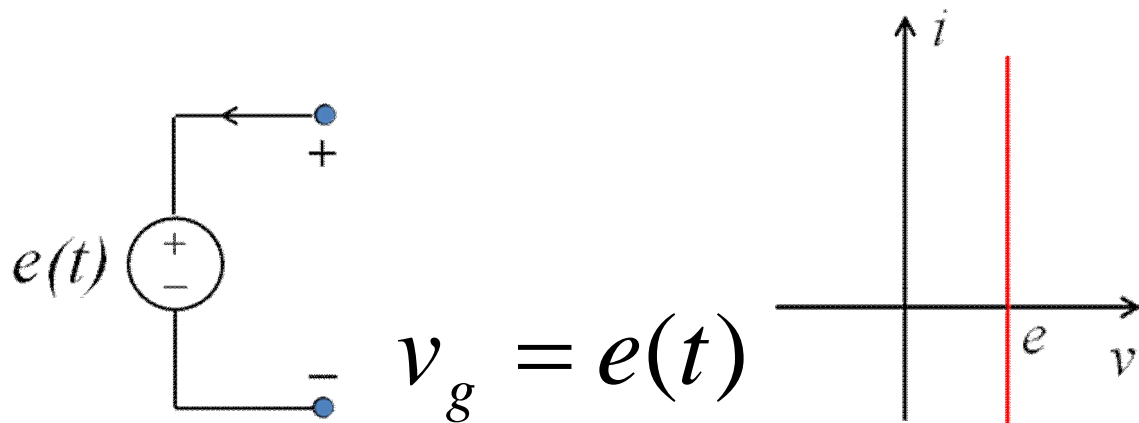


Un'approssimazione polinomiale:  $i = g(v) = a_1v + a_2v^2 + a_3v^3$  (cubica)

Il simbolo del diodo tunnel e la sua curva caratteristica sono mostrati in figura. A differenza di quanto accade per il diodo a giunzione **pn**, la curva caratteristica del diodo tunnel non è strettamente crescente. Si osservi che quando il valore della tensione è compresa nell'intervallo di estremi  $V_1$  e  $V_2$  la pendenza della curva è negativa

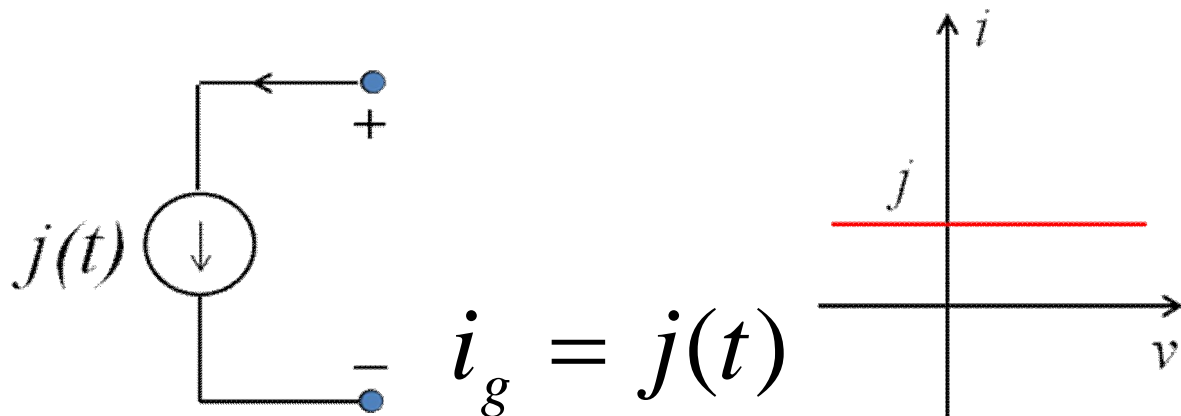
Questa proprietà è molto utile in applicazioni quali gli amplificatori e gli oscillatori. Inoltre, quando il valore della corrente è compreso nell'intervallo di estremi  $I_1$  e  $I_2$ , ad ogni valore della corrente corrispondono tre distinti valori della tensione. Ciò è una diretta conseguenza del fatto che la curva caratteristica ha un tratto a pendenza negativa. Il diodo tunnel è un resistore controllato in tensione ma non in corrente. Tale proprietà rende questo dispositivo molto utile nei circuiti di memoria e commutazione.

### Generatore ideale di tensione



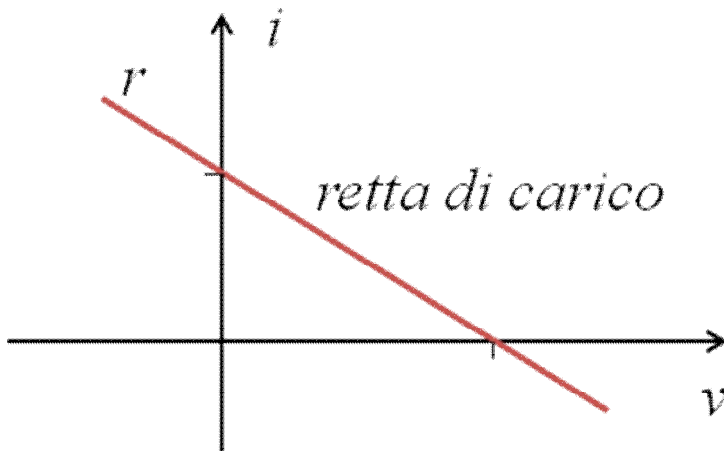
La tensione del generatore indipendente di tensione ha una forma d'onda nota indipendente dall'intensità della corrente elettrica che lo attraversa

### Generatore indipendente di corrente



## Retta di carico

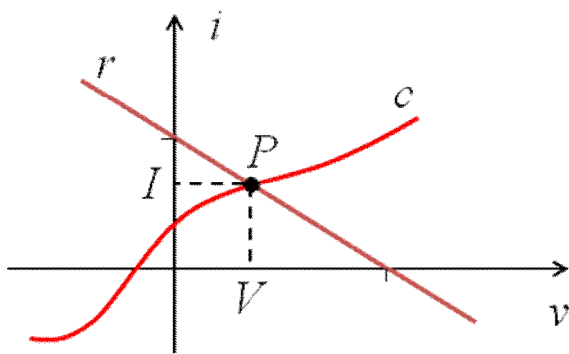
$$r: v + Ri = e$$



La retta di carico interseca l'asse delle tensioni in corrispondenza del valore della tensione del generatore, e l'asse delle correnti in corrispondenza del valore della tensione del generatore diviso il valore della resistenza  $R$ , la cosiddetta corrente di corto circuito. La pendenza della retta di carico è negativa ed è, in valore assoluto, proprio uguale alla conduttanza del resistore lineare  $G=1/R$ .

Al crescere della tensione del generatore la retta di carico trasla parallelamente a se stessa, muovendosi verso l'alto e verso destra. Al diminuire del valore della resistenza  $R$  aumenta, in valore assoluto, la pendenza della retta di carico.

