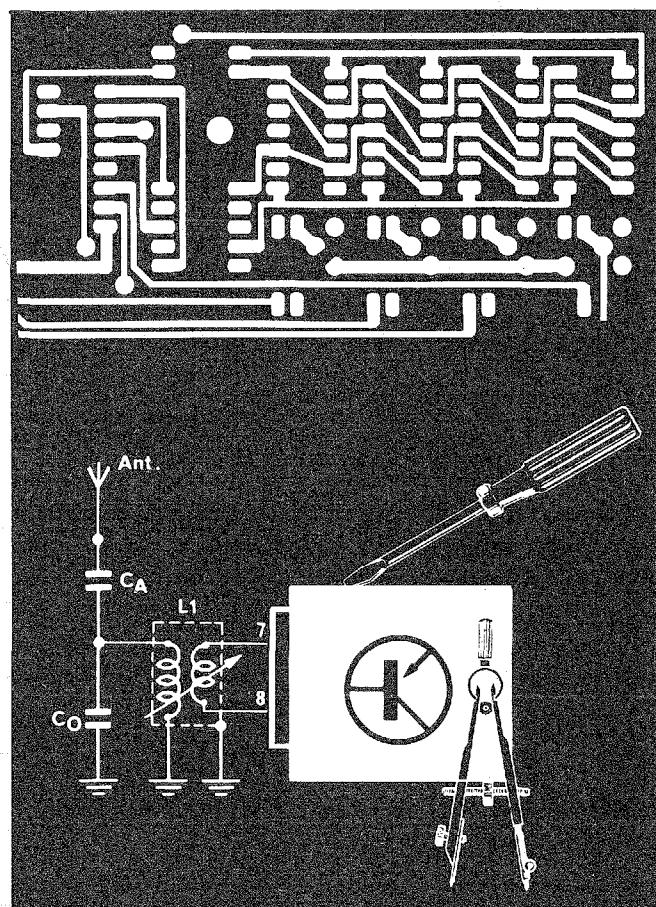


# APPUNTI DI ELETTRONICA

Supplemento al n. 3 di SPERIMENTARE  
Sped. in Abb. Postale Gruppo III/70



Sezione : 0 Propedeutica  
Capitolo : 00 Presentazione  
Paragrafo : 00.0 Esposizione generale  
Argomento : 00.00 Indice generale

APPUNTI  
DI ELETTRONICA  
Codice Pagina  
00.00 1

# APPUNTI DI ELETTRONICA

## Volume 1°

### Indice dei Capitoli e dei Paragrafi relativi alle Sezioni 0 (propedeutica) e 1 (Grandezze fondamentali)

- cap. 00 **Presentazione**  
par. 0 – Esposizione generale
- cap. 10 **Nozioni preliminari**  
par. 0 – Generalità  
1 Elettricità  
2 Parametri principali  
3 Fenomeni alternati sinusoidali  
4 Oscillazioni  
5 Analisi delle oscillazioni
- cap. 11 **Tensione Corrente Resistenza**  
par. 0 Concetti generali  
1 Tensione costante e corrente continua  
2 Tensione variabile unidirezionale  
3 Corrente variabile unidirezionale  
4 Tensione alternata  
5 Corrente alternata  
6 Resistenza statica e resistenza differenziale.

**Sezione** : 0 Propedeutica  
**Capitolo** : 00 Presentazione  
**Paragrafo** : 00.0 Esposizione generale  
**Argomento** : 00.00 Indice generale

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
**Codice** Pagina  
**00.00** 3

# **Capitolo 00**

## **PRESENTAZIONE**

### **Indice dei paragrafi e degli argomenti**

- par. 00 arg. 00.00 — Indice generale  
00.01 — Descrizione strutturale dell'opera  
00.02 — Bibliografia per il presente volume  
00.03 — Indice analitico

Sezione : Propedeutica  
Capitolo : Presentazione  
Paragrafo : Esposizione generale  
Argomento : Indice generale

## **Paragrafo 00.0**

# **ESPOSIZIONE GENERALE**

### **Indice degli argomenti e delle pagine**

arg. 00.00    **Indice generale**

- pag. 1 — Indice dei capitoli e dei paragrafi relativi alle sezioni 0 e 1
- " 3 — Indice dei paragrafi e degli argomenti relativi al Capitolo 00
- " 5 — Indice degli argomenti e delle pagine relativi al paragrafo 00.0

arg. 00.01    **Descrizione strutturale dell'opera**

- pag. 1 — Struttura dell'opera
  - Caratteristiche
  - Metodo di spiegazione
  - Contrassegni sulle pagine
- " 2 — Criterio di numerazione decimale dei fogli
- " 3 — **Comunicazione ai lettori**
  - Premessa
  - Presentazione
- " 4 — Come è nata l'idea
  - Illustrazione del metodo
- " 5 — Formule
  - Concetti
- " 6 — Precisazioni
  - Alcune considerazioni
- " 7 — Argomenti preferiti in questa trattazione
  - Chiediamo venia
  - Conclusioni

arg. 00.02    **Bibliografia per il presente volume**

- pag. 1 — Libri
- " 2 — Riviste

arg. 00.03    **Indice analitico**

**Sezione** : 0 Propedeutica  
**Capitolo** : 00 Presentazione  
**Paragrafo** : 00.0 Esposizione Generale  
**Argomento** : 00.01 Descrizione strutturale dell'opera

**APPUNTI**  
**DI ELETTRONICA**  
 Codice                    Pagina  
 00.01                    1

## STRUTTURA DELL'OPERA

Questo libro è costituito da una raccolta di fogli che trattano ciascuno un solo argomento come risulta dalla intestazione unificata.

L'argomento trattato su ogni singola pagina, viene esaurito nella stessa pagina.

In questo modo si evita che le figure possano trovarsi in pagine diverse da quelle del testo e perciò la lettura viene facilitata.

## CARATTERISTICHE

Il libro può essere trasformato in una raccolta di fogli mobili semplicemente staccandoli dal dorso, forandoli opportunamente e raccogliendoli in apposita copertina con anelli che si trova in qualsiasi cartoleria.

Questo sarà opportuno farlo:

- 1) — qualora il lettore intenesse aggiungere suoi appunti
- 2) — qualora il lettore volesse inserire dei cartoneini separatori per facilitare la ricerca e per meglio suddividere i capitoli
- 3) — per inserire eventuali fogli aggiuntivi che nel futuro venissero pubblicati
- 4) — per poter effettuare confronti di analogie con altri fogli della raccolta.

A questo scopo si segnala che il codice decimale di collocazione, posto accanto alla testata unificata, vuole ottenere lo scopo di permettere l'inserzione di fogli senza interferire sulla struttura stessa della pubblicazione.

Il lettore può dotare di linguette sporgenti con il richiamo del codice ogni foglio relativo ai vari indici.

In questo modo si facilita la ricerca e la consultazione.

Non si è voluto predisporre questo vantaggio in sede redazionale per non rendere troppo costoso ogni volume.

## METODO DI SPIEGAZIONE

Si è voluto dare alle figure un valore preponderante usando il testo come ausiliario esplicativo delle stesse.

Questo metodo, che si allontana dall'ortodossia tradizionale, è stato gradito dai lettori della precedente esperienza editoriale (v., pagg. seguenti).

Essi hanno riconosciuto in questo metodo una forza comunicativa notevole e molto più vicina a quella della viva voce dell'insegnante che spiega alla lavagna dialogando con gli allievi.

Vorremmo che il lettore apprezzasse quanto questo metodo abbia richiesto maggior dedizione da parte dell'autore e della Redazione e maggiori costi da parte dell'Editore.

## CONTRASSEGNI SULLE PAGINE

I contrassegni riportati sulle pagine in alto a destra hanno il seguente scopo:

- |                     |   |
|---------------------|---|
| nessun contrassegno | pagine sufficienti per coloro che vogliono accontentarsi di una conoscenza superficiale   |
| una stella *        | pagine destinate a coloro che desiderano una maggior conoscenza della materia, ma non possono essere trascurate dai lettori delle sole pagine senza contrassegno per quanto riguarda le conclusioni |
| due stelle **       | pagine destinate solo a coloro che desiderano un maggior approfondimento.   |

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 0	Propedeutica
00.01	2	Capitolo : 00	Presentazione
		Paragrafo : 00.0	Esposizione generale
		Argomento : 00.01	Descrizione strutturale dell'opera

**CRITERIO DI NUMERAZIONE DECIMALE DEI FOGLI****A) SUDDIVISIONE**

L'opera è suddivisa in 10 sezioni  
Ogni sezione è suddivisa in 10 capitoli  
Ogni capitolo è suddiviso in 10 paragrafi  
Ogni paragrafo è suddiviso in 10 argomenti

**B) CODICE DI NUMERAZIONE DELLE PAGINE DI TESTO**

Normalmente ogni foglio è individuato da un

**codice di quattro cifre**

suddivise in due gruppi di due cifre  
(due cifre intere e due cifre decimali)

Le due cifre intere sono  
stampate in corpo maggiore  
per evitare confusioni

Una quinta cifra può esistere  
se si vuole suddividere  
ulteriormente il soggetto  
relativa alla cifra precedente

12.345

Ogni cifra si riferisce ad una suddivisione del soggetto relativo alla cifra precedente.

**C) ESEMPIO: il foglio**

Intitolato: "Analisi armonica delle forme d'onda rettangolare"  
appartiene alla

Codice pag.

10.51 1

Sezione 1 del piano dell'opera (Grandezze fondamentali)

Capitolo 10 (Nozioni preliminari)

Paragrafo 10.5 (Analisi delle oscillazioni)

Foglio 10.51 (Onda quadra)

indicazione della pagina  
relativa al medesimo numero di codice

**Sezione** : 0 Propedeutica  
**Capitolo** : 00 Presentazione  
**Paragrafo** : 00.0 Esposizione generale  
**Argomento** : 00.01 Descrizione strutturale dell'opera

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
**Codice** **Pagina**  
**00.01** **3**

## COMUNICAZIONE AI LETTORI

Cari lettori,

### P R E M E S S A

la precedente pubblicazione di questi fogli sulla rivista "Sperimentare" è stata oggetto di una esperienza interessante per tutti.

Lo scopo dell'autore, che l'Editore, la Direzione e la Redazione avevano accettato, consisteva nella elaborazione di articoli propedeutici di elettronica di nuova concezione da pubblicare sulla rivista senza una sequenza precisa.

Si è provveduto, per chi avesse voluto farne la raccolta, a dotare ogni pagina di un codice di collocazione al fine di dare alle pagine stesse una sequenza logica, in modo da trasformare la collezione in volumi di facile consultazione.

Il gradimento dei lettori ha però creato alcune difficoltà.

Coloro che vedevano nella pubblicazione un "corso di elettronica" volevano presto vederne la fine.

I nuovi lettori volevano gli arretrati, che quando reperibili, rendevano notevole la spesa per lo scopo che volevano raggiungere.

Ed è così che l'Editore ha deciso di ripubblicare il lavoro nella veste attuale.

### P R E S E N T A Z I O N E

Non è facile improvvisarsi buon tecnico elettronico perché difficilmente la tecnica elettronica è intuibile da chi ci si accosta per la prima volta.

Infatti niente è tanto apparentemente statico e al tempo stesso tanto freneticamente dinamico di ciò che è contenuto in una apparecchiatura elettronica.

Il meccanico, l'idraulico, il muratore, il falegname e perfino l'elettrotecnico vedono il funzionamento delle loro opere e possono apportarvi riparazioni, modifiche o miglioramenti, appoggiandosi unicamente al loro intuito.

Il tecnico elettronico non può. Niente si muove sotto il suo sguardo; di primo acchito i collegamenti e gli elementi del circuito sembrano tutti uguali.

Per capire qualche cosa egli deve avere imparato prima.

Deve fare delle misure, deve fare qualche piccolo calcolo, deve consultare delle tabelle.

Insomma, deve avere studiato la materia!

Conoscenza dell'elettronica significa soprattutto e prima di tutto conoscenza della matematica e della geometria per sapere bene calcolare gli elementi e ben interpretare i grafici.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 0	Propedeutica
00.01	4	Capitolo : 00	Presentazione
		Paragrafo : 00.0	Esposizione generale
		Argomento : 00.01	Descrizione strutturale dell'opera

**COME E' NATA L'IDEA**

Chi vuole studiare bene ciò che legge dai libri o vuole fissare bene nella memoria ciò che ha imparato dalla viva voce dell'insegnante, inevitabilmente si fa degli appunti.

Il saper fare appunti è però anche un'arte e il farli per se stesso è molto più semplice che farli in modo che siano leggibili anche agli altri.

L'autore che non è un pozzo di scienza, ma un pazzo per l'insegnamento e per l'elettronica, doveva pur prima imparare se voleva ben insegnare.

E' così che si è fabbricato questi appunti congegnati in modo che sinotticamente potessero essere ricordati con un solo sguardo.

Il continuo dialogo con gli allievi, le loro mille domande per le quali egli è a loro grato, hanno permesso il continuo perfezionamento attraverso l'individuazione delle difficoltà.

La scoperta di questi appunti da parte degli allievi e la loro diffusione nell'Istituto dettero l'idea all'autore di farne una pubblicazione che la Casa J.C.E. accettò.

**ILLUSTRAZIONE DEL METODO**

Con questi appunti si vorrebbe ottenere lo scopo di spiegare la materia con la stessa evidenza di una lezione fatta alla lavagna.

Si è constatato che la netta separazione fra testo e figura, tanto cara agli Editori in generale perché più economica, crea difficoltà all'apprendimento dato che lascia allo studioso il fastidio e la perdita di tempo di integrare nella sua immaginazione il testo e la figura.

Questo metodo consiste appunto nell'integrazione fra testo e figura e per questo si è fatto anche in modo che la trattazione di ogni argomento non vada mai al di là della pagina nella quale si trova.

Sui vantaggi della codificazione dei fogli è già stata data spiegazione.

Le quattro cifre decimali del codice più il numero illimitato di pagine che ciascuno può contenere non spaventino il lettore: non vogliamo occupare tutte le possibilità offerte da questo sistema!

Se riusciremo a produrre 1.500 pagine in 10 fascicoli ringrazieremo il destino di aver mantenuto salute ed entusiasmo all'autore, accettazione al Lettore e prosperità all'Editore.

**FORMULE**

Dalla formula il principiante, poco avvezzo alla matematica, si aspetta di avere il magico meccanismo secondo il quale, introdotti i dati, si ottiene un risultato.

Sì, la formula serve anche per questo, ma chi non conosce bene il significato di alcune espressioni fondamentali, che oltre a tutto sono anche semplici, resta disorientato dalle miriadi di formule particolari che da queste derivano, fra le quali egli deve effettuare la scelta.

Noi bandiremo le formule come espressioni statiche, ma ci occuperemo delle relazioni matematiche che certe grandezze devono mantenere fra di loro per rispettare un determinato fenomeno in qualsiasi circostanza.

## CONCETTI

Se lo studioso di un fenomeno della natura ne afferra il concetto fondamentale, che generalmente è assai semplice anche in elettronica, non gli sarà difficile tradurlo poi in espressione matematica.

Prendiamo un esempio sconcertante per la sua semplicità a cui non poche espressioni elettroniche assomigliano.

Si tratta infatti di risolvere il problema che dice: vado al mercato e compero: 3 Kg di mele a 500 L/Kg, 4 Kg di pere a 600 L/Kg e 5 Kg di arance a 700 L/Kg. Quanto ho speso in tutto?

Tutti conoscono il procedimento per ottenere il risultato richiesto.

Pochi saprebbero tradurlo nella seguente espressione matematica, che dice la stessa cosa:

$$S = p_1 \cdot Q_1 + p_2 \cdot Q_2 + p_3 \cdot Q_3$$

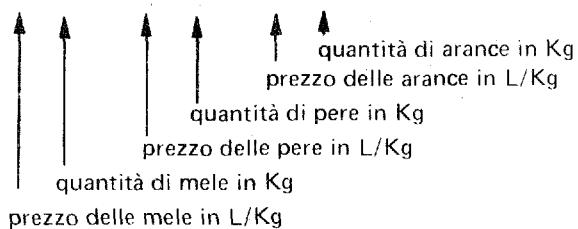
dove:  $S$  rappresenta la spesa totale

$p_1, p_2, p_3$  rappresentano rispettivamente i prezzi, in L/Kg, delle mele, delle pere e delle arance

$Q_1, Q_2, Q_3$  rappresentano rispettivamente le quantità acquistate, in Kg, di pere, mele e arance

Per facilitare lo studio, tutte le volte che sarà possibile, noi illustreremo l'espressione in questo modo.

Spesa totale in L. →  $S = p_1 \cdot Q_1 + p_2 \cdot Q_2 + p_3 \cdot Q_3$



## PRECISAZIONI

E' interessante comunque vedere l'espressione matematica non come un mezzo statico per ottenere un risultato, ma come un mezzo dinamico per rendersi conto di come il risultato (la spesa totale nel caso dell'esempio precedente) possa cambiare al variare dei singoli prezzi o delle singole quantità.

Un altro modo più sintetico di esprimere lo stesso concetto di prima è il seguente:

$$S = \sum p_n Q_n$$

Noi cercheremo di evitare di ricorrere ad espressioni di questo tipo per non complicare lo studio, così come cercheremo di evitare espressioni legate al calcolo infinitesimale.

Se poi qualche lettore crede ancora che questo lavoro sia redatto a livello universitario sarà bene che si convinca di non avere la preparazione sufficiente per affrontare seriamente l'elettronica.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

<b>Codice</b>	<b>Pagina</b>	<b>Sezione</b>	: 0	Propedeutica
00.01	6	<b>Capitolo</b>	: 00	Presentazione
		<b>Paragrafo</b>	: 00.0	Esposizione generale
		<b>Argomento</b>	: 00.01	Descrizione strutturale dell'opera

**ALCUNE CONSIDERAZIONI**

Gli scritti tecnici in generale non dovrebbero essere compilati in modo che la loro lettura debba essere ascoltata con voluttà tutta fine a se stessa!

I tecnici, e con questa parola vogliamo indicare tutti coloro che per motivi di lavoro o di passione amano ancora seguire le incorruttibili discipline di Pitagora, preferiscono scritti da osservare attentamente, piuttosto che leggerli pedissequamente, preferiscono scritti schematizzati in modo da ottenere da essi il maggior contenuto di informazione.

E' importante che il tecnico non debba far fatica, né perdere tempo per reperire in un libro, in un rapporto, in una lettera di lavoro, in un disegno o in una figura, l'informazione che gli interessa.