## PUNTO DI LAVORO



$$P \equiv (V, I) : \begin{cases} V + RI = e \\ I - g(V) = 0 \end{cases}$$

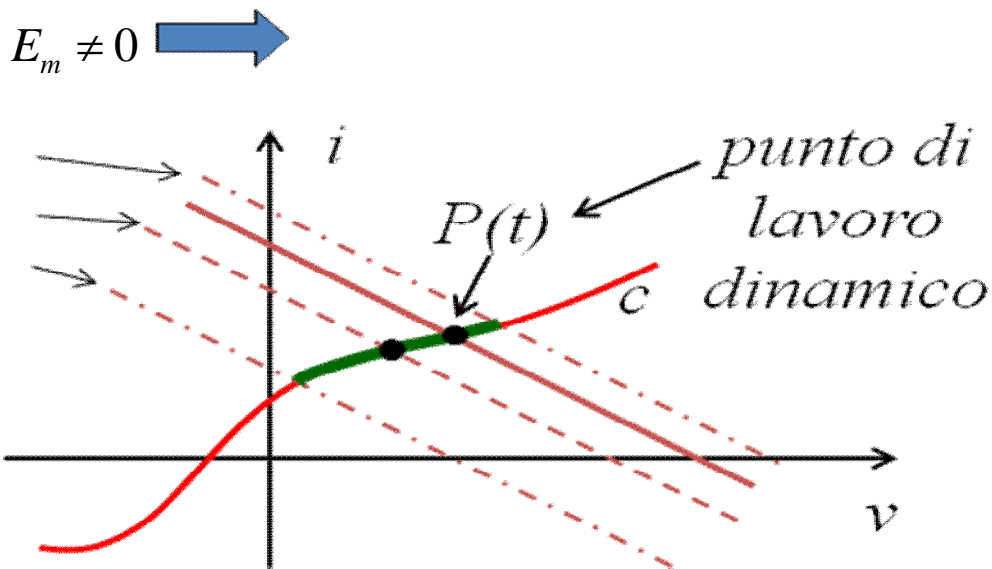
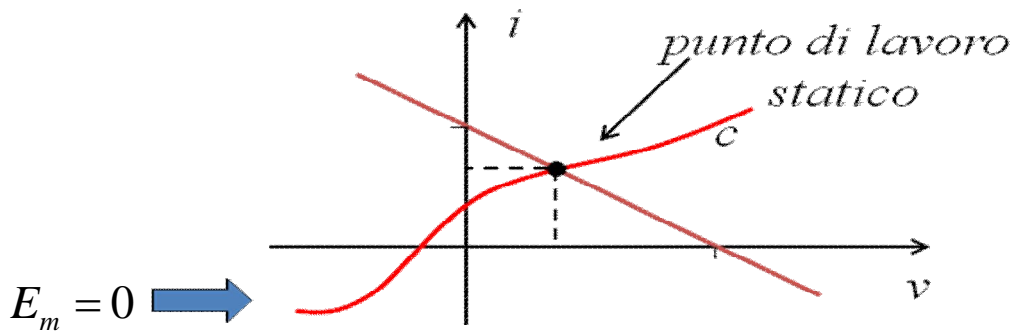
Al punto  $P$  si dà il nome di punto di lavoro del circuito.

E' utile osservare che la retta di carico è l'insieme dei possibili punti di funzionamento del bipolo costituito dalla serie generatore di tensione - resistore lineare, mentre la curva caratteristica del resistore non lineare rappresenta l'insieme dei suoi possibili punti di funzionamento. Il punto di intersezione tra queste due curve rappresenta proprio il punto di funzionamento dell'intero circuito.

Al variare della tensione impressa dal generatore, il punto di lavoro si muove lungo la curva caratteristica del resistore non lineare. Consideriamo, ad esempio, il caso in cui la tensione del generatore abbia l'espressione



$$e(t) = E_0 + E_m \cos(\omega t)$$

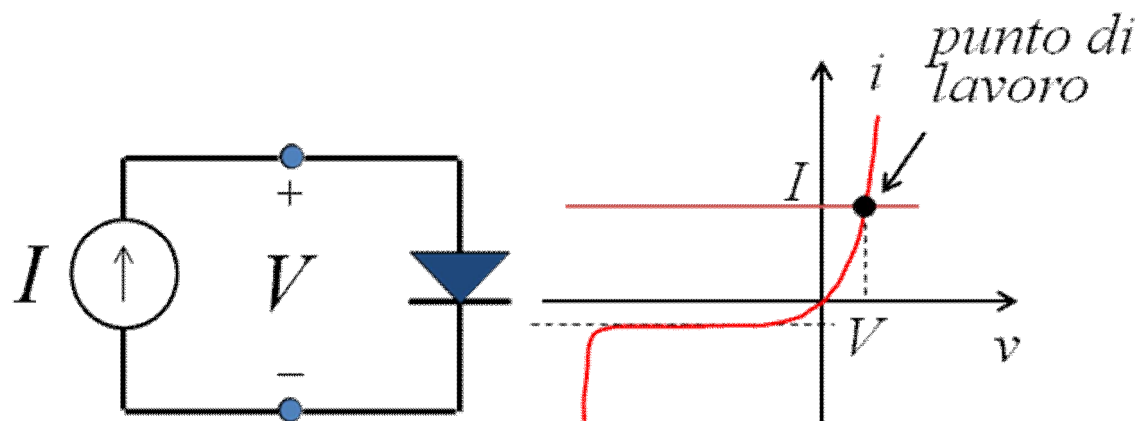
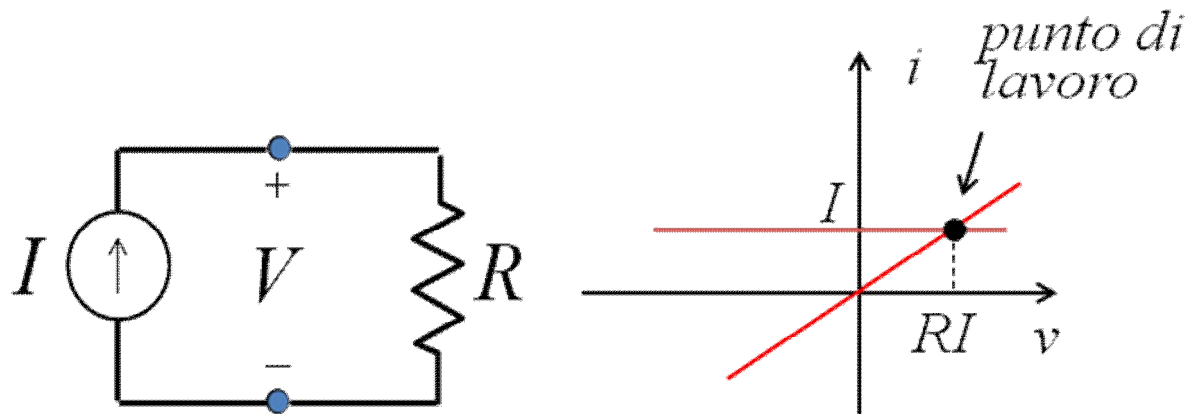


In questa nuova situazione il punto di lavoro è dinamico: indichiamolo con  $P(t)$ . Esso si muove nel tempo lungo il tratto della curva caratteristica del resistore non lineare rappresentato in verde, oscillando intorno al punto di lavoro in continua  $P_0$ . Il punto  $P_0$  rappresenta, in qualche modo, il baricentro di questo tratto di curva. L'ampiezza del termine di tensione sinusoidale determina l'ampiezza di oscillazione del punto di lavoro dinamico  $P(t)$  intorno al punto di lavoro in continua  $P_0$ .

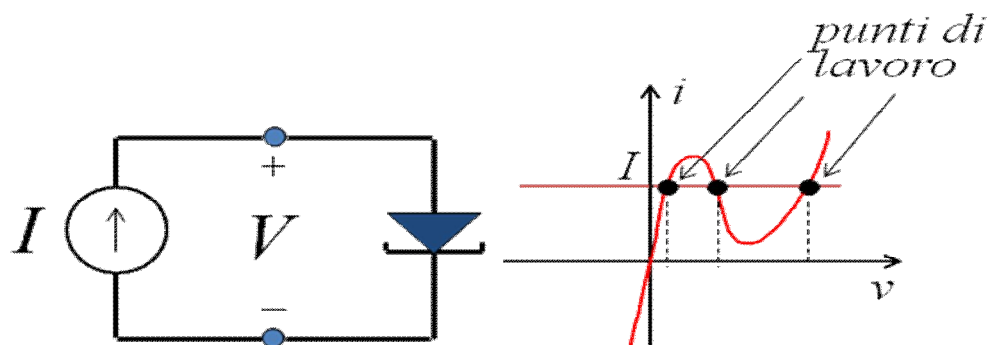
L'analisi del circuito resistivo non lineare è svolta attraverso metodo numerici basati sull'*algoritmo di Newton-Raphson*