Il tempo che molti perdono a leggere e ad interpretare cattive o incomplete spiegazioni costuisce in una perdita economica molto maggiore del risparmio che si è fatto nella compilazione, che generalmente è eseguita in fretta e furia da una sola persona.

**ARGOMENTI PREFERITI IN QUESTA TRATTAZIONE**

Quando si vuol dare semplicità alla spiegazione di certi fenomeni bisogna anche avere il coraggio di dire delle inesattezze, per cui ne troverete molte qui dentro, dato che vogliamo perseguire lo scopo di convincere i principianti che l'elettronica non è una materia poi così complicata!

Per capire poi la complicazione delle cose è necessario che si abbia ben compreso prima la loro semplificazione.

Daremo più importanza agli argomenti che il lettore sia in grado di realizzare e di sperimentare con attrezzi abbastanza comuni.

Cenni soltanto verranno dati circa la struttura intima e dei metodi di produzione degli elementi del circuito poiché pensiamo che a nessuno verrà in mente, a livello singolo, di fabbricarsi un transistor o qualche altro elemento del circuito!

**CHIEDIAMO VENIA**

Nel rifacimento di ogni pagina si è tentato di ricuperare quanto si poteva del materiale già pubblicato su "Sperimentare".

Per questo motivo, spesso, la perfezione editoriale lascia un po' a desiderare e ne chiediamo venia ai lettori.

**CONCLUSIONI**

L'autore ringrazia la Direzione e l'Editore che, consapevoli degli scopi che si volevano raggiungere, non hanno lesinato spazio sacrificando i costi alla facilità dello studio per il lettore.

L'autore ringrazierà quei Lettori che vorranno dare suggerimenti, critiche, disapprovazioni, e che volessero anche segnalare argomenti di loro interesse.

A tutti buona lettura. Cordialmente il vostro

Alvas T. Gilcart

Sezione : 0 Propedeutica  
 Capitolo : 00 Presentazione  
 Paragrafo : 00.0 Esposizione generale  
 Argomento : 00.02 Bibliografia per il presente volume

Codice Pagina  
 00.02 1

— LIBRI —

Abbreviazione nel contesto	Autore	Titolo	Edizione
Biancoli V.R.T.	L. Biancoli	Vademecum del tecnico Radio/TV	Carlo Moradei
Giometti	R. Giometti F. Frascari	Elettronica Elettronica Radiotecnica Vol. 1 <sup>o</sup> e 2 <sup>o</sup>	Calderini 1973
Terman RE Handb.	F.E. Terman	Radio Engineers' Handbook	McGraw Hill 1943
E.D.T.	—	Enciclopedia della Scienza e della Te- cnica 10 vol.	Mondadori 1966
R.E.D.	—	Riassunti editoriali Delfino	Editoriale Delfino
Barbagelata	A. Barbagelata	Misure elettriche 2 vol.	Tamburini 1950
Telettra M.I.T.			

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**Codice      Pagina  
**00.02**      **2**

Sezione	:	0	Propedeutica
Capitolo	:	00	Presentazione
Paragrafo	:	00.0	Esposizione generale
Argomento	:	00.02	Bibliografia per il presente volume

**— RIVISTE —**

	Titolo	Edizione
TA	Tecniche dell'automazione	ETASKOMPAS
Sp	Sperimentare	J.C.E.
S.R.	Selezione Radio TV	J.C.E.
E.O.	Elettronica Oggi	J.C.E.

**Sezione** : 0 Propedeutica  
**Capitolo** : 00 Presentazione  
**Paragrafo** : 00.0 Esposizione generale  
**Argomento** : 00.03 Indice analitico

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
**Codice** **Pagina**  
**00.03** **1**

## INDICE ANALITICO DEL PRESENTE VOLUME

### Avvertenza

Ricordando il criterio di codificazione espresso al cod. **00.01 - 2**  
nell'indice che segue

se l'indicazione è fatta con	significa che la voce cercata è trattata
una sola cifra (es.: 2)	nell'intera <b>sezione</b> relativa alla cifra indicata
due cifre (es.: 12)	nell'intero <b>capitolo</b> relativo alle cifre indicate
tre cifre (es.: 11.4)	nell'intero <b>paragrafo</b> relativo alle cifre indicate
quattro cifre (es.: 10.53)	nell'intero <b>argomento</b> relativo alle cifre indicate
cinque cifre (es.: 10.21-3)	nella <b>pagina</b> relativa alle cifre indicate

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 0 Propedeutica
00.03	2	Capitolo : 00 Presentazione
		Paragrafo : 00.0 Esposizione generale
		Argomento : 00.03 Indice analitico

10.01-2	accelerazione	10.12-1	elementi del circuito
11.11-2	alternata (definizione aggettivo)	10.13-1	— attivi
10.21-3	ammettenza	10.13-1	— reattivi
10.11-2	ampere	10.13-1	— passivi
10.31-2	ampiezza	10.11-2	elettrone
10.5	analisi delle oscillazioni	10.01-2	energia
10.41-2	angolo percorso	10.51-3	equazione di Fourier
10.41-2	arco percorso	10.31-2	fase
10.51-2	armoniche	10.58-2	fattore di cresta
11.71-1	ascissa	10.58-2	— di forma
10.11-2	atomo	10.01-1	femto —
10.01-2	atto —	10.01-2	flusso elettrostatico
11.21	caduta di tensione	10.01-2	flusso magnetico
10.01-2	capacità	10.43-4	forma d'onda a dente di sega
11.13-2	caratteristiche di lavoro di generatore	10.54	"    "    "    "    "    "
11.71-1	caratteristica di funzionamento di componenti	10.43-1	— — a gradino
11.74	— non lineare	10.43-3	— — ad impulso
10.01-2	carica elettrica	10.43-2	— — rettangolare
10.11-2	— negativa	10.52	"    "    "
10.11-2	— — positiva	10.43-4	— — sinoidale
10.01-1	centi —	10.43-4	— — triangolare
10.01-1	chilogrammo-massa	10.53	"    "    "
10.01-2	ciclo	10.59-1	forme d'onda (esame comparativo)
10.11-1	circuito elettrico	10.01-2	forza
10.12-1	circuito elettrico	12.31-1	— controelettromotrice
00.01-2	codice decimale dei fogli	10.01-2	— elettromotrice
10.13-1	collegamento in serie	11.12-1	"    "
10.13-2	— — parallelo	10.01-2	— magnetomotrice
10.13-2	— — misto	10.51-1	Fourier
10.31-1	composizione dei vettori	10.01-2	frequenza
10.43-6/8	— di grandezze	10.41-1	"
10.01-2	conduttanza	10.11-1	generatore
10.21-3	"	11.12-2	— di corrente
11.11-1	"	11.13	— di f.e.m.
11.11-2	continua (definizione aggettivo)	11.12-2	— di tensione
11.6	corrente alternata	10.01-1	giga
11.2	— continua	10.42-2	grandezze aperiodiche
11.4	— — modulata	10.31-1	— alternate sinoidali
10.01-2	— elettrica	10.31-1	— rappresentazioni geometriche
11	"    "	10.31-1	— polare
10.11-2	"    "	10.31-1	— cartesiana
11.22	"    "	1	grandezze fondamentali
11.4	— variabile unidirezionale	10.21-1	impedenza
11.11-2	costante (definizione aggettivo)	11.33	— controllata
10.11-2	Coulomb	10.01-2	induttanza
10.01-1	deca —	10.25-2	"
10.01-1	deci —	10.11-2	jone
10.74-3	deformazioni d'onda	10.01-1	kilo —
11.13-1	diagramma funzionamento generatore f.e.m.	10.01-2	lavoro
10.11-1	differenza di potenziale	10.21	legge di Ohm
10.12-1	dispositivi utilizzatori	10.01-2	lunghezza
10.01-2	distanza		

Sezione : 0 Propedeutica  
 Capitolo : 00 Presentazione  
 Paragrafo : 00.0 Esposizione generale  
 Argomento : 00.03 Indice analitico

10.01-2	massa	11.73-1	— — — in corrente alternata
10.01-1	mega —	11.73-2	— — — a tensione variabile polarizzata
10.01-1	micro —	11.72	— perfetta
10.01-1	milli —	11.72-1	— — in corrente continua
11.31-1	modulazione di corrente continua	11.72-2	— — in corrente alternata
11.4	modulazione di corrente continua	11.7	— statica
10.01-1	multipli	10.11-1	resistore
10.01-1	nano —	10.01-1	secondo
00.01	numerazione decimale dei fogli	10.31-2	sfasamento
10.54	onde a dente di sega	10.51-4	simmetria di quarto d'onda
10.56	— a doppia semisinode	10.01-1	— di semionda
10.55	— a semisinode	10.01-1	sistema internazionale (SI)
10.52	— quadra	10.01-1	— MKS
10.43-2	“ ”	10.59-2	sottomultipli
10.43-4	— soidale	10.01-2	spettri delle frequenze
10.53	— triangolare	10.01-1	superficie
10.43-4	“ ”	10.01-1	tempo
11.71-1	ordinata	10.43-2	— di commutazione
11.71-1	origine degli assi	10.43-1	— di discesa
10.31-1	oscillazioni	10.43-1	- di salita
10.5	— (analisi)	10.01-1	tensione
		11.00	“ ”
11.31-2	partitore di tensione	11.5	— alternata
10.01-2	periodo	11.2	— costante
10.41-1	“ ”	11.30	— variabile unidirezionale
10.01-1	pico —	10.51-3	teorema di Fourier
11.11-2	polarizzata (definizione aggettivo)	10.01-1	tera —
11.31-1	polarizzazione per composizione	11.11-2	unidirezionale (definizione aggettivo)
11.32	“ ” “ ”	10.11-2	unità di carica
11.31-1	— per modulazione	11.22-1	unità di misura di corrente
11.33	“ ” “ ”	11.22-1	— — — di quant. di elettricità
10.11-1	polo negativo	11.21-1	— — — di tensione
10.11-1	— positivo	10.01-1	— — — elettriche
10.01-2	potenza	10.01-1	— — — universali
11.62-2	— di corrente alternata polarizzata	10.11-2	unità di quantità di elettricità
11.52-2	— di tensione alternata polarizzata	10.12-1	utilizzatore
10.01-2	potenziale	10.59-1	valore efficace
	“ ”	11.61-2	unità di quantità di elettricità
10.11-1		10.12-1	utilizzatore
10.11-2	— della carica	10.58-1	valore efficace
11.31-2	potenziometro	11.61-2	— — di corrente alternata
0	Propedeutica	11.51-2	— — di tensione alternata
10.41-2	pulsazione	11.52-3	— — di tensione in serie
10.01-2	quantità di elettricità	11.62-1	— picco-picco di corrente
11.11-1	rapporti statici fra V e I	11.52-2	— — di tensione
11.11-1	— dinamici fra V e I	10.42-2	— medio
10.32-1	regola del parallelogramma	10.01-2	velocità
12.23-1	— della mano destra	10.31-2	vettore
10.01-2	resistenza	10.01-2	volume
10.21-1	“ ”		
11			
11.7	— differenziale		
11.73	— non lineare		

**Sezione** : 1 Grandezze fondamentali  
**Capitolo** : 10 Nozioni preliminari  
**Paragrafo** : 10.0 Indice dei paragrafi  
**Argomento** : 10.00 Indice

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
Codice Pagina  
10.00 1

# Capitolo 10

## NOZIONI PRELIMINARI

### Indice dei paragrafi e degli argomenti

#### par. 10.0 — Generalità

- arg. 10.00 — Indice delle pagine
- "    10.01 — Definizioni

#### par. 10.1 — Elettricità

- arg. 10.10 — Indice delle pagine
- "    10.11 — Cenni sulla struttura dell'elettricità
- "    10.12 — Il circuito
- "    10.13 — Collegamenti degli elementi del circuito

#### par. 10.2 — Parametri principali

- arg. 10.20 — Indice delle pagine
- "    10.21 — La legge di Ohm

#### par. 10.3 — Fenomeni alternati sinoidale

- arg. 10.30 — Indice delle pagine
- "    10.31 — Concetti fondamentali. Vettori
- "    10.32 — Operazioni sui vettori

#### par. 10.4 — Oscillazioni

- arg. 10.40 — Indice delle pagine
- "    10.41 — Rappresentazione fondamentale delle oscillazioni sinoidali
- "    10.42 — Oscillazioni non sinoidali
- "    10.43 — Forme d'onda

#### par. 10.5 — Analisi delle oscillazioni

- arg. 10.50 — Indice delle pagine
- "    10.51 — Teorema di Fourier
- "    10.52 — Onda quadra
- "    10.53 — Onda triangolare
- "    10.54 — Onda a denti di sega
- "    10.55 — Onda a semisioide
- "    10.56 — Onda a doppia semi-sinoide
- "    10.58 — Valori e fattori caratteristici
- "    10.59 — Esame comparativo delle forme d'onda

**Sezione** : 1 Grandezze fondamentali  
**Capitolo** : 10 Nozioni preliminari  
**Paragrafo** : 10.0 Generalità  
**Argomento** : 10.00 Indice del paragrafo

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
Codice Pagina  
10.00 3

## **Paragrafo 10.0**

### **GENERALITA'**

#### **Indice degli argomenti e delle pagine**

##### **arg. 10.01 — Definizioni**

- pag. 1 — Unità di misura universali
  - Unità di misura elettriche
  - Multipli e sottomultipli
- " 2 — Panoramica delle grandezze più importanti

### **UNITA' DI MISURA UNIVERSALI**

Tutte le unità di misura derivano da tre grandezze fondamentali di cui si sono creati dei campioni internazionalmente riconosciuti e depositati.

Il sistema metrico internazionale si chiama anche sistema MKS dalle iniziali delle tre grandezze fondamentali che sono:

il metro	<b>(m)</b>	per le lunghezze e le distanze
il chilogrammo massa	<b>(KgM)</b>	per la quantità di materia
il secondo	<b>(s)</b>	per il tempo

Le altre grandezze sono tutte derivate dalle interazioni che i vari fenomeni fisici esercitano sui corpi. Esse sono comunque riportabili in termini che si esprimono ancora con le tre grandezze fondamentali.

### **UNITA' DI MISURA ELETTRICHE**

Lo studioso potrà incontrare nei testi ancora l'ohm campione di resistenza elettrica come grandezza fondamentale insieme alle altre tre (sistema MKSΩ).

Attualmente il Sistema Internazionale (SI) ha preferito l'ampere come unità di misura della corrente elettrica (sistema MKSA).

Per questa trattazione abbiamo ritenuto più intuitivo per un principiante considerare come fondamentale la quantità di elettricità o carica elettrica.

### **MULTIPLI E SOTTOMULTIPLI**

Certe unità di misura possono risultare o troppo grandi o troppo piccole per esprimere in cifre il valore della grandezza a cui si riferiscono.

Si usano perciò delle particelle attributive che si applicano ai nomi delle unità o misura quali prefissi come da tabella che segue

	Nome di	Simbolo	Fattore di moltiplicazione Espon.	Decimale	Significato rispetto all'unità
multipli	tera	T	$10^{12}$	1.000.000.000.000	milioni di milioni o migliaia di miliardi
	giga	G	$10^9$	1.000.000.000	miliardi o migliaia di milioni
	mega	M	$10^6$	1.000.000	milioni
	Kilo	K	$10^3$	1.000	migliaia
	etto	h	$10^2$	100	centinaia
	deca	da	10	10	decine
sotтомultipli	deci	d	$10^{-1}$	0,1	decimi
	centi	c	$10^{-2}$	0,01	centesimi
	milli	m	$10^{-3}$	0,001	millesimi
	micro	μ	$10^{-6}$	0,000.001	milionesimi
	nano	n	$10^{-9}$	0,000.000.001	miliardesimi o millesimi di milionesimi
	pico	p	$10^{-12}$	0,000.000.000.001	milionesimi di milionesimi o millesimi di miliardesimi
	femto	f	$10^{-15}$	Si tratterebbe di cifre o parole senza senso dovendo indicare grandezze estremamente piccole, per cui non rimane che affidarsi alla sola espressione esponenziale.	
	atto	a	$10^{-18}$		

Spiegazione. Si dirà ad esempio:

3 nanosecondi invece di dire 3 miliardesimi di secondo e si scriverà 3 ns anziché 0,000.000.003 s  
 29 megawatt invece di dire 29 milioni di watt e si scriverà 29 MW anziché 29.000.000 w

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

**Codice** Pagina **Capitolo** : 10 Nozioni preliminari  
**10.01** **2** **Paragrafo** : 10.0 Generalità  
**Argomento** : 10.01 Definizioni

**PANORAMICA DELLE GRANDEZZE PIU' IMPORTANTI**

A titolo di riferimento diamo subito un elenco in ordine alfabetico di alcune grandezze che incontreremo nel corso della trattazione.

Si raccomanda ai principianti di non confondere i nomi e i simboli delle grandezze con i relativi delle unità di misura.

Grandezza Nome	Simb.	Definizione	Unità di misura Nome	Simb.	Equiv.
Accelerazione	a	Rapidità di variazione della velocità	metro al sec. x sec.	$m/s^2$	—
Capacità	C	Quantità di elettricità che bisogna mettere in un condensatore per fargli salire la tensione ai suoi capi di un determinato valore	farad	F	Q/V
Carica elettrica	Q	Fondamentale per noi (v. quant. di elettricità)	coulomb	C	—
Ciclo	c	L'insieme dei valori variabili di una grandezza che si ripetono costantemente	ciclo	c	—
Conduttanza	G	Rapporto fra corrente che si stabilisce attraverso un elemento e la tensione ad esso applicata	siemens	S	A/V
Corrente	I	Ritmo di passaggio di cariche elettriche attraverso un elemento del circuito	ampere	A	C/s
Distanza	d	Fondamentale (v. anche lunghezza)	metro	m	—
Energia	E	Attitudine di una massa per compiere lavoro	joule	J	N.m
Flusso elettrost.	Q	Quantità di elettricità che attraversa la sezione di un corpo o di spazio	coulomb	C	—
Flusso magnet.	$\phi$	Quantità di magnetismo che attraversa la sezione di un corpo o di spazio	weber	Wb	—
Forza	F	Entità meccanica che imprime una data accelerazione ad una massa libera	newton	N	$mKg/S^2$
Forza elettrom.	E	Tensione ai capi di un generatore quando non è attraversato da corrente	Volt	V	—
Forza magnetom.	M	Entità elettrica produttrice di magnetismo	amperspira	Asp	—
Frequenza	f	Numero di cicli che si compiono in un determinato tempo	hertz	Hz	c/s
Induttanza	L	Rapidità di variazione della corrente che si riscontra in funzione di una tensione applicata	henry	H	—
Lavoro	L	Entità sviluppata da una massa durante uno spostamento sotto l'azione di una forza	joule	J	Nm
Lunghezza	l	Fondamentale (v. anche distanza)	metro	m	—
Massa	M	Fondamentale come quantità di materia	kilogrammo m	KgM	—
Periodo	T	Durata di un ciclo	secondo	s	s/c
Potenza	P	Energia sviluppata in un dato tempo	watt.	w	J/s
Potenziale	V	Livello di energia di un punto del circuito o di una carica ferma	volt	V	—
Quant. di elett.	Q	Fondamentale per noi (v. carica elettrica)	coulomb	C	—
Resistenza	R	Rapporto fra tensione che si stabilisce ai capi di un elemento e la corrente che l'attraversa	ohm	$\Omega$	V/A
Superficie	S	Estensione di un piano	metro quadr.	$m^2$	—
Tempo	t	Fondamentale	secondo	s	—
Tensione	V	Livello di energia posseduta da una carica	volt	V	—
Volume	v	Estensione di una massa	metro cubo	$m^3$	—
Velocità	v	Distanza percorsa in un determinato tempo	metro al sec.	$m/s$	—

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
Capitolo : 10 Nozioni fondamentali  
Paragrafo : 10.1 Elettricità  
Argomento : 10.10 Indice del paragrafo

APPUNTI  
DI ELETTRONICA  
Codice Pagina  
10.10 1

## Paragrafo 10.1

# ELETTRICITÀ'

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 10.11 — **Cenni sulla struttura dell'elettricità**

- pag. 1 — Analogia di comportamento dell'energia elettrica con quella idraulica  
" 2 — Unità di carica e di quantità di elettricità  
Unità di carica ed elettrone  
Potenziale della carica  
Movimento delle cariche  
Gli elettroni sono micro-cariche di segno negativo  
Cariche positive  
Atomo  
Jone

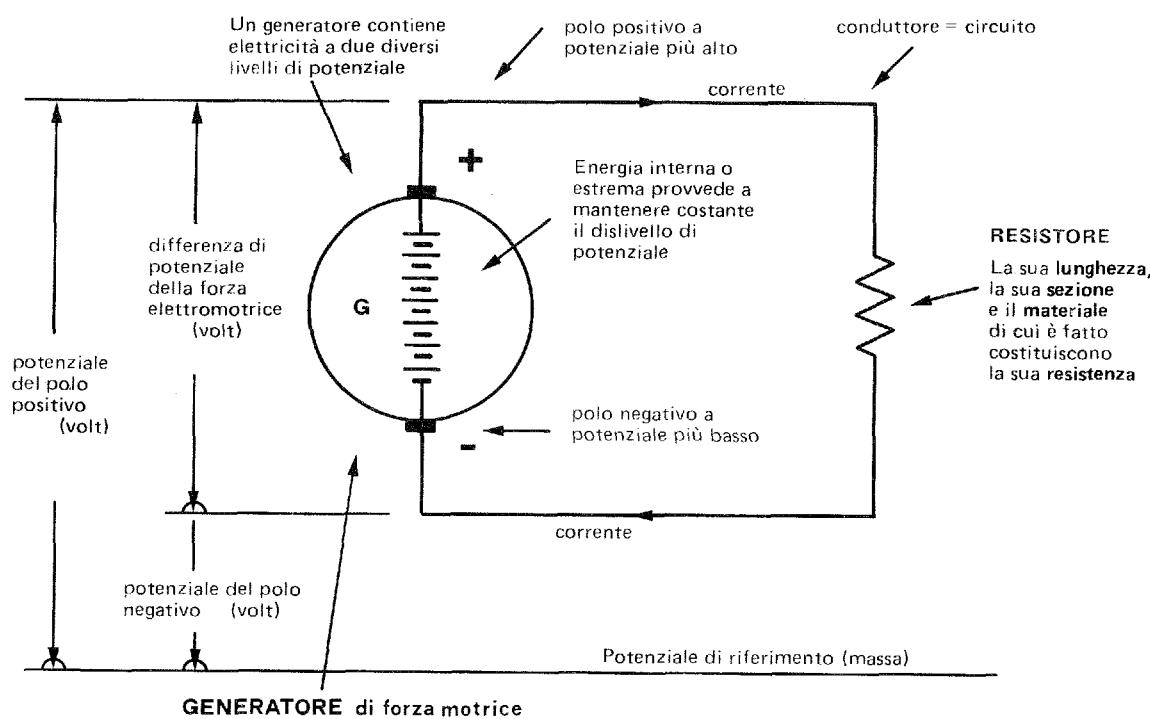
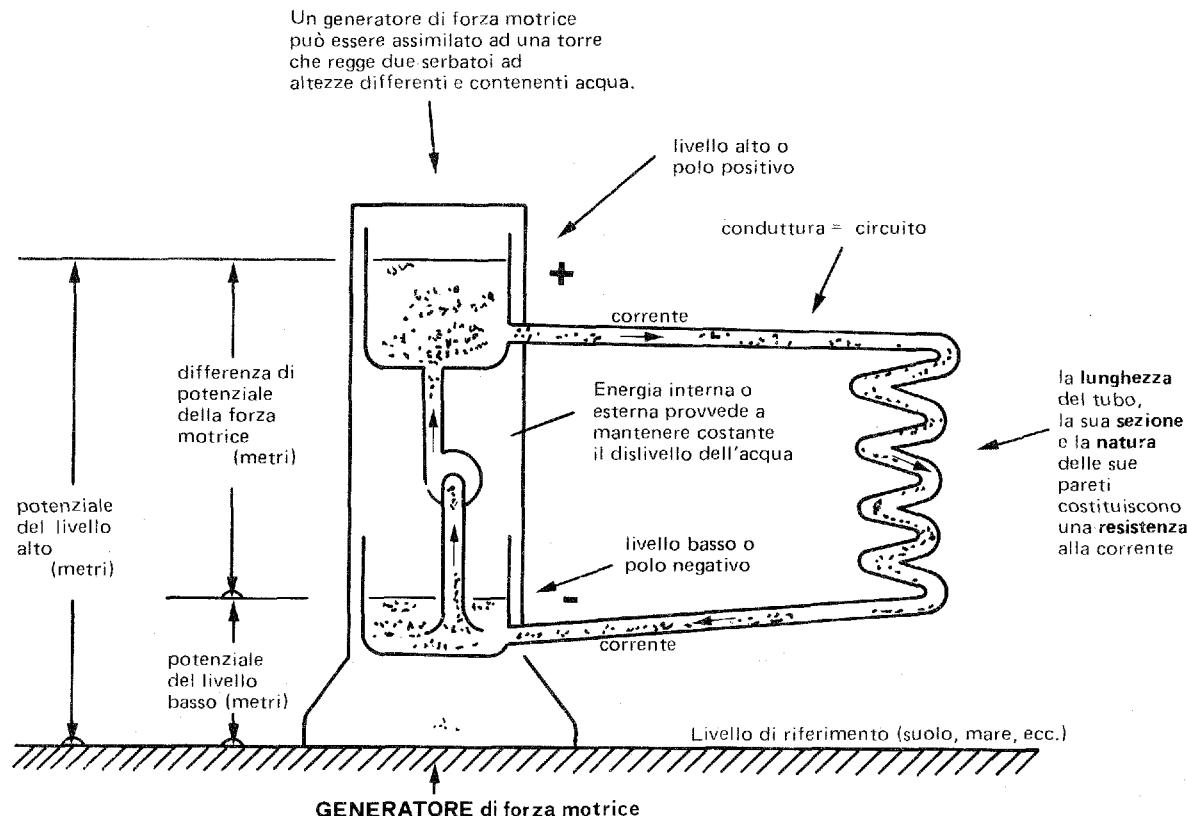
arg. 10.12 — **Il circuito**

- pag. 1 — Il circuito elettrico  
" 2 — Metodo grafico di rappresentazione dei circuiti

arg. 10.13 — **Collegamenti degli elementi del circuito**

- pag. 1 — Elementi del circuito  
Collegamento in serie  
" 2 — Collegamento in parallelo  
Collegamento misto

### ANALOGIA DI COMPORTAMENTO DELL'ENERGIA IDRICA CON QUELLA ELETTRICA



# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
10.11	2	Capitolo : 10 Nozioni fondamentali
		Paragrafo : 10.1 Elettricità
		Argomento : 10.11 Cenni sulla struttura dell'elettricità

## UNITA' DI CARICA O DI QUANTITA' DI ELETTRICITA'

Come il chilogrammo (kg.) è stato scelto come unità di massa e di quantità di materia (p. es. acqua), così il

### COULOMB (C)

è stato scelto come **unità di quantità di elettricità o di carica elettrica**. (v. anche 12.71)

## UNITA' DI CARICA ED ELETTRONE

Come la molecola è la parte più piccola di una data materia, così l'elettrone è la parte più piccola di elettricità.

in un **chilogrammo** di acqua si trovano  $3.25 \cdot 10^{25}$  molecole

In un coulomb di elettricità si trovano  $5.25 \cdot 10^{18}$  elettroni

## POTENZIALE DELLA CARICA

Come l'acqua può venire innalzata per farle acquistare del potenziale (in metri di altezza) anche l'elettricità può venire innalzata di potenziale (in volt di tensione).

In altre parole: in **volt** si misura il livello della carica elettrica,  
così come in **metri** si misura il livello della quantità di acqua

## MOVIMENTO DELLE CARICHE

Come l'acqua scorre dall'altezza maggiore a quella minore e la sua portata si misura

in chilogrammi al secondo (o litri al secondo)

anche l'elettricità scorre dal potenziale maggiore a quello minore e la sua corrente si misura

in coulomb al secondo

Vedremo altrove che questa unità di misura prende il nome di ampere (A).

A differenza dell'acqua che può essere tolta da una tubazione, gli elettroni sono sempre presenti in qualunque materiale e in particolare nei conduttori anche quando non c'è passaggio di corrente.

## GLI ELETTRONI SONO MICROCARICHE DI SEGNO NEGATIVO

A differenza delle molecole dell'acqua che si attirano fra di loro a causa dell'attrazione gravitazionale gli elettroni posseggono carica negativa, si respingono fra di loro e vengono soltanto attirati da cariche positive.

## CARICHE POSITIVE

Esse si chiamano protoni ed insieme ad elettroni e neutroni costituiscono l'atomo.

## ATOMO

Un atomo è la più piccola particella che costituisce un elemento della materia.

Esso è neutro quando ad un certo numero di suoi protoni corrisponde un ugual numero di elettroni.

## IONE

Un atomo con una quantità di elettroni superiore od inferiore al numero dei suoi protoni si chiama ione, e può essere:

**ione positivo** quando è in difetto di elettroni

**ione negativo** quando ha elettroni in eccesso.

### IL CIRCUITO ELETTRICO

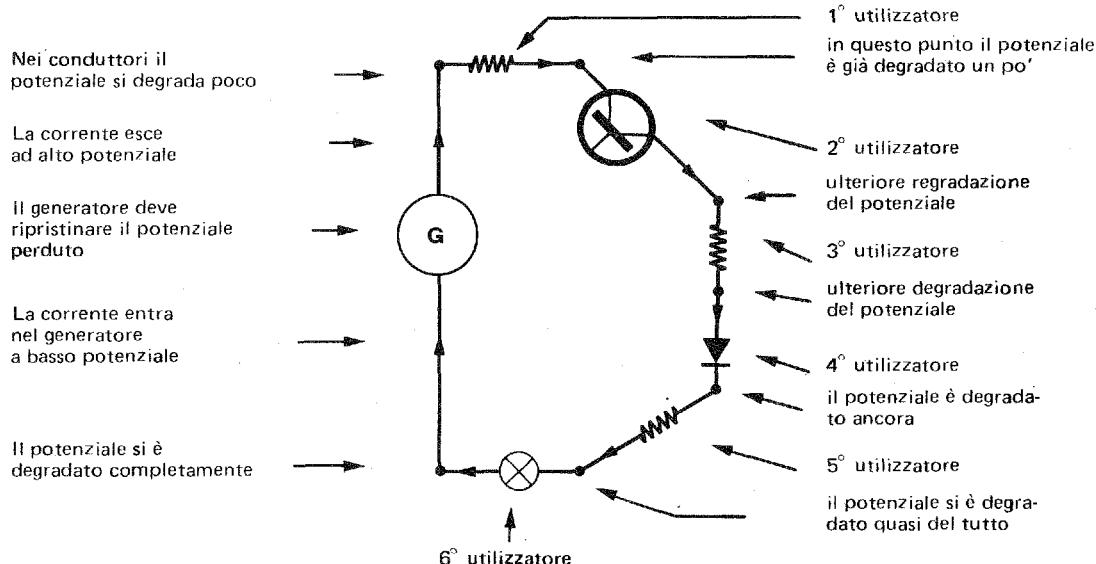
Per circuito elettrico si intende l'insieme di dispositivi elettrici chiamati **elementi del circuito** collegati fra loro in vario modo per assolvere una determinata funzione.

Si dice che la corrente elettrica percorre un circuito quando:

- esce da un terminale di un generatore fornita di alto potenziale
- attraversa i vari dispositivi utilizzatori (resistori, transistori, motori, altoparlanti ecc.)
- entra col potenziale degradato nell'altro terminale del generatore
- esce di nuovo dal primo terminale col potenziale ripristino a spese dell'energia interna del generatore.

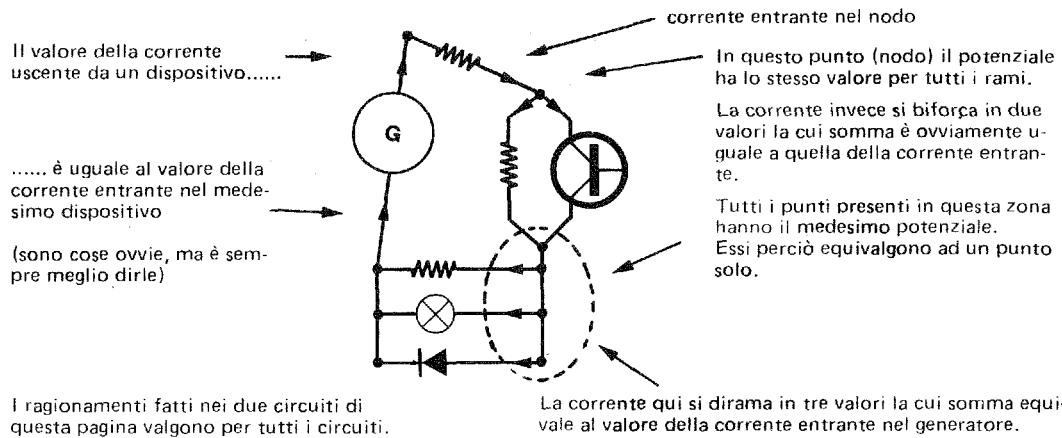
### ESEMPIO DI CIRCUITO

Constatiamo con una semplice figura quanto abbiamo appena detto.



### ALTRO ESEMPIO DI CIRCUITO

In questo esempio gli utilizzatori sono collegati in vario modo



### METODO GRAFICO DI RAPPRESENTAZIONE DEI CIRCUITI

Noi cercheremo sempre di rappresentare i circuiti nel modo che segue:

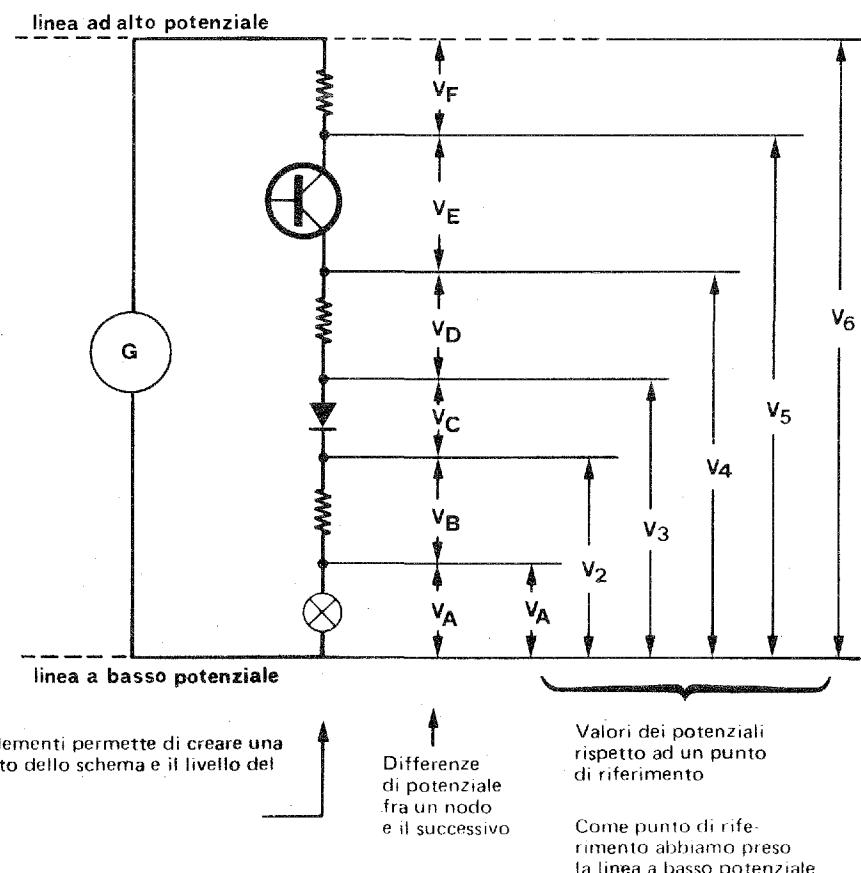
Prendiamo ad esempio i circuiti precedenti

#### Primo circuito

Le linee orizzontali non saranno interrotte da elementi del circuito poiché rappresenteranno situazioni ad ugual potenziale.

Il generatore spesso sarà omesso in quanto si riterrà sottinteso. La sola presenza delle due linee orizzontali estreme giustificheranno quella del generatore.

Notare come la tensione  $V_6$  ai capi del generatore risulti uguale alla somma delle tensioni ai capi degli utilizzatori.