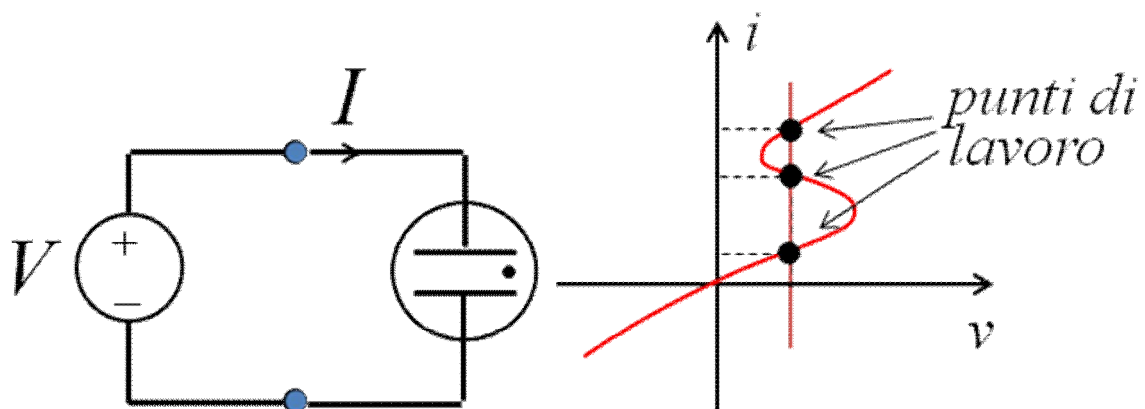
Lo studio di piccole perturbazioni intorno ad un punto di lavoro è condotto attraverso [\*l'analisi di piccolo segnale.\*](#)

*Per alcuni circuiti esiste un unico punto di lavoro statico*

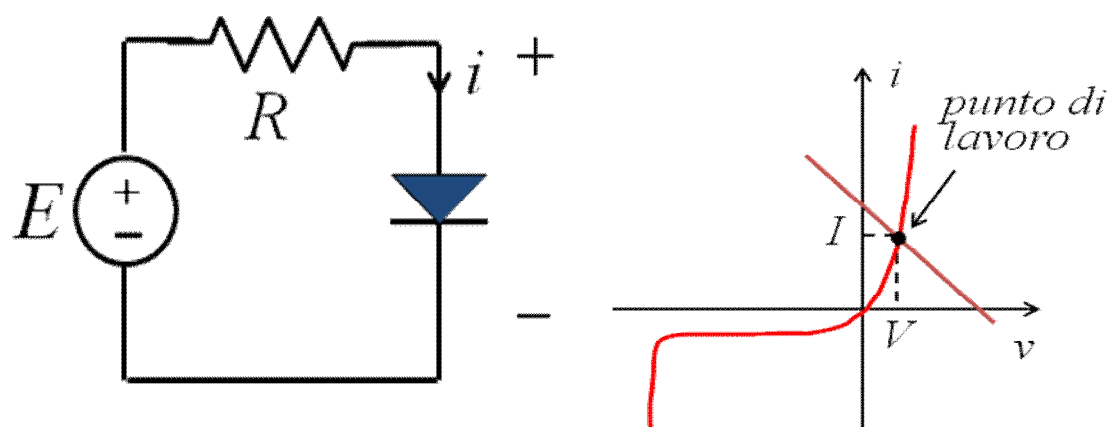


*Per altri circuiti esistono molteplici punti di lavoro*

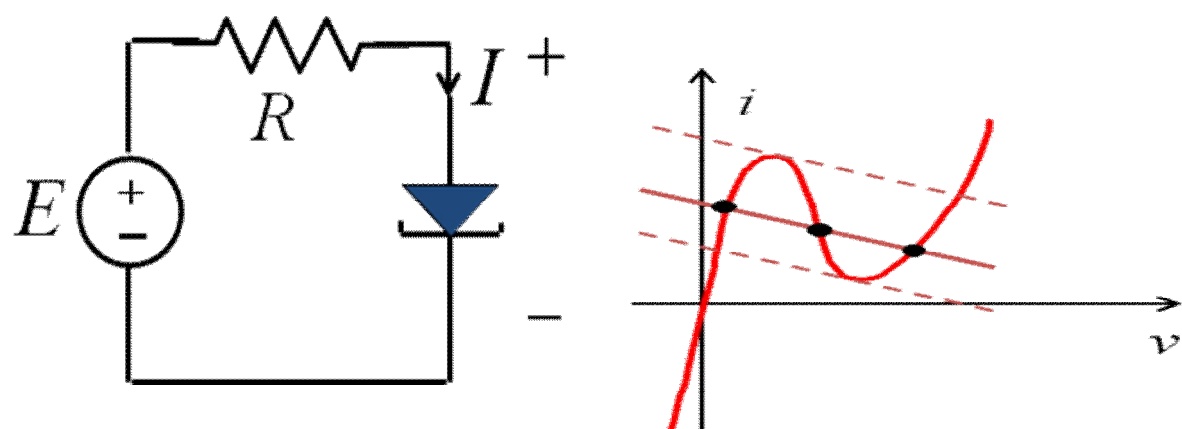




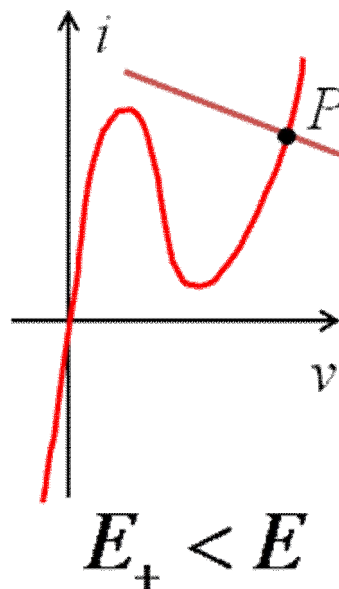
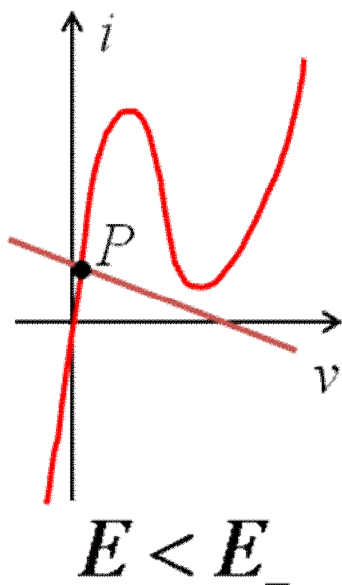
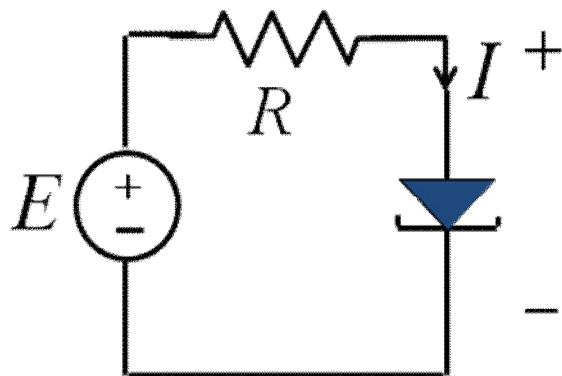
*Questo circuito ha sempre un unico punto di lavoro statico*



*Molteplici punti di lavoro statici*

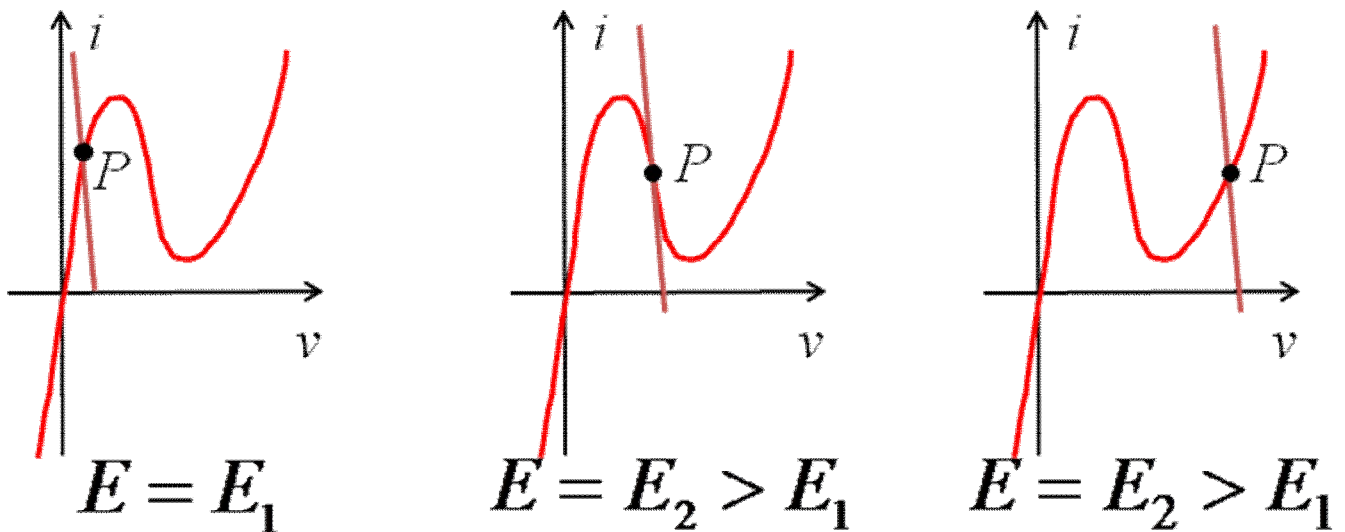


*In questi casi il circuito ha un unico punto di lavoro statico*



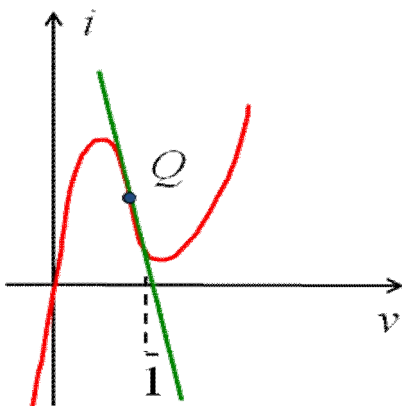
Esistono ovviamente condizioni di funzionamento in cui il circuito che abbiamo appena considerato ha un solo punto di lavoro. Ciò si verifica quando il valore della tensione del generatore è più piccolo di  $E_-$  o più grande di  $E_+$ . Se si varia il valore della resistenza  $R$  cambia la pendenza della retta di carico. In particolare, se il valore di  $R$  diminuisce allora cresce, in valore assoluto, la pendenza della retta di carico. Quando la pendenza della retta di carico aumenta, in valore assoluto, si possono realizzare situazioni in cui c'è un solo punto di lavoro, quale che sia il valore della tensione del generatore.

In questi casi il circuito ha un unico punto di lavoro statico



In questa situazione la pendenza della retta di carico è più elevata, in valore assoluto, rispetto al caso che abbiamo prima trattato. Il circuito ha un solo punto di lavoro per qualsiasi valore della tensione del generatore. La ragione è molto semplice: quando la pendenza della retta di carico supera, in valore assoluto, la pendenza del tratto a pendenza negativa della curva caratteristica del diodo tunnel, c'è sempre una sola intersezione tra le due curve. E' possibile avere tre intersezioni solo quando la pendenza della retta di carico è, in valore assoluto, più piccola della pendenza del tratto a pendenza negativa.

E' possibile individuare un criterio molto semplice attraverso cui discriminare tra queste due situazioni. Si consideri la curva caratteristica del diodo e si consideri il tratto a pendenza negativa. La massima pendenza, in valore assoluto, di questo tratto è evidenziata attraverso la retta in verde tangente alla curva caratteristica nel punto  $Q$ . Indichiamo con  $G_c$  il valore assoluto del coefficiente angolare di questa retta. Questa grandezza è omogenea con l'inverso di una resistenza, ovvero, con una conduttanza. Indichiamo con  $R_c$  l'inverso di  $G_c$ .

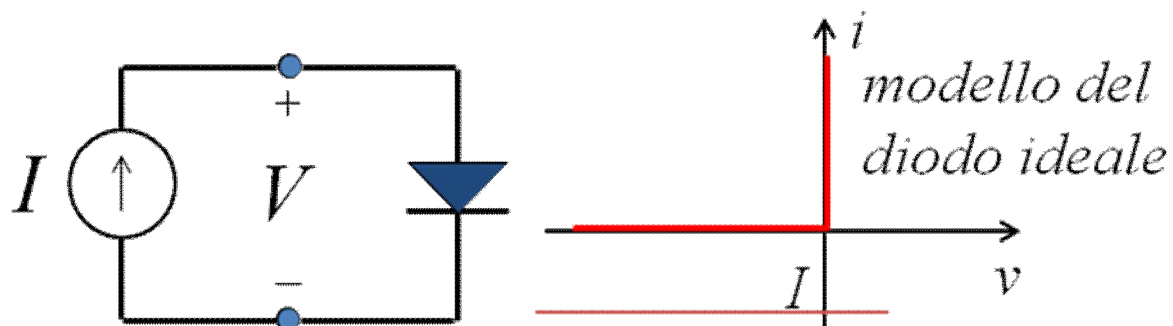


Circuiti con punti di lavoro molteplici sono di grande importanza nelle applicazioni (ad es. [flip-flop](#)).

I circuiti con più di un punto di lavoro sono molto importanti nelle applicazioni, perché attraverso di essi è possibile realizzare circuiti bistabili, come, ad esempio, i flip-flop.

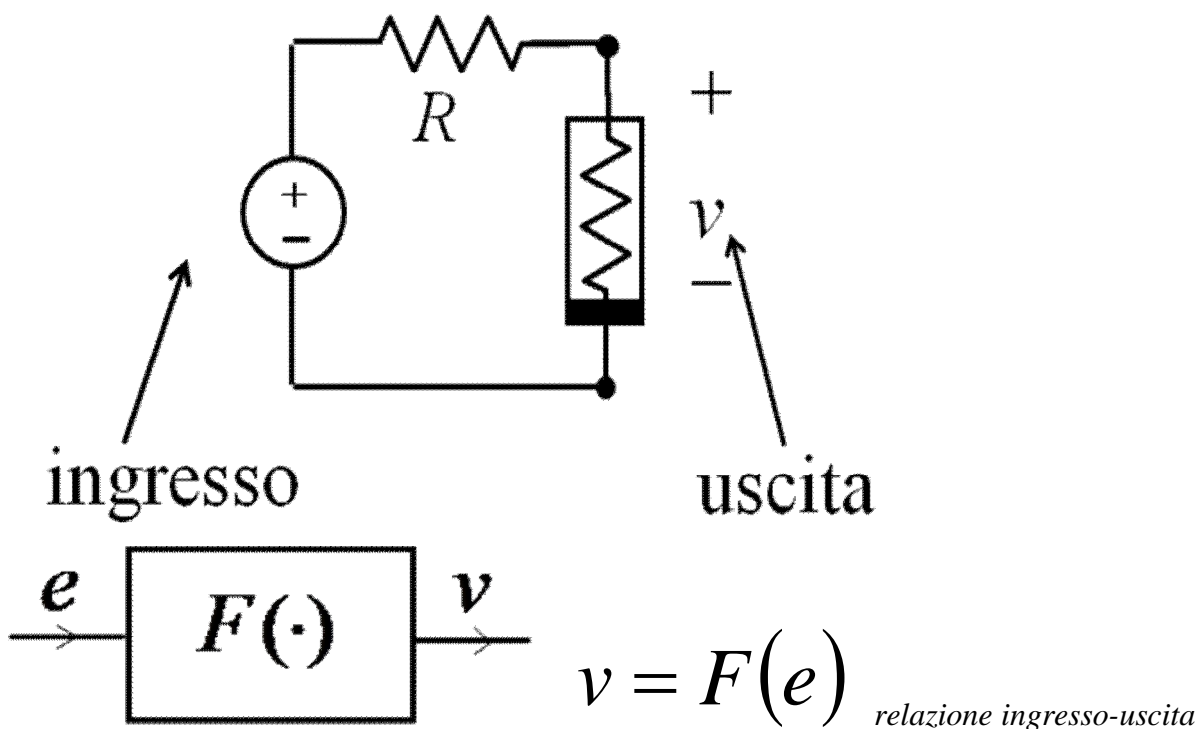
A questo punto viene naturale porre una domanda: un simulatore circuitale che utilizza metodi numerici è in grado di determinare tutte i possibili punti di lavoro di un circuito non lineare? La risposta è no. Questo fatto ci fa capire quanto è difficile lo studio delle proprietà di un circuito non lineare e quanto, allo stesso tempo, è importante arrivare a formulare dei criteri generali che consentano di rispondere a queste questioni.