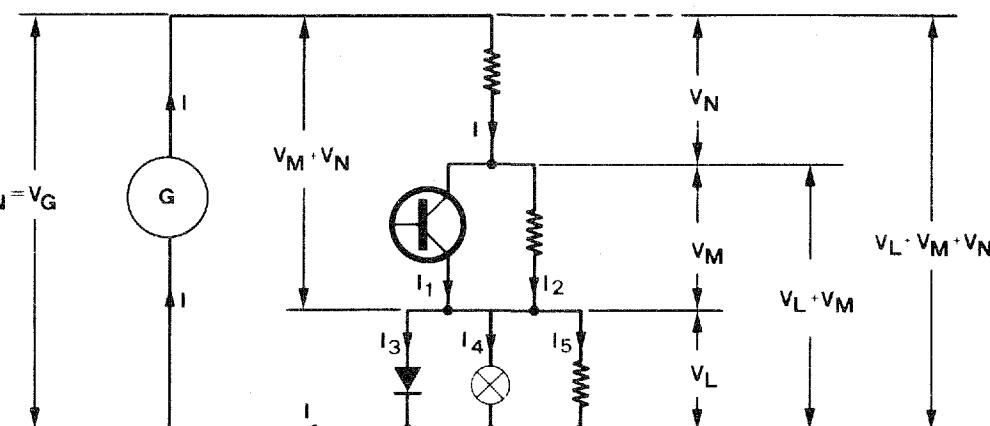
#### Secondo circuito

Dallo schema così disegnato risulta evidente che

$$V_L + V_M + V_N = V_G$$

Il bilancio delle correnti ci dà che

$$I = I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

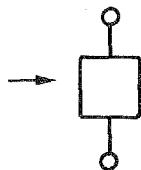


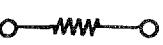
### ELEMENTI DEL CIRCUITO

Iniziando ad accostarci nel mondo dell'elettronica, limitiamoci per ora a considerare i più comuni. Man mano che approfondiremo la materia impareremo a conoscerli tutti.

Quelli che considereremo qui posseggono sempre due terminali (uno per l'entrata della corrente e l'altro per l'uscita o viceversa) ai capi dei quali si misura una tensione.

Qui li vogliamo suddividere nelle seguenti tre grandi categorie.

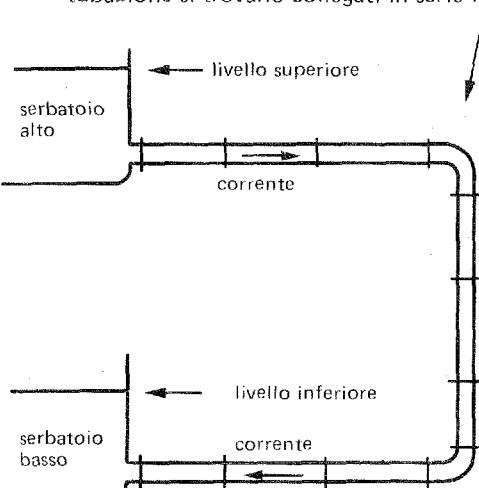


Elementi attivi	Elementi reattivi	Elementi passivi
<b>simbolo grafico</b>  <b>Definizione</b> Elementi che erogano energia elettrica (prelevandola sotto altra forma)	<b>simbolo grafico</b>  <b>Definizione</b> Elementi che sono in grado di accumulare e rendere energia elettrica sotto forma cinetica (corrente) o potenziale (tensione)	<b>simbolo grafico</b>  <b>Definizione</b> Elementi che sfruttano l'energia elettrica in vari modi.
<b>Esempi</b>  Dinamo Alternatori Accumulatori Microfoni ecc.	<b>Esempi</b>  Induttori Condensatori	<b>Esempi</b>  Lampadine Riscaldatori Altoparlanti Motori ecc.

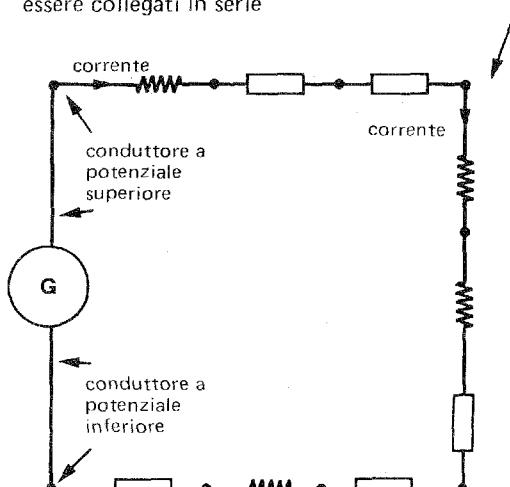
### COLLEGAMENTO IN SERIE DEGLI ELEMENTI DEL CIRCUITO

#### Analogia

Come i tronchi di tubo di cui è costituita una tubazione si trovano collegati in serie fra loro ...



...così gli elementi di un circuito elettrico possono essere collegati in serie



Il collegamento in serie è caratterizzato dal fatto che:

tutti gli elementi collegati sono attraversati dalla medesima corrente mentre ai capi di ciascuno di essi si stabilisce una tensione che dipende dalle caratteristiche dell'elemento stesso

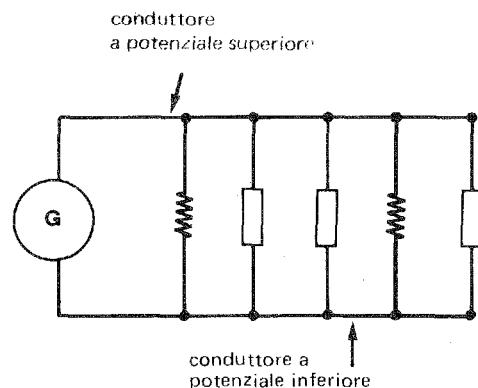
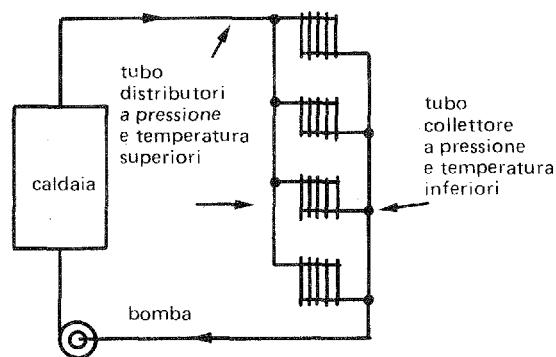
La somma delle singole tensioni sarà comunque uguale alla tensione presente ai capi del generatore.

### COLLEGAMENTO IN PARALLELO DEGLI ELEMENTI DEL CIRCUITO

#### Analogia

Come i radiatori di cui è costituito un impianto di riscaldamento sono collegati in parallelo ....

.... così gli elementi di un circuito elettrico possano essere collegati in parallelo



Il collegamento in parallelo è caratterizzato dal fatto che:

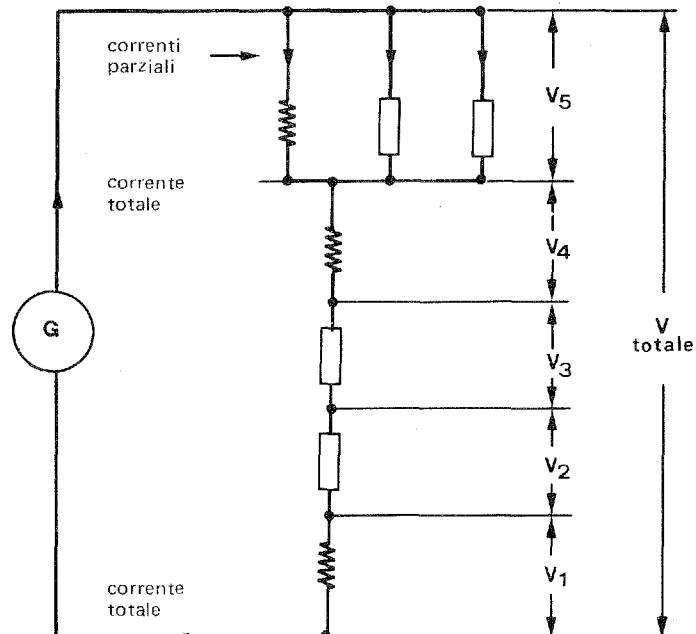
ai capi di tutti gli elementi collegati sussiste la medesima tensione mentre attraverso di ciascuno di essi si stabilisce una corrente che dipende dalle caratteristiche dell'elemento stesso.

La somma delle singole correnti sarà comunque uguale alla corrente erogata dal generatore.

### COLLEGAMENTO MISTO DEGLI ELEMENTI DEL CIRCUITO

Può succedere che:

- ad un gruppo di elementi in parallelo si colleghi in serie un gruppo di elementi in serie (v. figura)
- ad un gruppo di elementi in parallelo si colleghi in serie un altro gruppo di elementi in parallelo.
- ad un gruppo di elementi in serie si colleghi in parallelo un altro gruppo di elementi in serie.
- ecc.



**Sezione** : 1 Grandezze fondamentali  
**Capitolo** : 10 Nozioni preliminari  
**Paragrafo** : 10.2 Parametri principali  
**Argomento** : 10.20 Indice del paragrafo

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
**Codice** Pagina  
**10.20** 1

## Paragrafo 10.2

# PARAMETRI PRINCIPALI

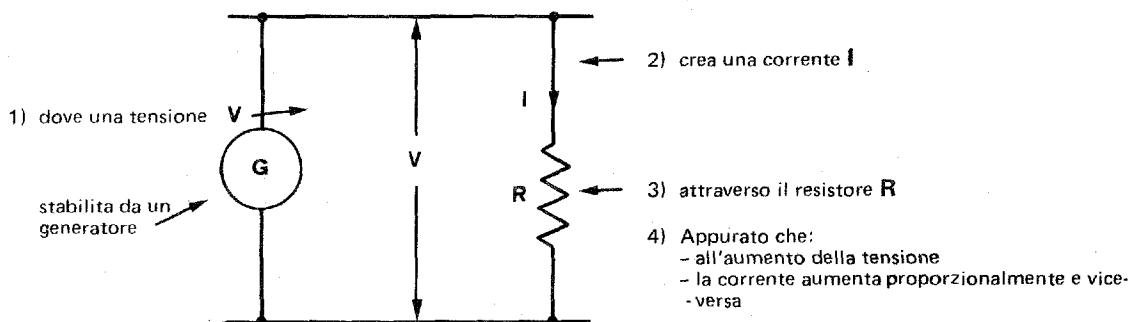
### Indice degli argomenti principali

arg. 10.21 — **La legge di Ohm**

- pag. 1 — Legge di Ohm per le resistenze  
Legge di Ohm per le conduttanze  
" 2 — Esempi di calcolo

### LEGGE DI OHM PER LE RESISTENZE

(A) Si abbia un circuito fatto così:



5) Si definisce la caratteristica del resistore e si chiama

N.B. In un elemento ideale questo rapporto è costante per qualsiasi tensione venga applicata

#### RESISTENZA o IMPEDENZA (\*)

il rapporto  $R = \frac{V}{I}$  cioè:

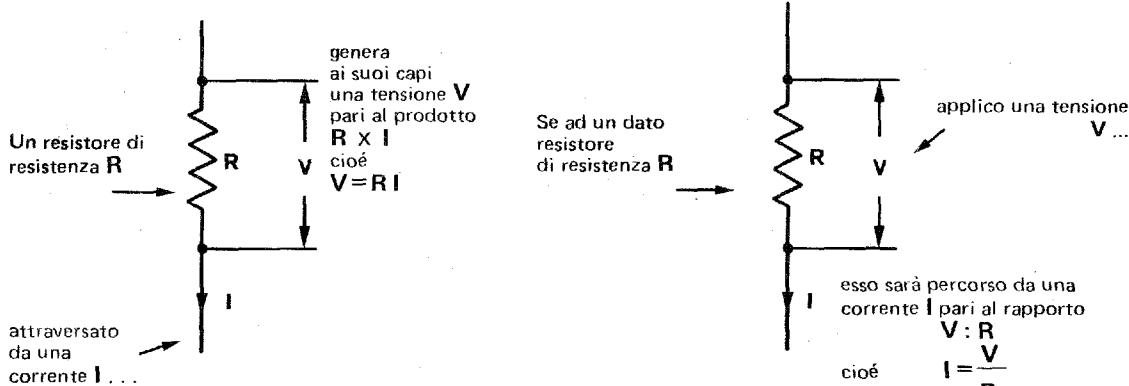
il valore di qualsiasi tensione applicata al resistore  
 diviso  
 il valore della corrispondente corrente

6) Questi dati si comprendono in una relazione che costituisce la

$$\text{legge di ohm} \quad V = I R$$

tensione applicata al resistore      resistenza del resistore  
 corrente che attraversa il resistore

(B) Altri aspetti del medesimo fenomeno:



**ATTENZIONE!** — Si usino sempre le stesse unità di misura, se si vuole calcolare correttamente le grandezze

- (\*) In questo caso i concetti di impedenza e resistenza si identificano.  
 Normalmente si usa solo il termine di "resistenza" quando si ha a che fare con correnti e tensioni costanti.  
 Il termine resistenza differisce da impedenza con correnti e tensioni variabili.  
 Altrove vedremo il perché.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
10.21	2	Capitolo : 10 Nozioni preliminari
		Paragrafo : 10.2 Parametri principali
		Argomento : 10.21 La legge di Ohm.

**ESEMPI DI CALCOLO SULLA LEGGE DI OHM PER LE RESISTENZE**

Riassumiamo qui, in attesa di parlarne più avanti in particolare, che

la tensione (V) si misura in volt (V)

la corrente (I) si misura in ampere (A)

la resistenza (R) si misura in ohm ( $\Omega$ )

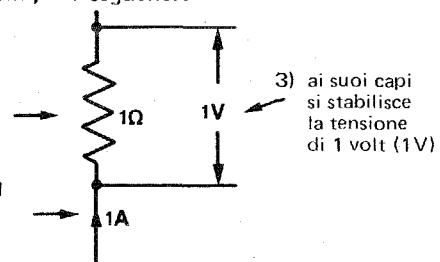
**A) La relazione unitaria, cioè riferita alle unità di misura, per la legge di ohm, è la seguente:**

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ ampere} \times 1 \text{ ohm}$$

cioè significa che:

1) quando un resistore R del valore di 1 ohm ( $1\Omega$ )

2) è attraversato dalla corrente I del valore di 1 ampere (1A)



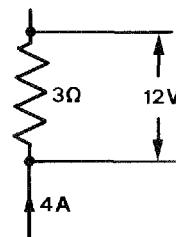
3) ai suoi capi si stabilisce la tensione di 1 volt (1V)

**B) Se lo stesso resistore di  $1\Omega$  è attraversato dalla corrente di 2A la tensione che si stabilirà ai suoi capi sarà di 2V perché:**

$$2 \text{ ampere} \times 1 \text{ ohm} = 2 \text{ volt}$$

**C) Se il resistore ha una resistenza di  $3\Omega$  ed è attraversato da una corrente di 4A, la tensione che si stabilirà ai suoi capi sarà di 12V perché:**

$$4 \text{ ampere} \times 3 \text{ ohm} = 12 \text{ volt}$$



**D) Si possono stabilire 12 volt con infinite combinazioni, ad esempio:**

$12\Omega$  con 1A

$4\Omega$  con 3A

$2\Omega$  con 6A

$1\Omega$  con 12A

$0,5\Omega$  con 24A

$0,1\Omega$  con 120A

$1000\Omega$  con 12 mA

$5000\Omega$  con 2,4 mA

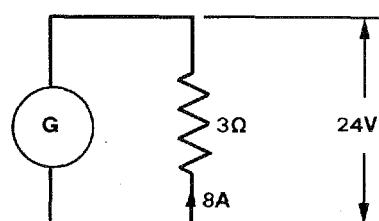
ecc.

**E) Inversamente, se abbiamo a disposizione 24V e vogliamo creare una corrente di 8A dobbiamo collegare col generatore un resistore che abbia la resistenza di  $3\Omega$  perché:**

$$\frac{24 \text{ volt}}{\text{diviso}} = 3 \text{ ohm}$$

8 ampere

Infatti  $8 \text{ ampere} \times 3 \text{ ohm} = 24 \text{ volt}$

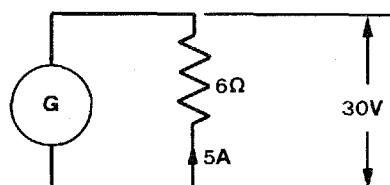


**F) Infine, se abbiamo a disposizione una tensione di 30V applicata ad una resistenza di 6 ohm, si produrrà una corrente di 5 ampere, perché:**

$$\frac{30 \text{ volt}}{\text{diviso}} = 5 \text{ ampere}$$

6 ohm

Infatti  $6 \text{ ohm} \times 5 \text{ ampere} = 30 \text{ volt}$

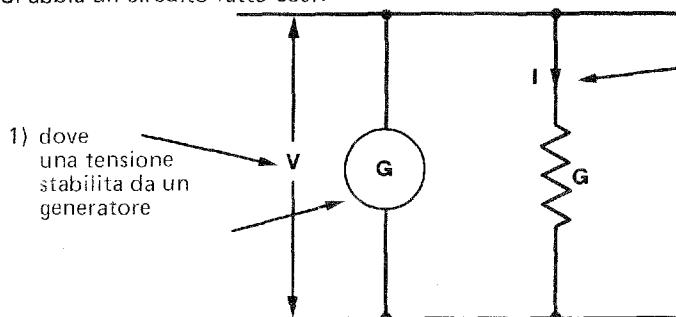


**G) Conclusione e attenzione: non sembri paradossale, ma in fondo tutta l'elettrotecnica e tutta la elettronica si fondano principalmente su questa semplice legge!**

### LEGGE DI OHM PER LE CONDUTTANZE

**Avvertenza** - Per mettere in evidenza le analogie si confronti questa pagina con la pagina 1

A) Si abbia un circuito fatto così:



5) Si definisce la caratteristica del conduttore e si chiama

**CONDUTTANZA O AMMETTENZA (\*)**

$$\text{il rapporto } G = \frac{I}{V} \text{ cioè}$$

il valore di qualsiasi corrente che attraversa il conduttore  
 diviso  
 il valore della corrispondente tensione applicata

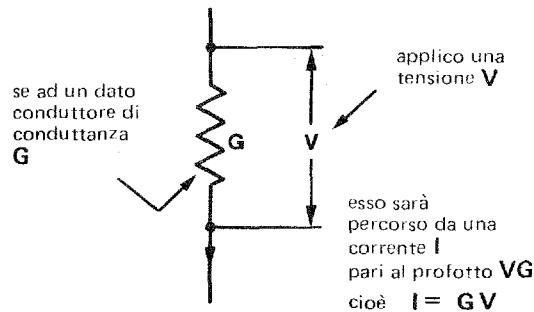
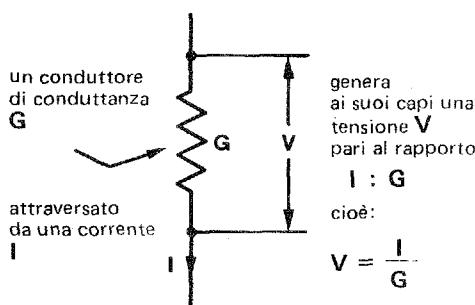
6) Questi dati si compendiano in una relazione che costituisce la

**Legge di Ohm per le conduttanze**

$$I = \frac{V}{G}$$

corrente che attraversa il conduttore      produttanza del conduttore  
 tensione applicata al conduttore

B) Altri aspetti del medesimo fenomeno



**Attenzione** - Si usino sempre le stesse unità di misura se si vuole calcolare correttamente le grandezze.

(\*) N.B. - In questo caso i concetti di ammettenza e conduttanza si identificano

Normalmente si usa solo il termine di conduttanza quando si ha a che fare con correnti continue e tensioni costanti.