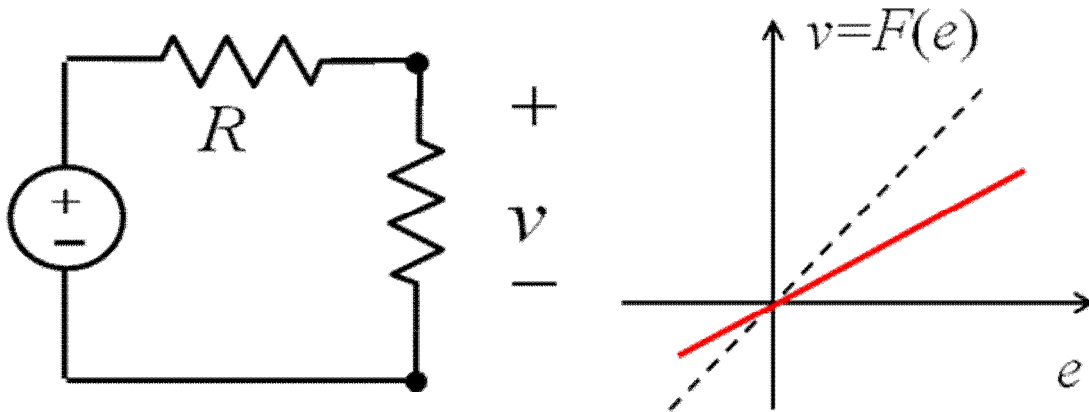
*Per alcuni modelli circuitali un punto di lavoro potrebbe non esistere affatto*



*Nessuna intersezione !!!*

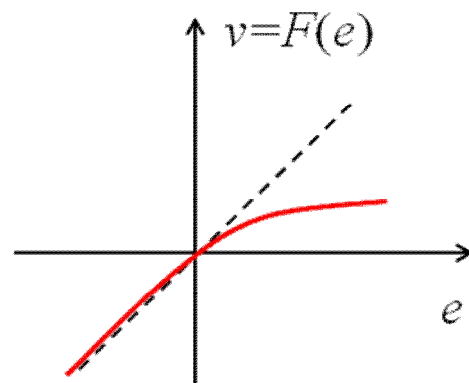
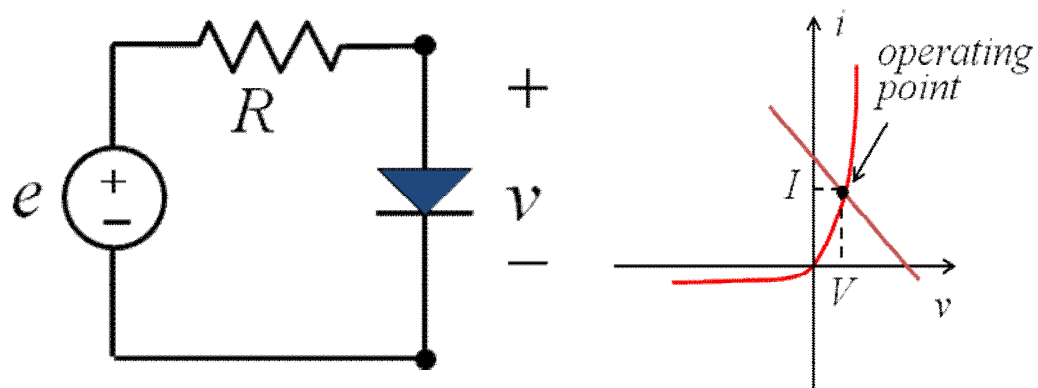
### Caratteristiche di trasferimento





$$v = \frac{R_1}{R + R_1} e \rightarrow v/e = \text{funzione di trasferimento}$$

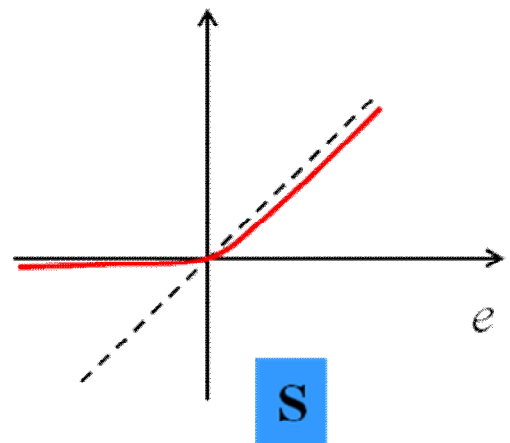
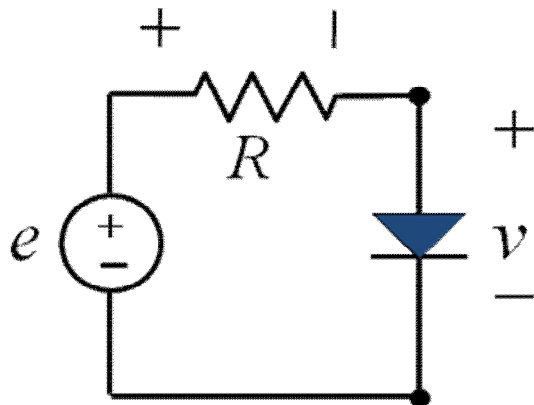
**Caratteristiche di trasferimento ad un valore**



Essa è ancora una curva passante per l'origine, ma è molto diversa dalla linea retta che abbiamo ottenuto nel caso precedente. La funzione  $F(v)$  è una funzione fortemente non lineare. In conseguenza del fatto che questo circuito ha un solo punto di lavoro, la caratteristica di trasferimento è una funzione a un solo valore della tensione in ingresso.

In questo caso la concavità della caratteristica di trasferimento è sempre rivolta verso il basso. Per tensioni in ingresso negative, la caratteristica di trasferimento tende praticamente alla bisettrice del terzo quadrante, mentre per tensioni positive essa ha un andamento molto più complesso. Si può mostrare che la sua derivata prima tende a zero quando la tensione in ingresso cresce. Anche in questo caso la curva caratteristica si trova sempre al di sotto della bisettrice del primo quadrante e al di sopra della bisettrice del terzo quadrante del piano tensione in ingresso - tensione in uscita. Anche in questo circuito l'unico elemento attivo è il generatore  $e$ , quindi, vale la proprietà di non amplificazione delle tensioni.