Il termine conduttanza differisce da ammettenza quando si ha a che fare con correnti e tensioni variabili

Altrove vedremo i motivi

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
10.21	4	Capitolo : 10	Nozioni preliminari
		Paragrafo : 10.2	Parametri principali

Argomento : 10.21 La legge di Ohm

**ESEMPIO DI CALCOLO SULLA LEGGE DI OHM PER LE CONDUTTANZE**

Riassumiamo qui, in attesa di parlarne più avanti in particolare, che:

la tensione (V) si misura in volt. (V)

la corrente (I) si misura in ampere (A)

la conduttanza (G) si misura in siemens (S)

**Importante:** la conduttanza è l'inverso della resistenza e la resistenza è l'inverso della conduttanza.

Infatti: essendo  $G = \frac{I}{V}$  ed essendo (vedi pag. 1)  $R = \frac{V}{I}$

sostituendo un valore comune si ha

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{e anche} \quad R = \frac{1}{G}$$

**A)** La relazione unitaria cioè riferita alle unità di misura per la legge di Ohm è la seguente:

1 ampere = 1 volt X 1 siemens

ciò significa che: 1) quando un conduttore G del valore di 1 siemens (1S)

2) è attraversato da una corrente I del valore di 1 ampere (1A)

3) ai suoi capi si stabilisce la tensione di 1 volt (1V)

**B)** Se lo stesso conduttore di 1S è attraversato dalla corrente di 2A la tensione che si stabilirà ai suoi capi sarà di 2V perchè:

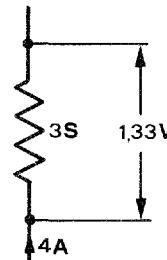
2 ampere : 1 siemens = 2V

**C)** Se il conduttore ha una conduttanza di 3S ed è attraversato da una corrente di 4A la tensione che si stabilirà ai suoi capi sarà di 1,33V perchè:

4 ampere : 3 siemens = 1,33V

**D)** Si possono stabilire 1,33V con infinite combinazioni ad esempio:

6S con 8A	1S con 1,33A	6 mS con 8mA
12S con 16A	0,5S con 0,66A	ecc.

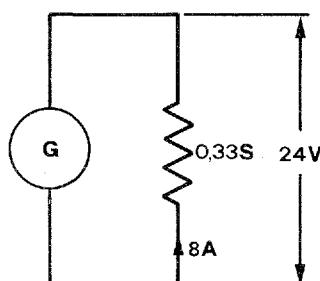


**E)** Inversamente se abbiamo a disposizione 24V e vogliamo creare una corrente di 8A dobbiamo collegare con il generatore un conduttore che abbia la conduttanza di 0,33S perché:

8 ampere  
diviso 24 volt = 0,33 siemens

Infatti:

0,33 siemens x 24 volt = 8 ampere



**IMPORTANTE**

Si può notare dal corrispondente esercizio del foglio 10.21-2 che si tratta non solo degli stessi valori di tensione e di corrente, ma anche dello stesso resistore che

in quel caso è espresso come:  
e in questo caso è espresso come:

resistenza di  $3\Omega$   
conduttanza di 0,33S

Infatti :

$$3\Omega = \frac{1}{3} \text{ S} = 0,33\text{S}$$

**Sezione** : 1 Grandezze fondamentali  
**Capitolo** : 10 Nozioni preliminari  
**Paragrafo** : 10.3 Fenomeni alternati sinoidali  
**Argomento** : 10.30 Indice dei paragrafi

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
Codice Pagina  
**10.30** 1

## Paragrafo 10.3

# FENOMENI ALTERNATI SINOIDALI

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 10.31 — **Concetti fondamentali - Vettori**

- pag. 1 — Rappresentazione geometrica di grandezze alternate sinoidali  
" 2 — Vettore ampiezza fase

arg. 10.32 — **Operazioni sui vettori**

- pag. 1 — Composizione vettoriale e cartesiana dei vettori  
" 2 — Un modo più comodo per comporre i vettori

### RAPPRESENTAZIONE GEOMETRICA DI GRANDEZZE ALTERNATE SINOIDALI

Fenomeni alternati sinusoidali sono principalmente quelli connessi alle:

- proiezioni di movimenti circolari
- oscillazioni libere di corpi elasticci (molle, corde, ecc.)
- oscillazioni di masse gravitazionali vincolate (pendoli)
- oscillazioni libere di scambio di energia elettrica cinetica e potenziale (circuiti oscillanti)

### RAPPRESENTAZIONE POLARE

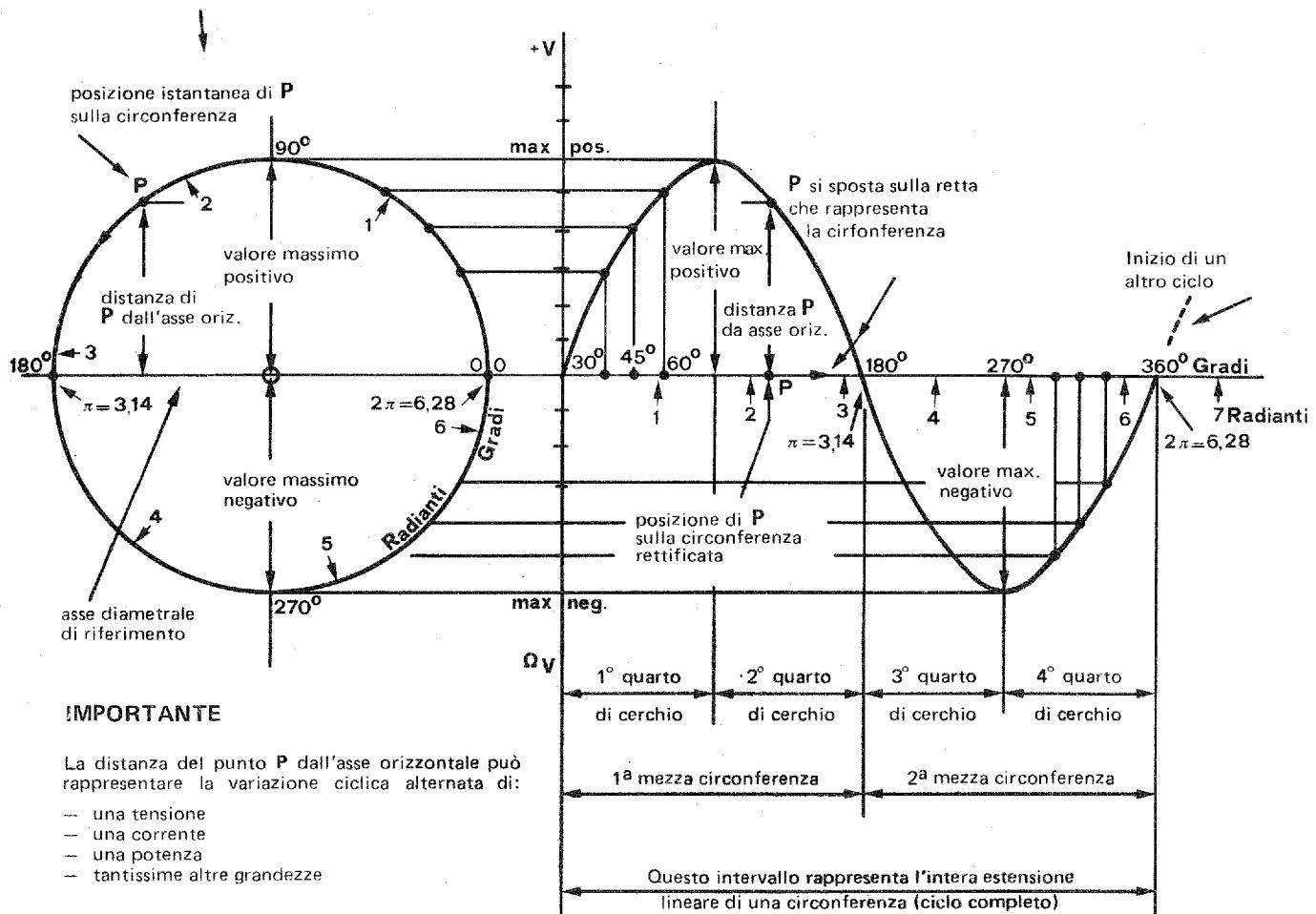
I valori assunti da grandezze relative ai fenomeni alternati sinusoidali possono essere rappresentati dalla sequenza di distanze che un punto viaggiante su una circonferenza assume rispetto ad un asse diametrale preso come riferimento.

### RAPPRESENTAZIONE CARTESIANA

Lo stesso fenomeno può essere rappresentato su assi cartesiani.

Come si vede, i due valori massimi (positivo e negativo) coincidono con il raggio della circonferenza generatrice e non possono essere superati.

P si sposta sulla circonferenza



### IMPORTANTE

La distanza del punto P dall'asse orizzontale può rappresentare la variazione ciclica alternata di:

- una tensione
- una corrente
- una potenza
- tantissime altre grandezze

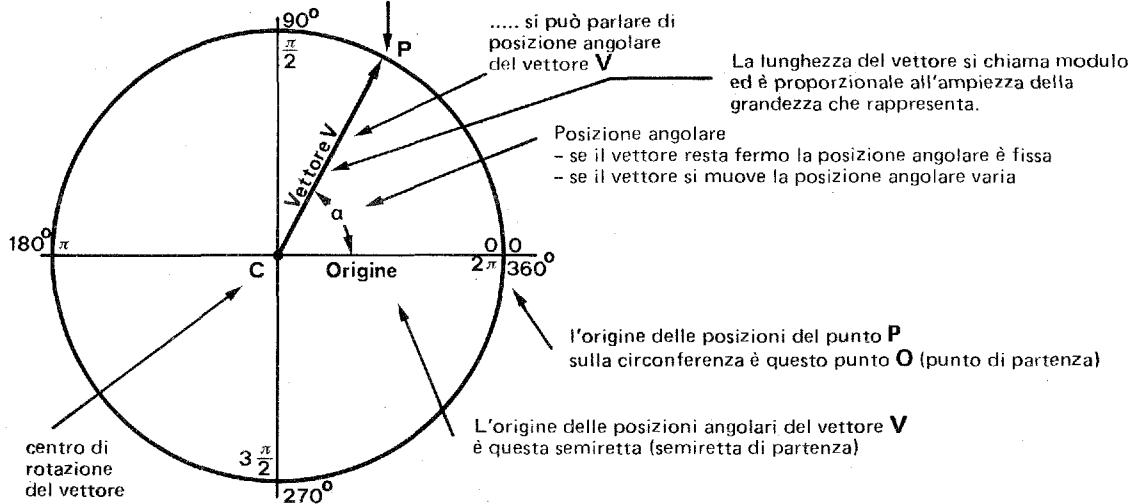
In questa rappresentazione grafica il fenomeno non dipende dal tempo, ma solo dalle posizioni riferite al ciclo.

Qui infatti non si parla né di periodo né di frequenza.

### VETTORE AMPIEZZA FASE

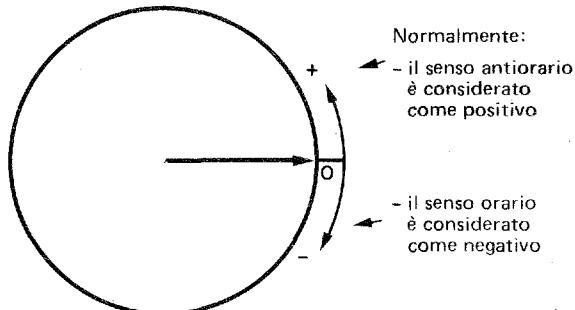
Il punto che ruota sulla circonferenza di cui la pag. 1 assume ulteriori significati.

Cioè, invece di parlare della posizione del punto **P** sulla circonferenza .....

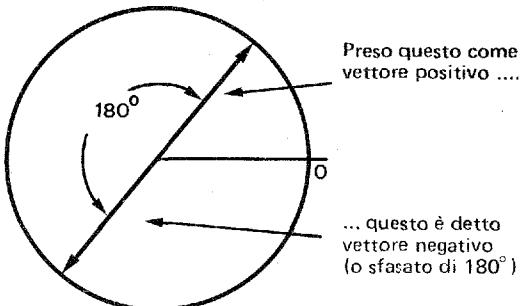


Il vettore è caratterizzato da un'ampiezza rappresentata dalla lunghezza del raggio le cui estremità sono contrassegnate:  
da una freccia per la parte rotante  
da un punto per la parte solidale al centro

### SENSI DI ROTAZIONE

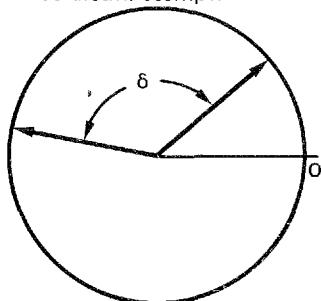


### DIREZIONI

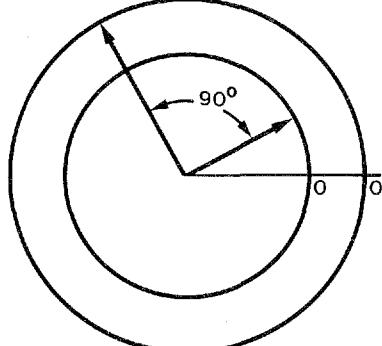


### VETTORI SFASATI

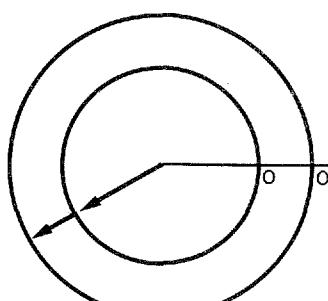
Più vettori possono ruotare mantenendosi equidistanti fra loro. Si dice in questo caso che essi ruotano sfasati. Ecco alcuni esempi:



Due vettori di uguale ampiezza sfasati dell'angolo  $\varphi$



Due vettori di differente ampiezza sfasati di  $90^\circ$  ( $\varphi = 90^\circ$ )

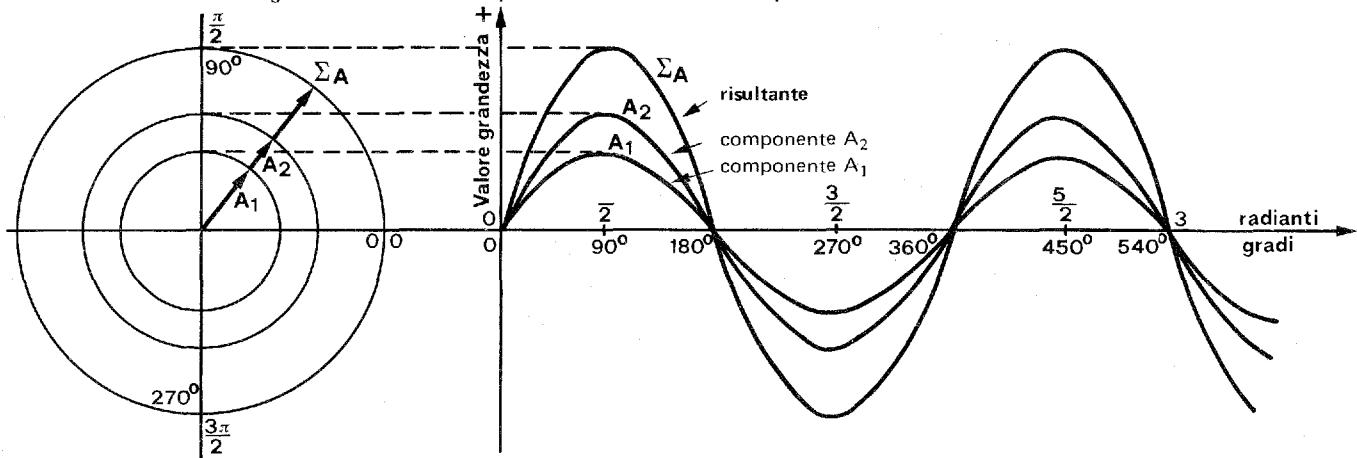


Due vettori di differente ampiezza ruotanti in fase (sfasamento uguale a zero) ( $\varphi = 0$ )

### COMPOSIZIONE VETTORIALE E CARTESIANA DI GRANDEZZE ALTERNATE

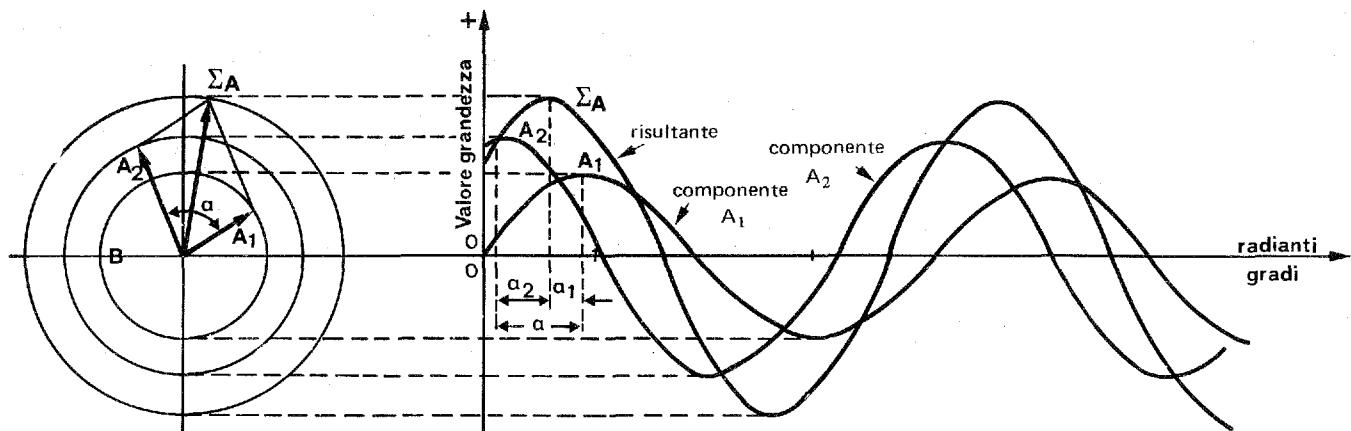
#### A) DUE GRANDEZZE RUOTANTI IN FASE

La risultante è una grandezza di modulo pari alla somma delle componenti ed è in fase con le stesse.