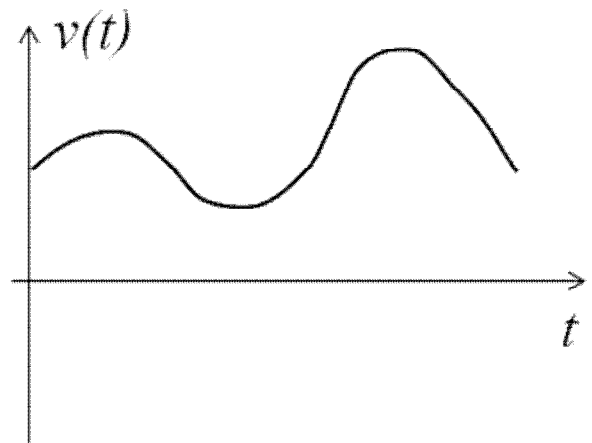
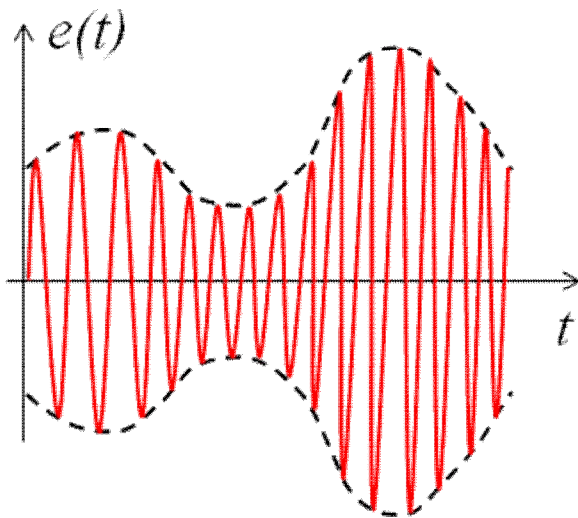
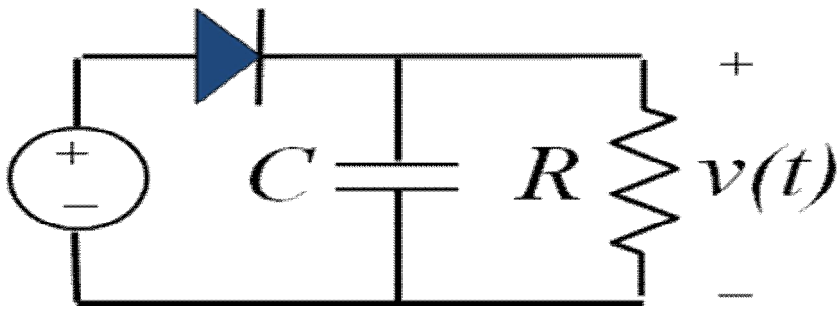
Consideriamo, ora, la caratteristica di trasferimento dello stesso circuito quando si considera come grandezza di uscita la tensione del resistore lineare.



Questa è la caratteristica di trasferimento alla base del circuito [raddrizzatore](#).



### Rilevatore di picco



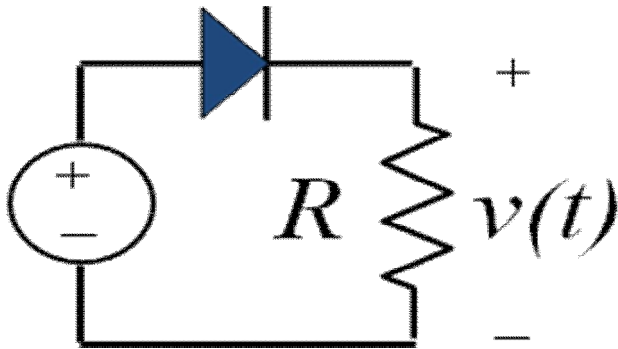
Il circuito raddrizzatore con condensatore si comporta, in questo caso, come un rivelatore di inviluppo.

La costante di tempo  $RC$  deve essere molto più grande del periodo della portante affinché sia trascurabile l'effetto dell'ondulazione, ma deve essere anche molto più piccola dell'intervallo di tempo caratteristico su cui varia l'inviluppo del segnale in ingresso affinché il cappio  $RC$  possa inseguire le variazioni dell'inviluppo.

Questo circuito è un esempio di demodulatore di ampiezza.

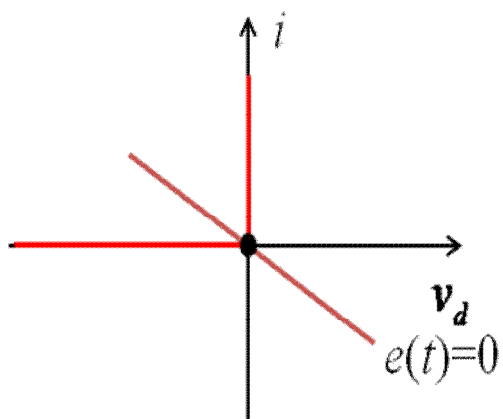
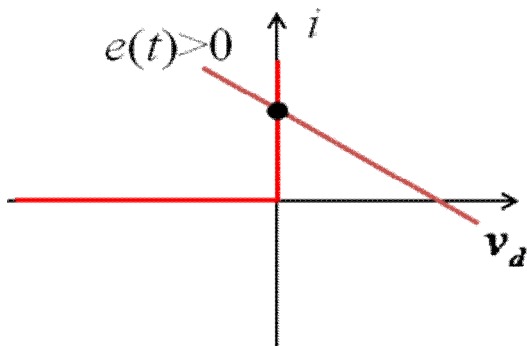
### Raddrizzatore a semi-onda

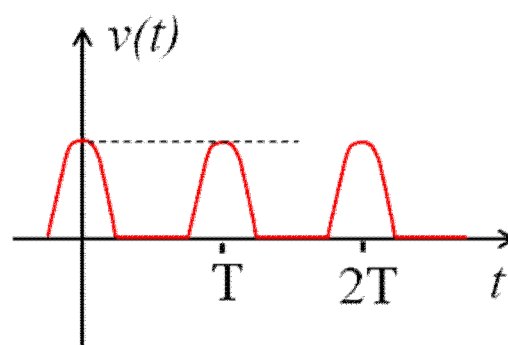
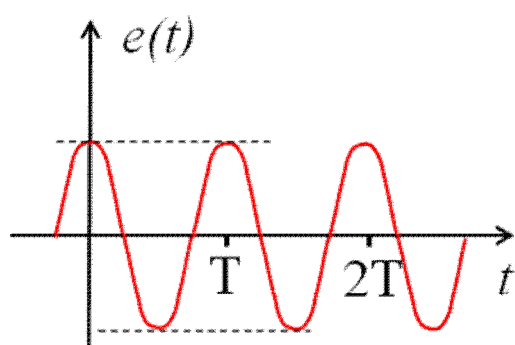
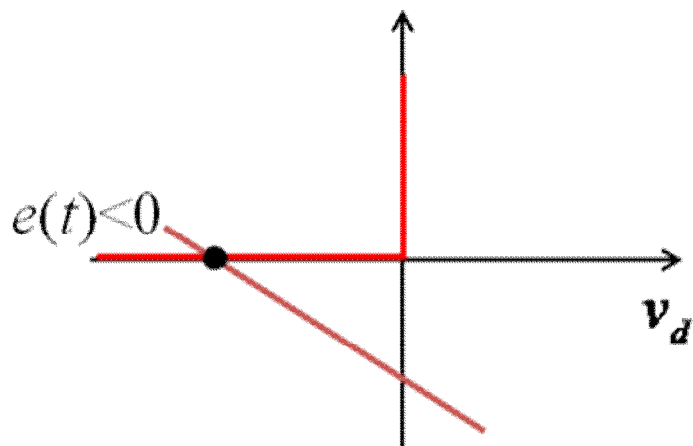
$$e(t) = E_m \cos(\omega t)$$



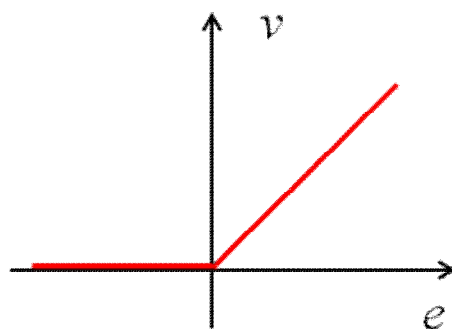
Analizzeremo il funzionamento di questo circuito supponendo che il diodo si comporti come se fosse un diodo ideale. Solo in questo modo è possibile trattare analiticamente questo problema, altrimenti dobbiamo ricorrere necessariamente a una soluzione numerica.