#### B) DUE GRANDEZZE RUOTANTI SFASATE SOLIDALMENTE IN UN ANGOLO α

La risultante è una grandezza che si compone vettorialmente come modulo e fase secondo la regola del parallelogrammo.



#### C) COMPOSIZIONE VETTORIALE DI DUE GRANDEZZE SFASATE (Regola del parallelogrammo)

- 8) ... si traccia la parallela
- 7) ... e da questo punto
- 6) ... a questo segmento
- 5) ... si traccia la parallela
- 4) Soluzione  
Da questo punto
- 3) ... da cui è sfasata di un angolo α
- 13) La risultante sarà sfasata rispetto alle componenti di questi due angoli rispettivi α<sub>1</sub> e α<sub>2</sub>
- 10) Dall'origine comune ai due vettori
- 12) ... e la sua origine sarà in comune con quella delle componenti
- 11) ... si traccia la diagonale del parallelogrammo  
La sua lunghezza corrisponde al modulo della grandezza risultante
- 2) ... una grandezza A<sub>2</sub>
- 1) Si abbia una grandezza A<sub>1</sub> e la si voglia sommare ad
- 9) ... a questo segmento e si compone un parallelogrammo

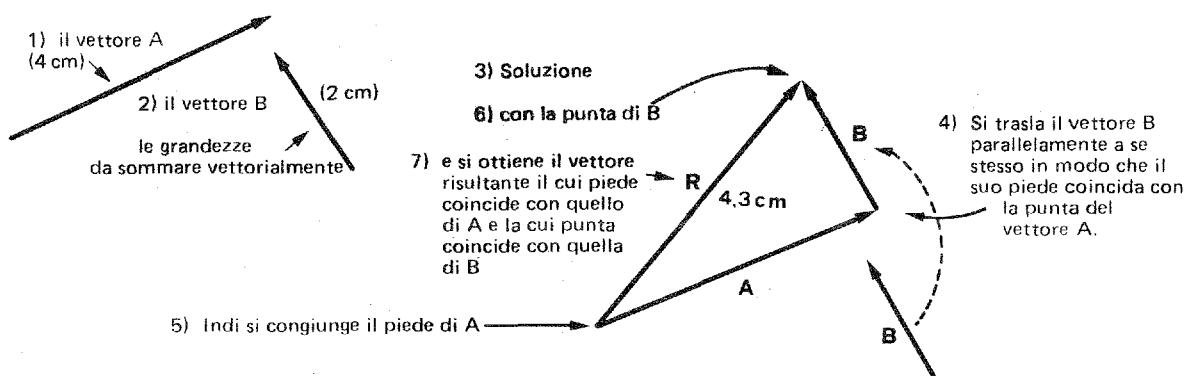
**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice      Pagina  
10.32      2

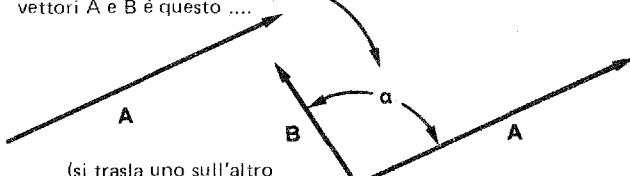
Sezione : 1      Grandezze fondamentali  
Capitolo : 10      Nozioni preliminari  
Paragrafo : 10.3      Fenomeni alternati sinusoidali  
Argomento : 10.32      Operazioni sui vettori

**UN MODO PIU' COMODO PER COMPORRE I VETTORI**

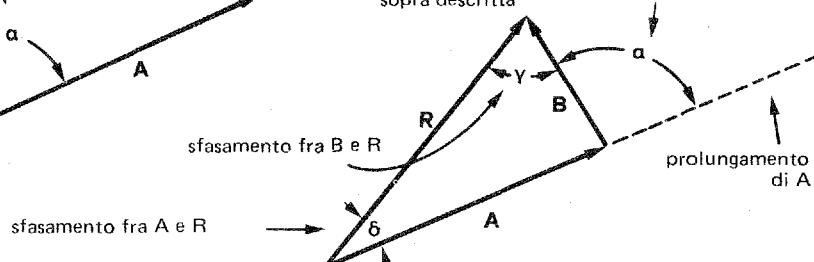
**A) DUE GRANDEZZE**



L'Angolo di sfasamento fra i due vettori A e B è questo ....

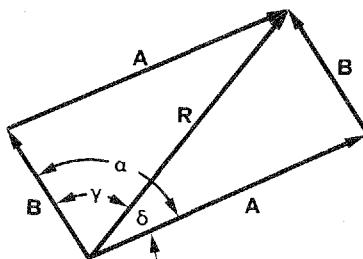


.... oppure questo (che è sempre lo stesso) nel caso di composizione come sopra descritta



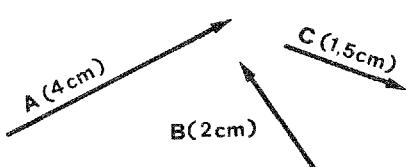
Rivediamoli tutti insieme  
... con i piedi uniti!

per dimostrare che questo nuovo modo di operare  
è altrettanto rigoroso quanto quello tradizionale  
del parallelogrammo.



**B) TRE GRANDEZZE**

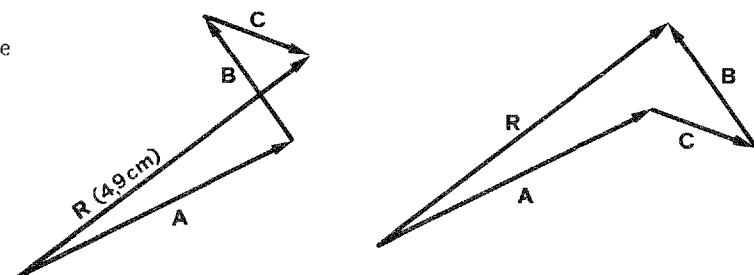
Allo stesso modo siano date tre grandezze A,B,C, da sommare vettorialmente



Si effettua la traslazione mantenendo  
ogni vettore parallelo a se stesso

La composizione avviene con la stessa tecnica  
La direzione della risultante è fra il piede del  
primo vettore e la punta dell'ultimo

Proprietà commutativa  
il risultato non cambia  
modificando la sequenza dei  
componenti



**C) N.B.:**

Con la composizione grafica effettuata accuratamente, usando una buona riga millimetrata e un buon goniometro, si possono effettuare calcoli grafici più rapidamente e con la stessa precisione che si ottiene effettuando calcoli complicati con un regolo calcolatore.

## Paragrafo 10.4

# OSCILLAZIONI

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 10.41 — Rappresentazione fondamentale delle oscillazioni sinoidali

- pag. 1 — Frequenza e periodo  
Relazioni fra frequenza e periodo  
Unità di misura
- " 2 — Pulsazioni  
Frequenza e pulsazione  
Periodo e pulsazione  
Arco (angolo) percorso dopo un determinato tempo

arg. 10.42 — Oscillazioni non sinoidali

- pag. 1 — Oscillazioni dovute a moto non uniforme sulla circonferenza
- " 2 — Grandezze aperiodiche — Valore medio

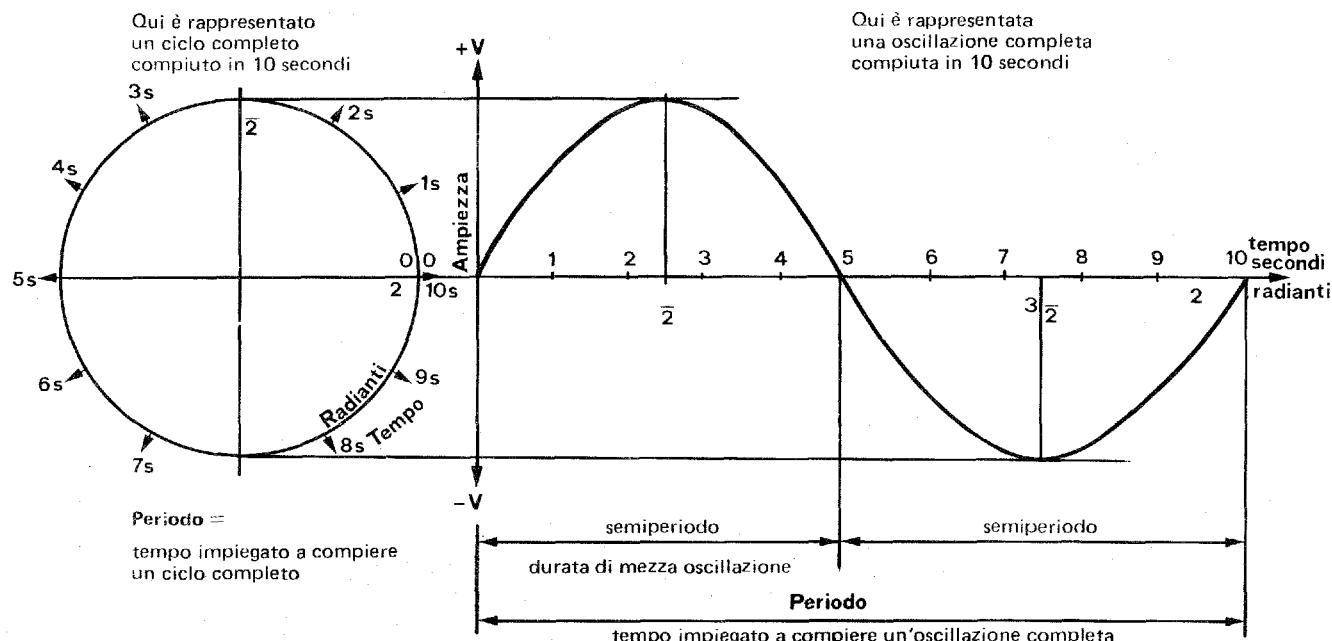
arg. 10.43 — Forme d'onda

- pag. 1 — Forma a gradino
- " 2 — Forma rettangolare
- " 3 — Forma ad impulso
- " 4 — Forma triangolare
- " 5 — Forma sinoidale (sinusoidale)
- " 6 — Composizione di grandezze non sinoidali aventi lo stesso periodo
- " 7 — Composizione di grandezze sinoidali di frequenza e ampiezze diverse
- " 8 — Composizione di grandezze non sinoidali qualsiasi

### FREQUENZA E PERIODO

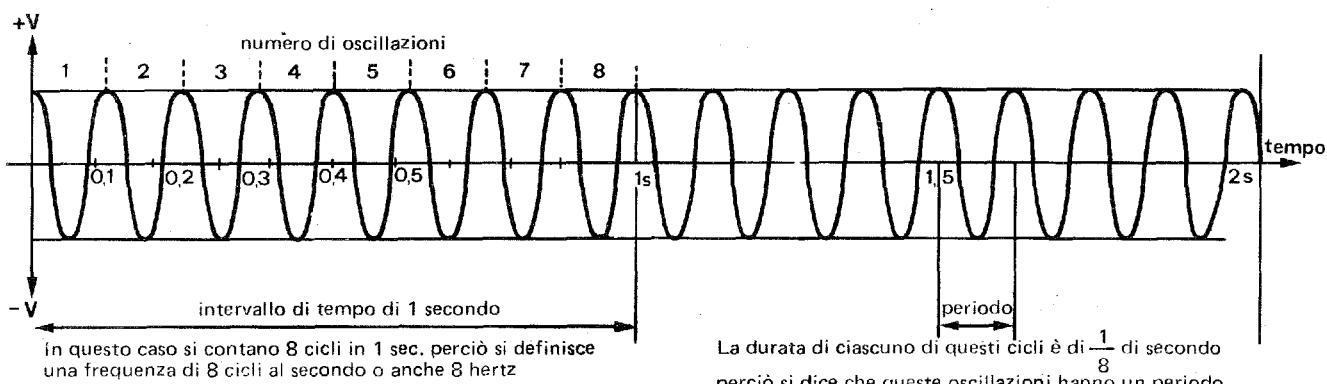
Quando la rotazione del punto P sulla circonferenza o la rotazione angolare del vettore V si compiono in un determinato tempo subentrano i concetti di periodo e frequenza.

(v: 10.31-1)  
(v: 10.31-2)



Quando cicli completi od oscillazioni complete si ripetono regolarmente nel tempo, si chiama **frequenza** il numero di cicli o di oscillazioni che si compiono in un sec.

Esempio



### RELAZIONI TRA FREQUENZA E PERIODO

$$\text{Frequenza } f = \frac{1}{T} \text{ cicli al secondo o hertz (Hz)}$$

$$\text{Periodo } T = \frac{1}{f} \text{ secondi}$$

### UNITA' DI MISURA

Per la **frequenza** (simbolo f) è: **hertz** (simbolo Hz) - frequenza in hertz = \_\_\_\_\_ diviso \_\_\_\_\_ il tempo (in secondi) impiegato a compierli

Per il **periodo** (simbolo T) è il minuto **secondo** (simbolo sec.): infatti si tratta del tempo impiegato a compiere un ciclo;

numero di cicli compiuti

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
10.41	2	Capitolo : 10 Nozioni preliminari
		Paragrafo : 10.4 Oscillazioni
		Argomento : 10.41 Rappresentazione fondamentale delle oscillazioni sinusoidali

### PULSAZIONE

In elettrotecnica spesso è importante tener conto non del numero dei cicli alternativi che si compiono in un secondo, ma del **numero di radianti** che si percorrono in un secondo.

Questa grandezza si chiama **pulsazione** (simbolo  $\omega$ ) e si misura in radianti al secondo (rad/sec.).

### FREQUENZA E PULSAZIONE

Poiché in un ciclo ci sono  $2\pi$  radianti (6,28 radianti) ed essendo la frequenza espressa in cicli/sec., la relazione che lega la frequenza alla pulsazione sarà la seguente:

$$\text{pulsazione (in rad/sec.)} \longrightarrow \omega = 2\pi f \quad \text{frequenza (in cicli/sec. o Hz)}$$

e viceversa  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  radianti in un ciclo (= 6,28)

### PERIODO E PULSAZIONE

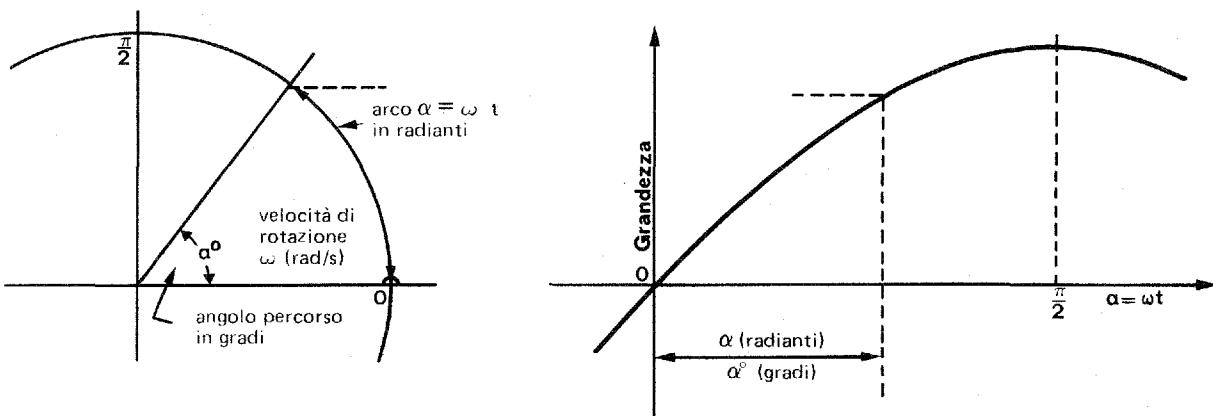
Poiché la frequenza  $f = \frac{1}{T}$  è l'inverso del periodo di tempo (in sec.) che occorre per compiere una oscillazione, la relazione che lega il periodo alla pulsazione sarà la seguente:

$$\text{pulsazione (in rad/sec.)} \longrightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{radianti in un ciclo (= 6.28)}$$

e viceversa  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  periodo (in sec.) di un ciclo

### ARCO (ANGOLO) PERCORSO DOPO UN DETERMINATO TEMPO

Quando si vuole tener conto della situazione istantanea dei valori che una determinata grandezza oscillante assume dopo un certo tempo  $t$ , basterà moltiplicare la pulsazione  $\omega$  (che è una velocità di rotazione in rad/s) per il tempo  $t$  intercorso dall'inizio del fenomeno e avremo calcolato l'arco  $\alpha$  (in radianti) percorso in questo intervallo di tempo.



### ARCO (IN RADIANTI) E ANGOLO (IN GRADI)

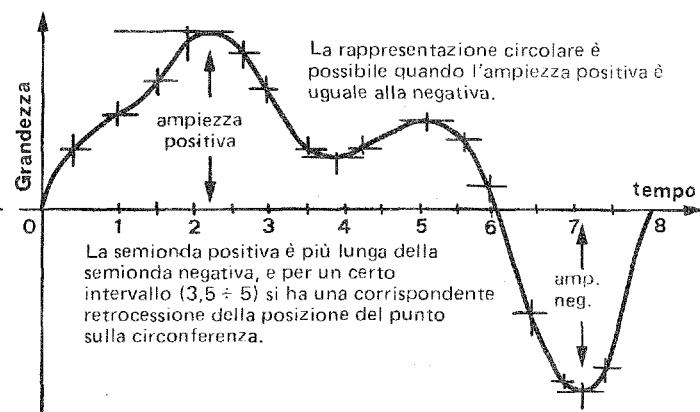
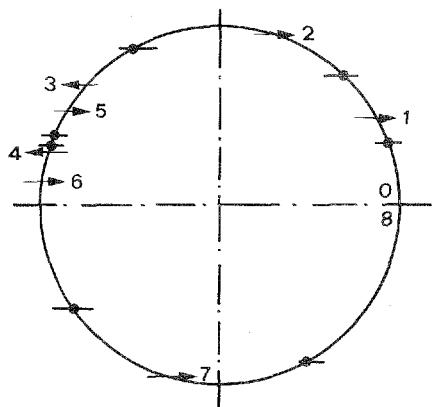
Data la proporzionalità fra queste due grandezze  $1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi}$

si ha  $\alpha^\circ = \alpha^{\text{rad}} \frac{360^\circ}{2\pi}$  e  $\alpha^{\text{rad}} = \alpha^\circ \frac{2\pi}{360^\circ}$

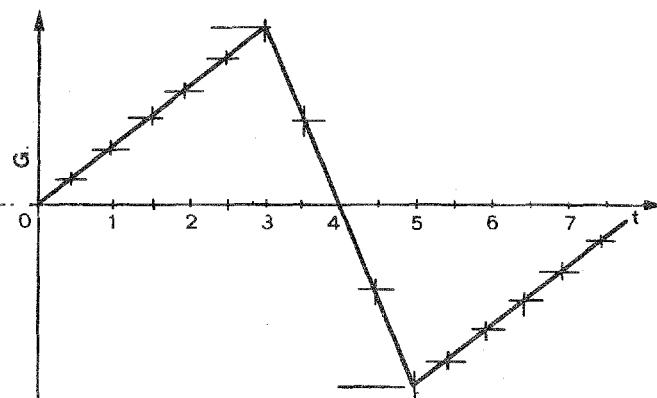
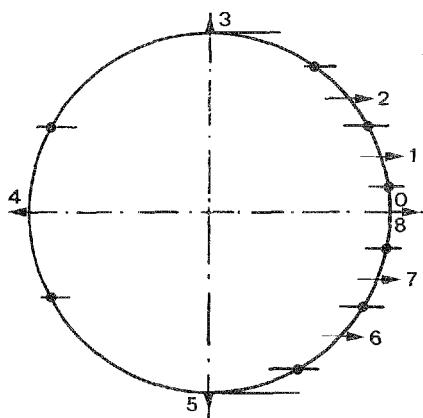
### OSCILLAZIONI DOVUTE A MOTO NON UNIFORME SULLA CIRCONFERENZA

A) Abbiamo visto al 10.40-1 il ciclo rappresentato dal movimento uniforme di un punto sulla circonferenza e la sua rappresentazione grafica.

Qui sotto vediamo invece la rappresentazione grafica di un punto che si muove con velocità irregolare sulla circonferenza sopra la quale sono stati segnati anche i tempi di passaggio.



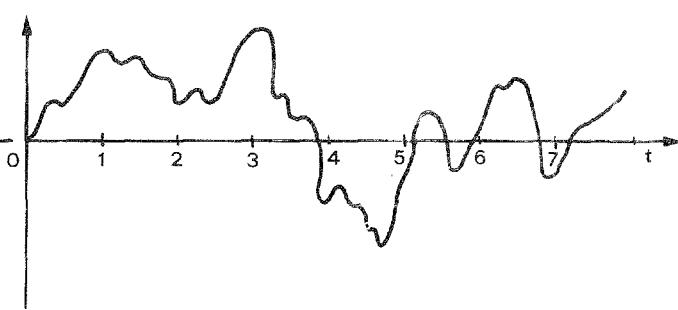
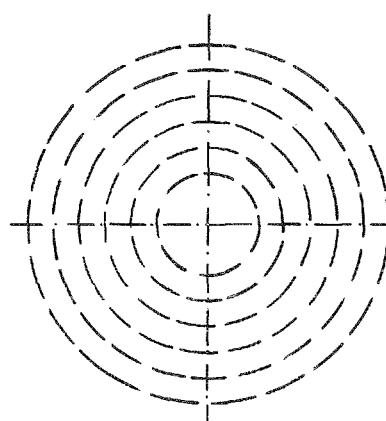
B) Un'altra forma grafica e relativa disposizione dei tempi di passaggio.



Ad incremento lineare della grandezza non corrisponde incremento lineare della posizione del punto sulla circonferenza.

C) Il caso più generale prevede che non solo la velocità, ma anche l'ampiezza vari col tempo.

La sua rappresentazione circolare o cartesiana è alquanto laboriosa e di nessuna utilità pratica.  
Vedremo altre tecniche di rappresentazione.



# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
10.42	2	Capitolo : 10 Nozioni preliminari
		Paragrafo : 10.4 Oscillazioni
		Argomento : 10.42 Oscillazioni non sinoidali

## GRANDEZZE APERIODICHE - VALORE MEDIO

Una grandezza alternata, rappresentata in diagramma cartesiano temporale, può:

- non avere forma geometrica o trigonometrica definita
- non ripetersi ciclicamente

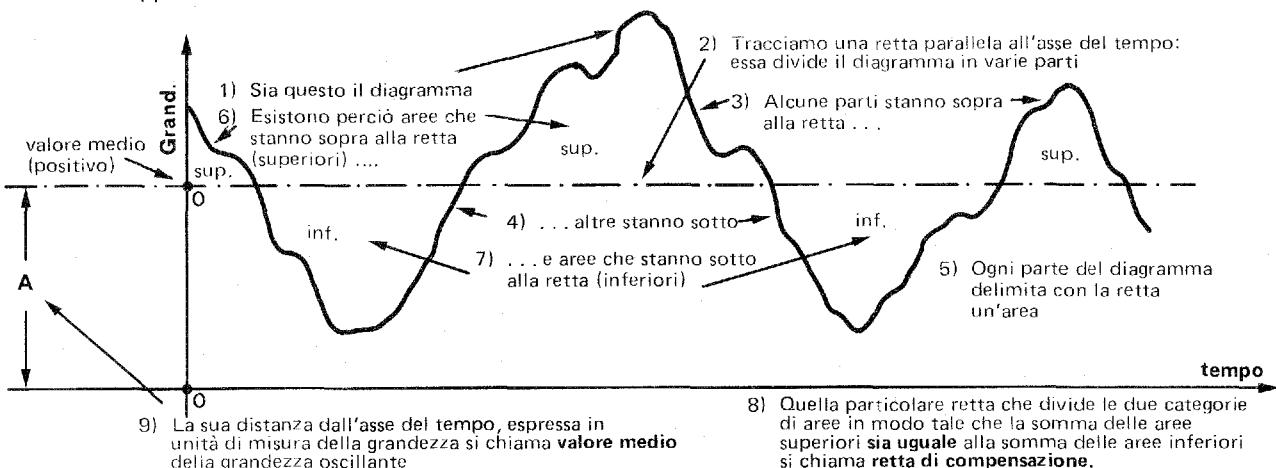
In questo caso si dice che la grandezza è **aperiodica**.

Essa può variare attorno ad un valore fisso che si chiama **valore medio**.

Esempio. La tensione prodotta da:

- un microfono sollecitato da suoni di un'orchestra o dalla voce, oppure da
- un rivelatore fonografico sollecitato dal movimento del solco di un disco ecc. ha un andamento capriccioso attorno ad un valore medio qualsiasi che dipende dalle caratteristiche del dispositivo e che può essere anche uguale a zero.

Avendo a disposizione un diagramma qualsiasi, si può sempre determinare graficamente il valore medio con sufficiente approssimazione. Infatti:



Ovviamente la precisione con la quale si determina il valore medio è tanto maggiore quanto maggior quantità di aree o di alternanze si prendono in considerazione.

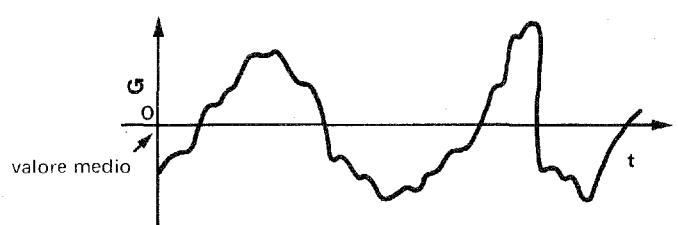
Ci sono semplici circuiti mediante i quali è possibile determinare e sfruttare il valore medio di una grandezza. Veda il lettore la sezione appropriata della trattazione.

Se il valore medio è uguale a zero la grandezza si dice semplicemente **alternata**.

Se il valore medio è diverso da zero la grandezza si dice **alternata unidirezionale oppure**

**alternata polarizzata**

positiva o negativa a seconda del segno del valore medio.

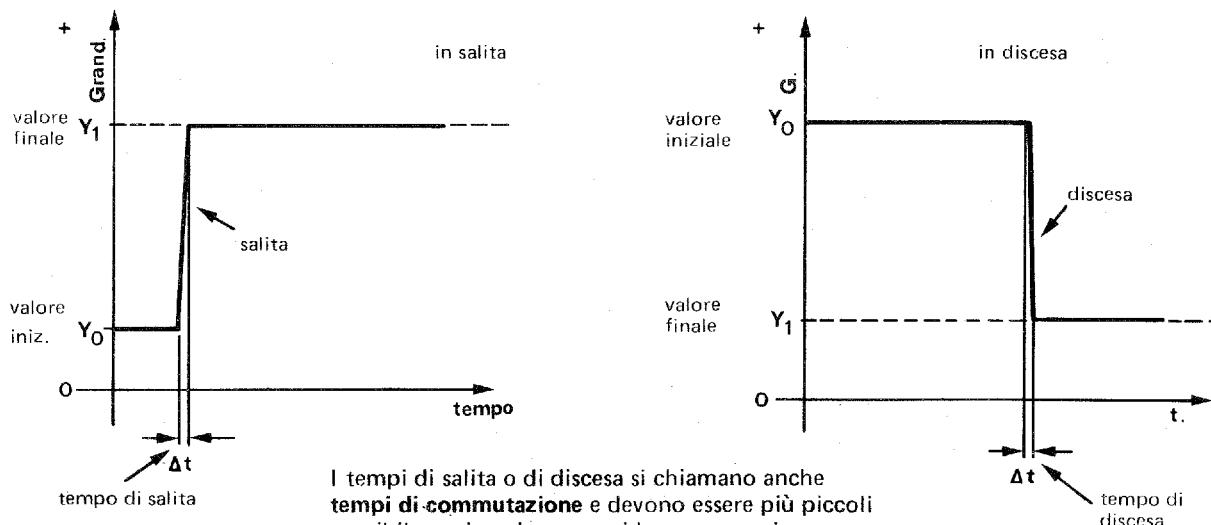


## FORMA D'ONDA A GRADINO

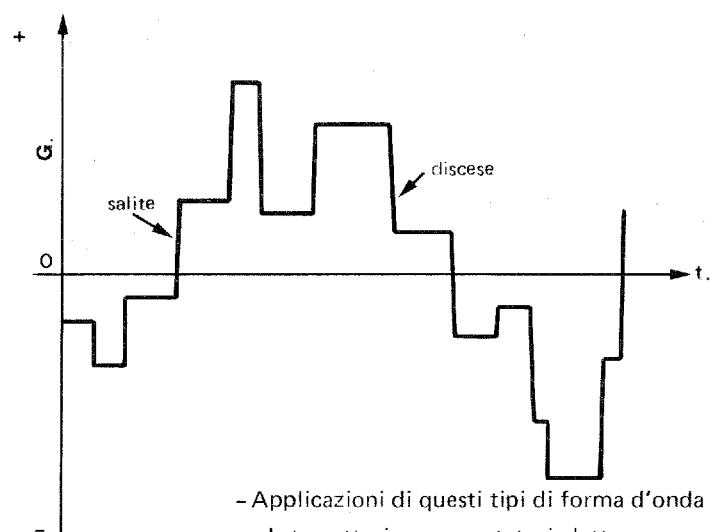
Si ha quando da un valore si passa istantaneamente (o quasi) ad un altro valore.

Si ricorda che anche gli elettroni hanno una inerzia (induttanza del circuito) per cui è impensabile una reale instantaneità del fenomeno.

**Esempio A** – Gradino singolo (per valori positivi)



**Esempio B** – A gradini successivi (e per valori positivi e negativi)



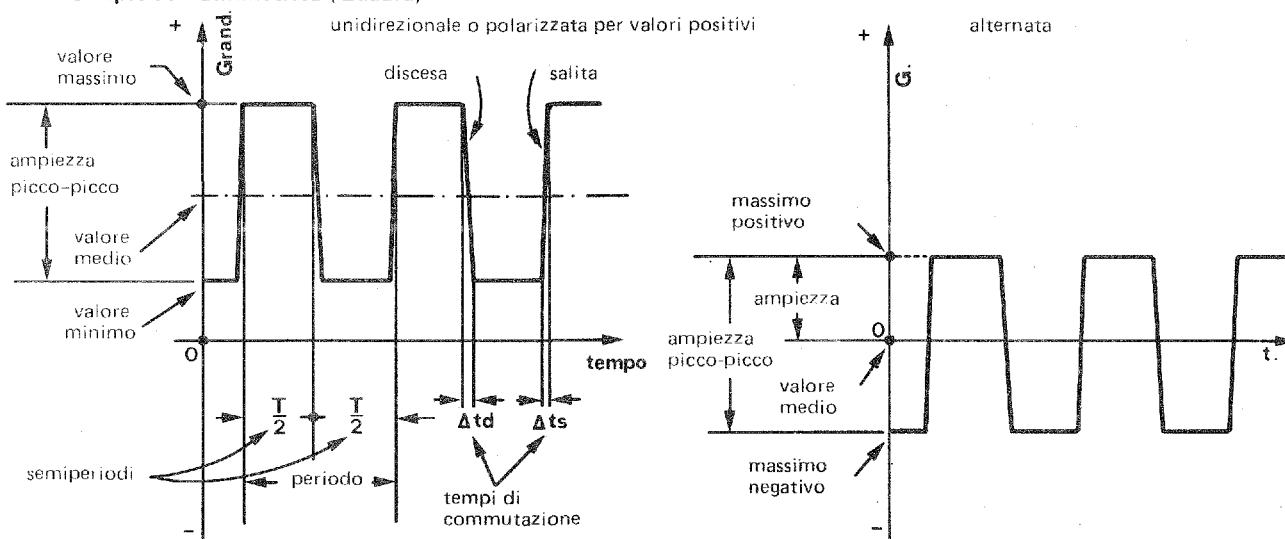
- Applicazioni di questi tipi di forma d'onda si trovano in:
- Interruttori e commutatori elettromeccanici
- Telecomunicazioni codificate
- Telecomandi
- Televisione
- Calcolatori digitali o logici

## FORMA D'ONDA RETTANGOLARE

E' l'estensione periodica della forma d'onda a gradino (vedi pag. 1) ed è caratterizzata dalla costanza della ampiezza e del valore medio.

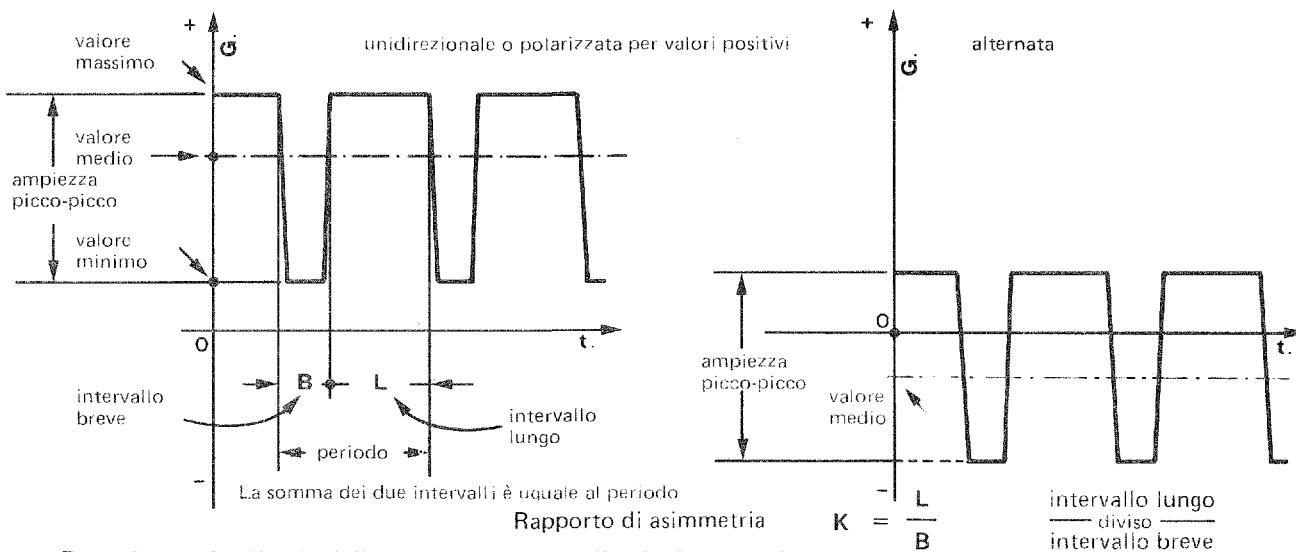
A causa dell'impossibilità di ottenere commutazioni istantanee (tempi di valore nullo), in realtà queste forme d'onda risultano trapezoidali.

## Esempio A - Simmetrica (Quadra)



Nelle tecniche di commutazione ad alta velocità i tempi di commutazione sono dell'ordine di nanosecondi (ns) cioè  $10^{-9}$  secondi (miliardesimi di secondo)

## Esempio B - Asimmetrica (attenzione alla retta "valore medio": essa non è sulla mezzaria del "picco-picco").



## Esempio C - Applicazioni di questi tipi di forma d'onda si trovano in:

- Calcolatori digitali o logici
- Analizzatori di risposta in frequenza degli amplificatori
- Multivibratori.