Questo circuito può essere risolto con il metodo grafico, riportando sul piano tensione - corrente della curva caratteristica del diodo la retta di carico della serie generatore di tensione - resistore lineare.

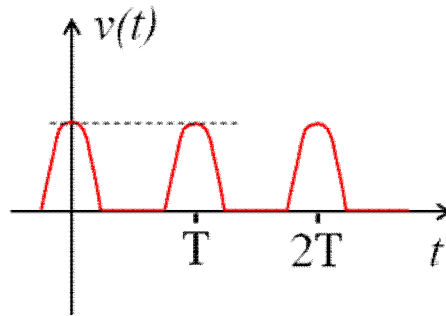




caratteristica di trasferimento



Le semionde negative sono state tagliate completamente. Questa è la ragione per la quale il circuito in esame prende il nome di circuito raddrizzatore a una sola semionda.



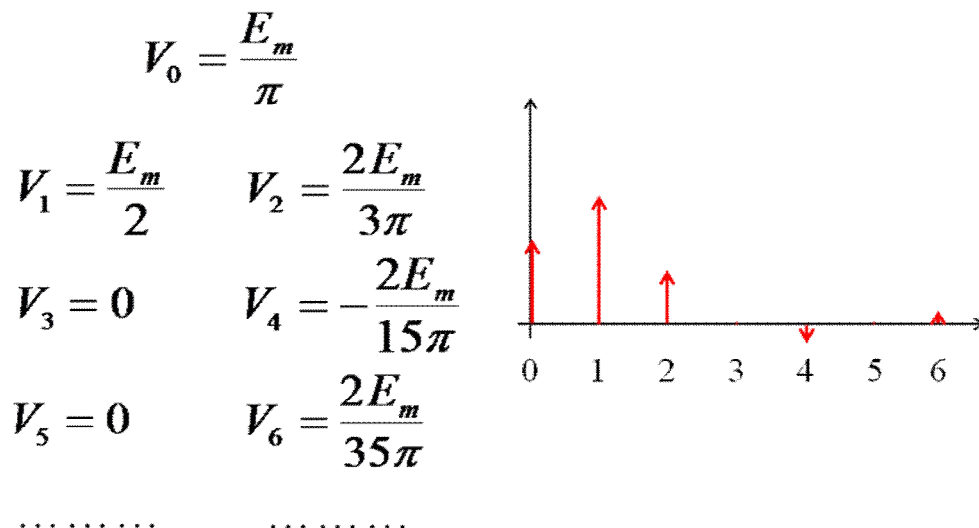
Essendo  $v(t)$  periodica di periodo  $T=2\pi/\omega$ , si può esprimere in serie di Fourier come segue:

$$v(t) = V_0 + V_1 \cos \omega t + V_2 \cos 2\omega t + \dots$$

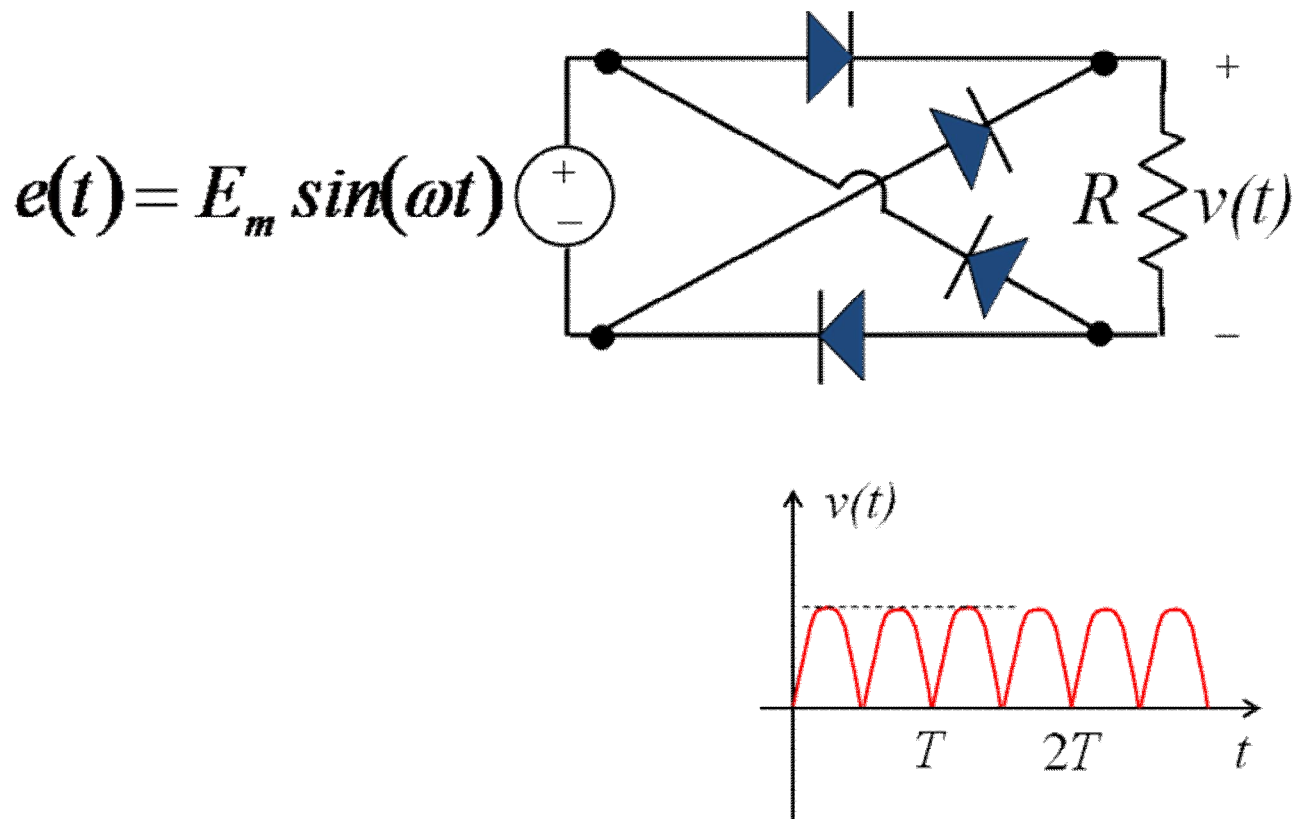
$$= V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t)$$

La tensione contiene, oltre alla sinusoide fondamentale di ampiezza  $V_1$ , armoniche di ordine superiore, di ampiezza  $V_2, V_3, \dots$ , ed il termine costante  $V_0$ , la cosiddetta *componente continua (dc)* di  $v(t)$ .

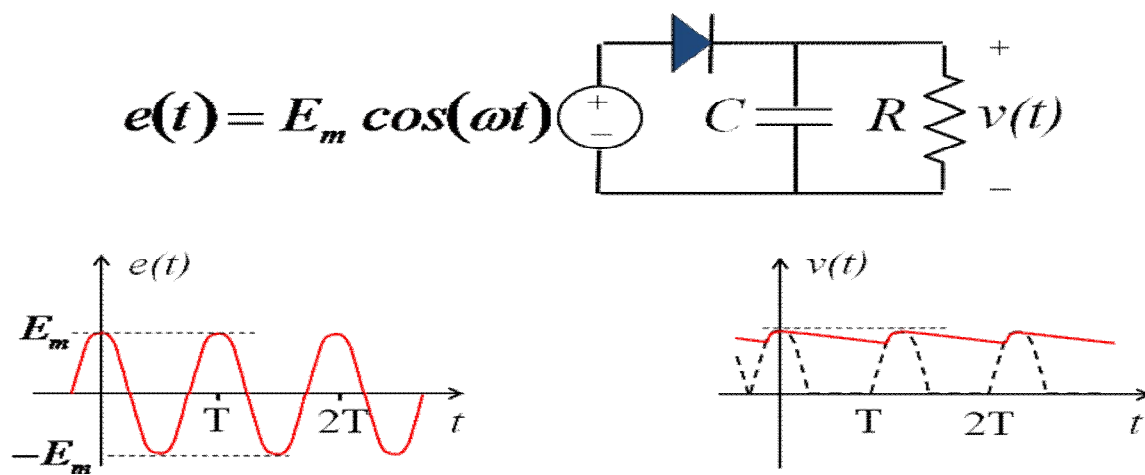
## Spettro di ampiezza della tensione



### Raddrizzatore ad due semionde



### Filtro raddrizzatore a semi-onda

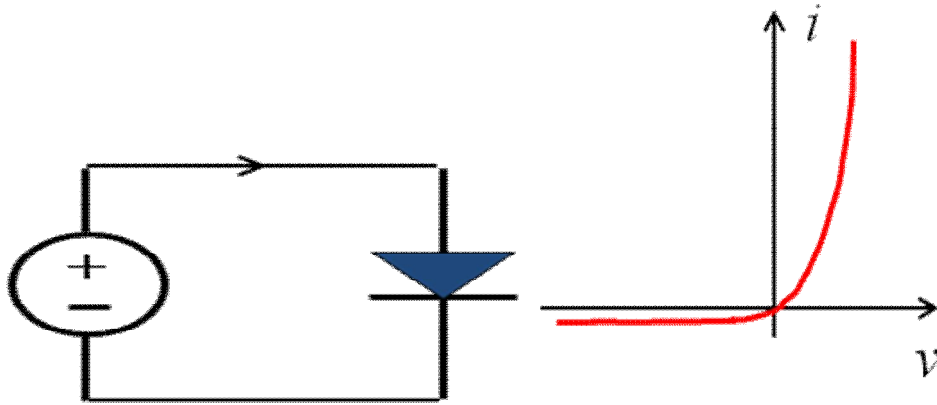


$$\tau = RC$$

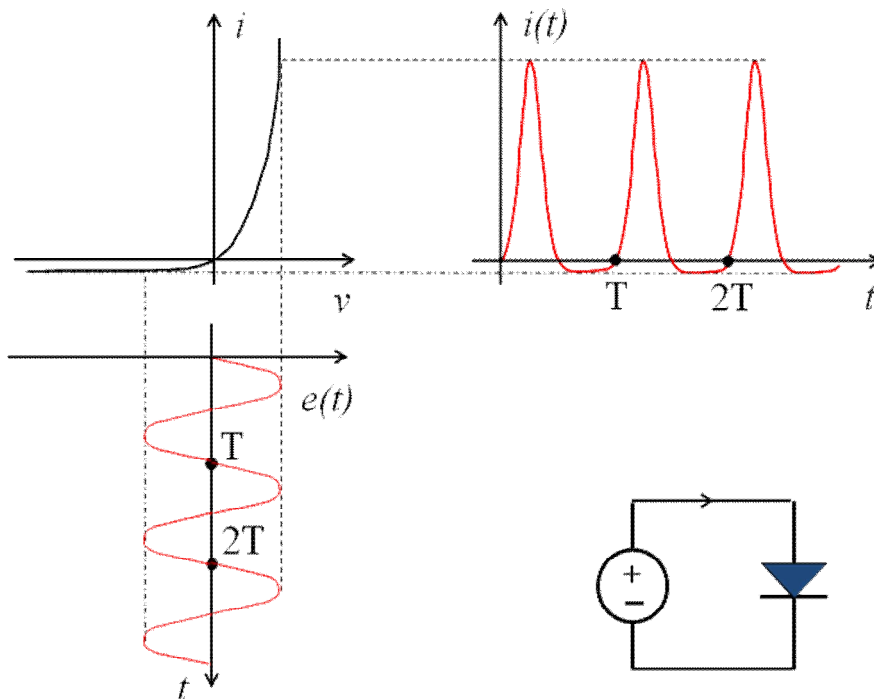
$$V_r = \frac{\pi}{\omega RC} E_m \text{ tensione di Ripple}$$

generazione di armoniche

$$e(t) = E_m \sin(\omega t)$$



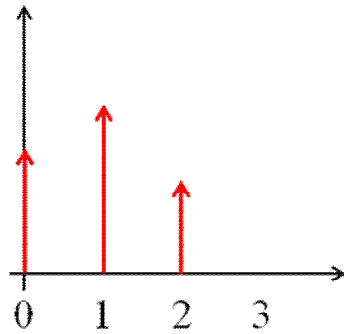
$$i(t) = I_s \{ \exp[E_m \sin(\omega t) / V_T] - 1 \}$$



Anche la forma d'onda della corrente è periodica  
di periodo  $T=2\pi/\omega$ .

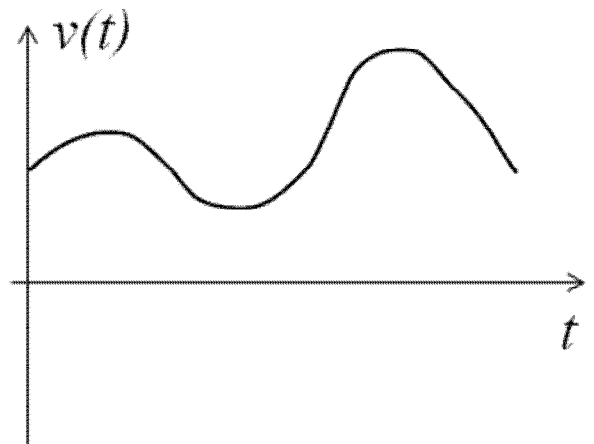
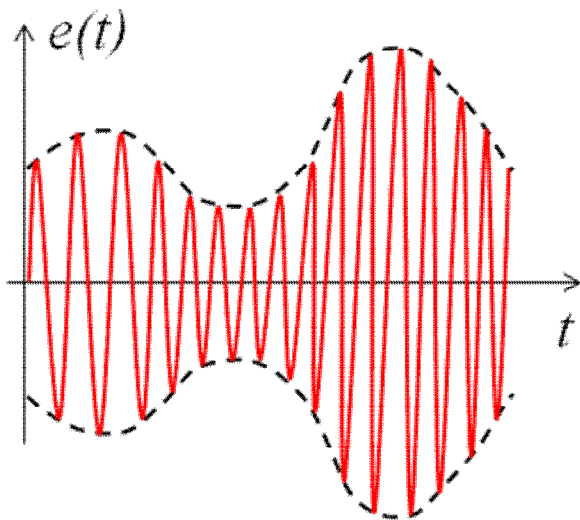
$$i(t) = I_0 + \sum_n I_n \sin(n\omega t + \alpha_n)$$

## Spettro di ampiezza della corrente



La componente continua di  $i(t)$  può essere eliminata attraverso un filtro passa-basso. Questa circostanza è alla base di tutti i circuiti rettificatori, che convertono correnti alternate in correnti continue

## Rilevatore di picco



Dati due segnali sinusoidali a frequenza  $\omega_1$  e  $\omega_2$  è possibile, attraverso resistori non lineari, generare nuovi segnali sinusoidali a frequenza

$n\omega_1 + m\omega_2$  con  $m$  ed  $n$  interi.

In molte applicazioni pratiche è richiesta la conversione di un dato segnale sinusoidale a frequenza  $\omega_1$  in un altro segnale sinusoidale a frequenza minore  $\omega_2 = \omega_1/n$ , con  $n$  intero.

Il segnale a frequenza più bassa è detto *subarmonica* del segnale originario.

Un resistore non lineare non può generare subarmoniche.