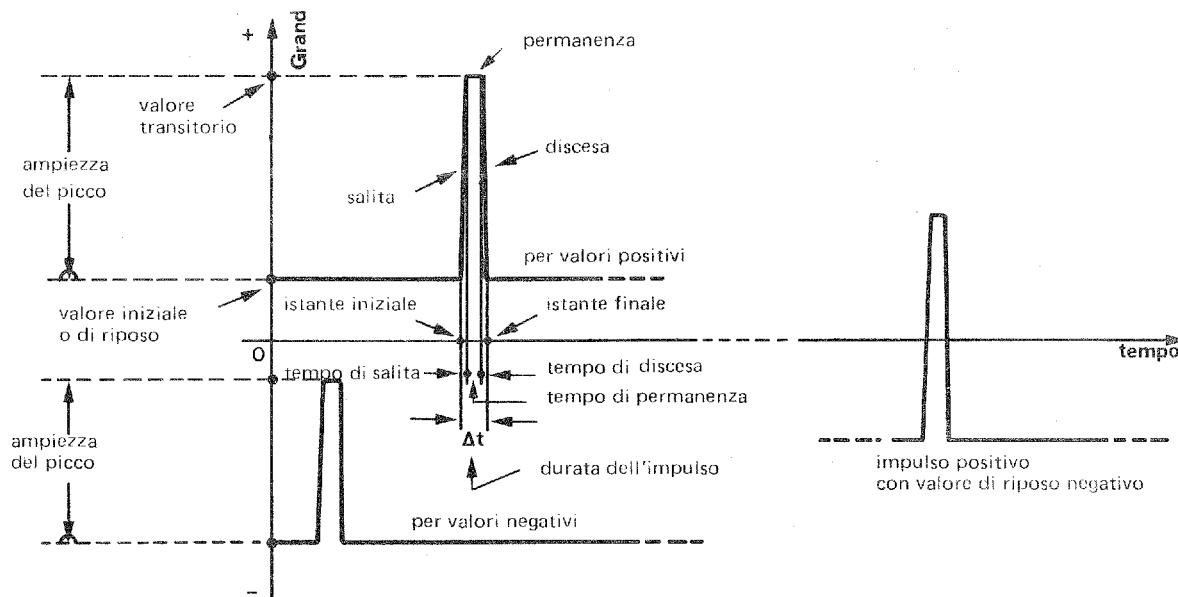
### FORMA D'ONDA A IMPULSO

È un caso particolare di forma d'onda rettangolare (vedi 10.43 pag. 2) aperiodico dove la grandezza (tensione, corrente, ecc.) cambia di valore e si riporta al valore iniziale (o di riposo) durante un intervallo di tempo brevissimo.

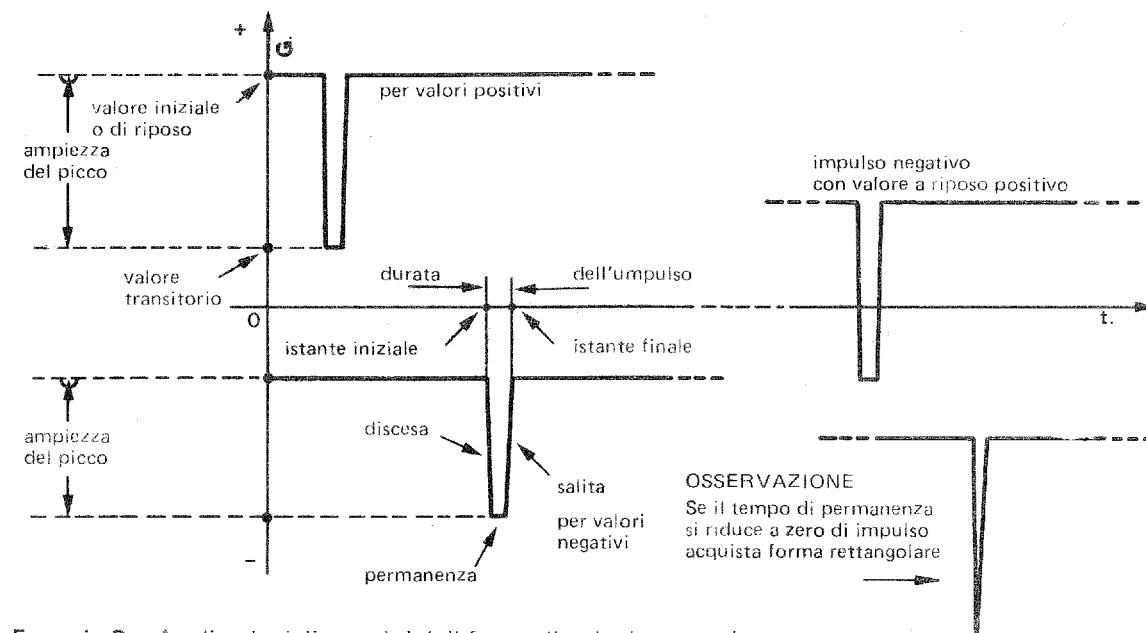
Si può parlare anche di impulsi periodici quando un'onda rettangolare è molto asimmetrica.

In questo caso comunque il valore medio è così prossimo al valore di riposo che praticamente ne coincide.

**Esempio A - Impulsi positivi:** cioè l'impulso è un addendo positivo ad un valore qualsiasi di riposo



**Esempio B - Impulsi negativi:** cioè l'impulso è un addendo negativo ad un valore qualsiasi di riposo.



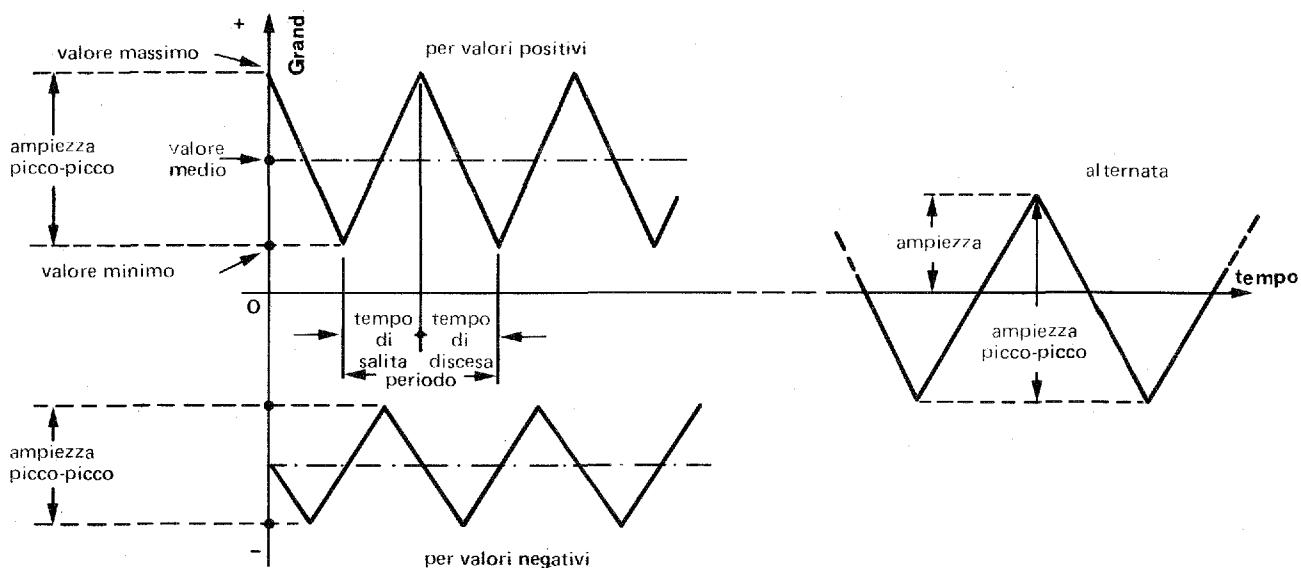
**Esempio C - Applicazioni di questi tipi di forma d'onda si trovano in**

- Comandi di dispositivi a scarica
- Radar
- Televisione
- Calcolatori digitali o logici

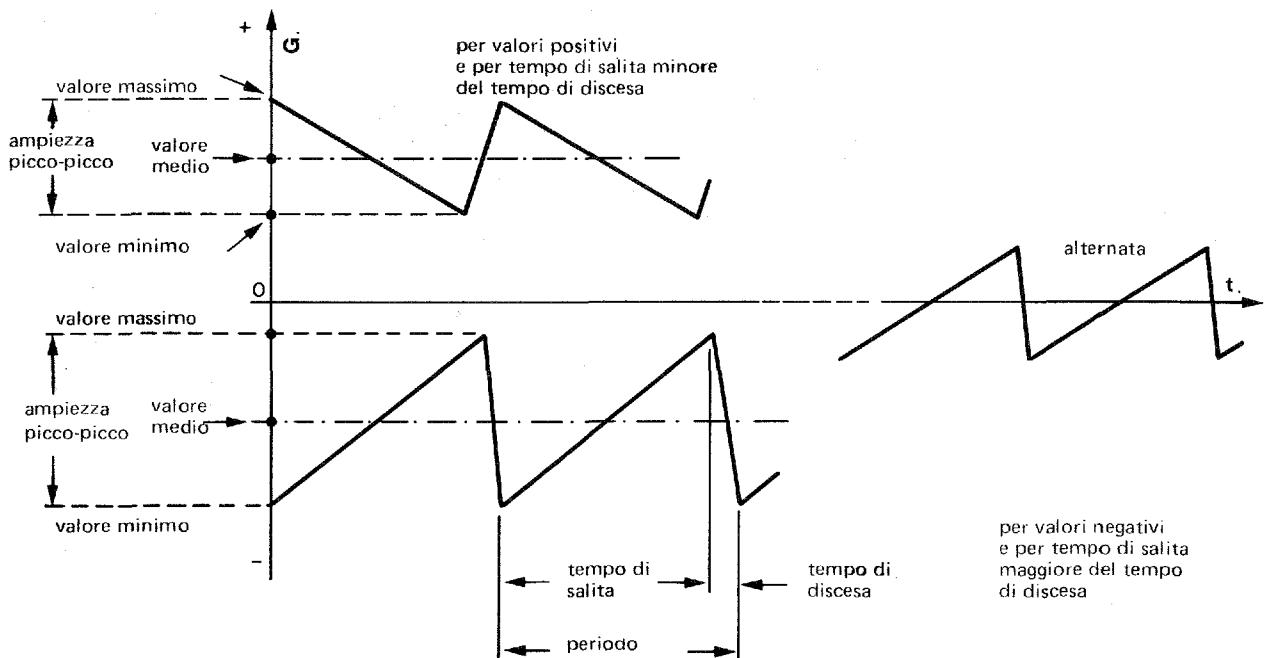
### FORMA D'ONDA TRIANGOLARE

Può essere considerata come un caso particolare di forma d'onda periodica a gradino (vedi 10.43), dove le fasi di salita e discesa assumono importanza particolare.

**Esempio A - Simmetrica:** (i tempi di salita e di discesa sono uguali)



**Esempio B - Asimmetrica: o "a dente di sega":** (i tempi di salita e di discesa sono disuguali)



**Esempio C -** Applicazioni di questi tipi di forma d'onda si trovano in:

- Simulazione lineare del tempo mediante grandezze elettriche (oscilloscopi, radar, ecc.)
- Televisione
- Calcolatori analogici

### FORMA D'ONDA SINOIDALE (sinusoidale)

E' la regina di tutte le forme d'onda perché tutte le altre forme si possono ricondurre ad una opportuna combinazione di vari tipi di essa - vedi par. 10.5 (Teorema di Fourier).

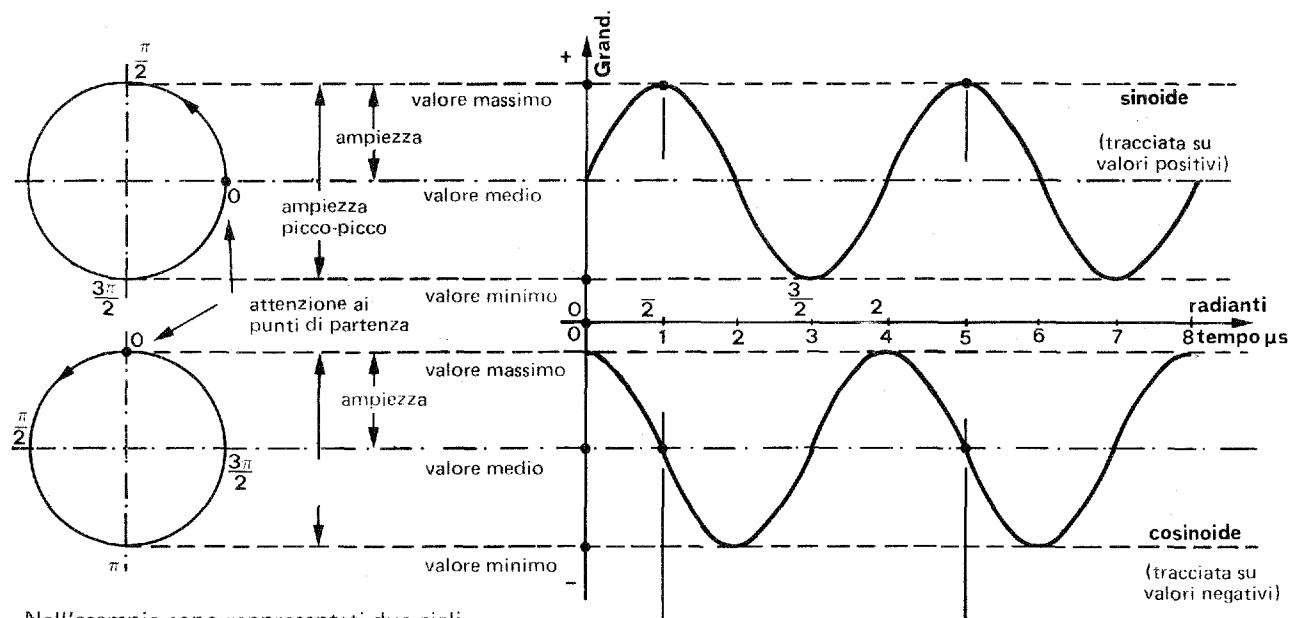
Come descritto nel foglio 10.41 e in altri citati nello stesso, essa corrisponde alla successione di valori della distanza di un punto che percorre una circonferenza da un diametro preso come riferimento in funzione dello spostamento del punto stesso.

Questa distanza, funzione dell'arco percorso, corrisponde alla funzione trigonometrica del "seno" se la rotazione la si fa partire dalla posizione del numero 3 di un orologio; o alla funzione di trigonometrica complementare del "coseno" se la rotazione la si fa partire dalla posizione del numero 12 di un orologio.

Da cui le forme prendono il nome:

sinusoide o, meglio e più brevemente, **sinoide**  
 cosinusoide o, meglio e più brevemente, **cosinoide**

Se il punto ruota con moto uniforme, la sua posizione sulla circonferenza si identifica con il tempo essendo la lunghezza di arco percorso proporzionale al trascorrere del tempo stesso.



Nell'esempio sono rappresentati due cicli per ogni forma,

Le due forme d'onda sono essenzialmente identiche, ma sfasate di  $\frac{\pi}{2}$  radianti ( $90^\circ$ ) e perciò in ogni caso si parlerà sempre di sinoide.

A titolo di esercizio e per fissare le idee espresse nel foglio 10.41, per le due forme d'onda rappresentate in questo foglio, essendo la scala del tempo dei diagrammi espressa in  $\mu s$  (microsecondi) si ha:

$$\text{periodo} = 4 \mu s \text{ cioè } 4 \cdot 10^{-6} \text{ secondi oppure 4 microsecondi}$$

$$\text{frequenza} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-6}} = 0.25 \cdot 10^6 \text{ Hz cioè 250.000 Hz oppure 0.25 MHz o 250 kHz}$$

Le applicazioni di questi tipi di forma d'onda sono innumerevoli e citiamo solo quelle più comuni:

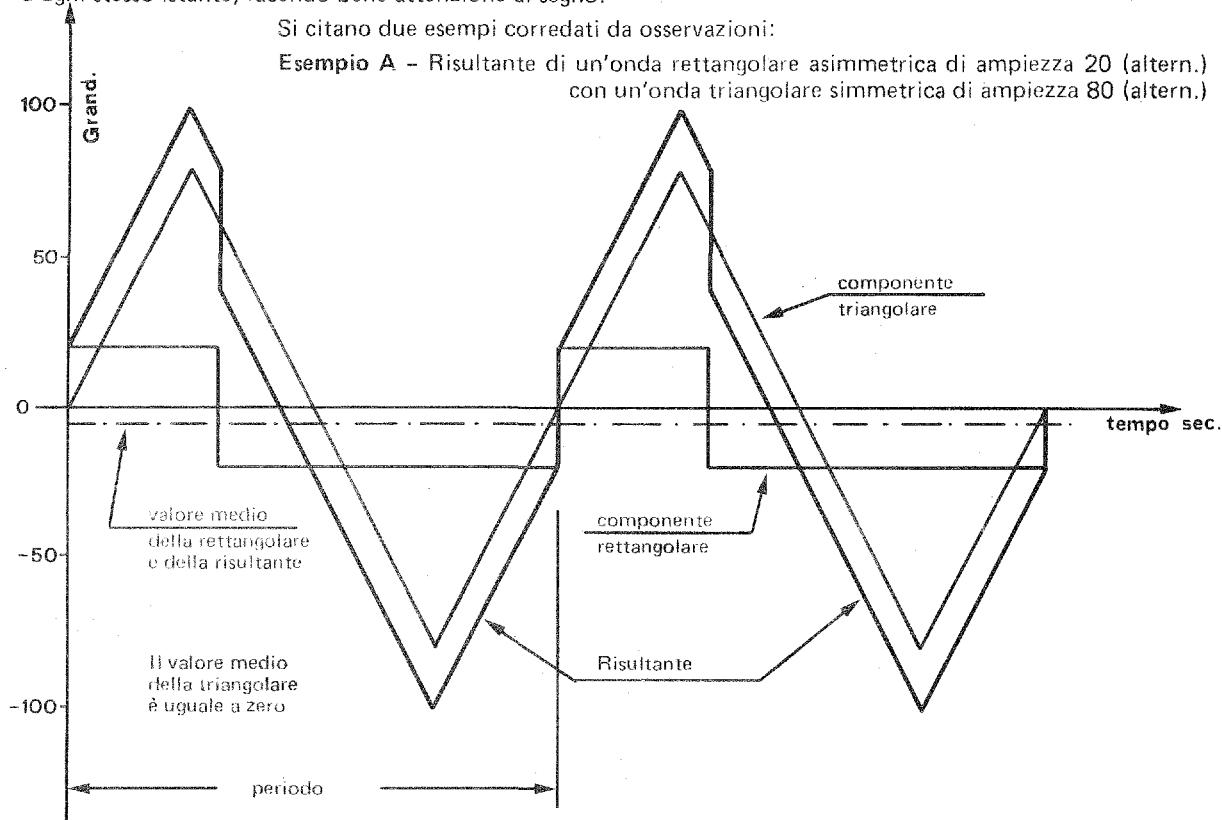
- Generatori di segnali puri di riferimento ed analizzatori
- Trasmettitori e ricevitori radio-televisione
- Generatori di energia elettrica industriale e domestica
- Radiazioni di tutti i tipi: dal suono, al calore, alla luce fino ai raggi cosmici

### COMPOSIZIONE DI GRANDEZZE NON SINOIDALI, AVENTI LO STESSO PERIODO

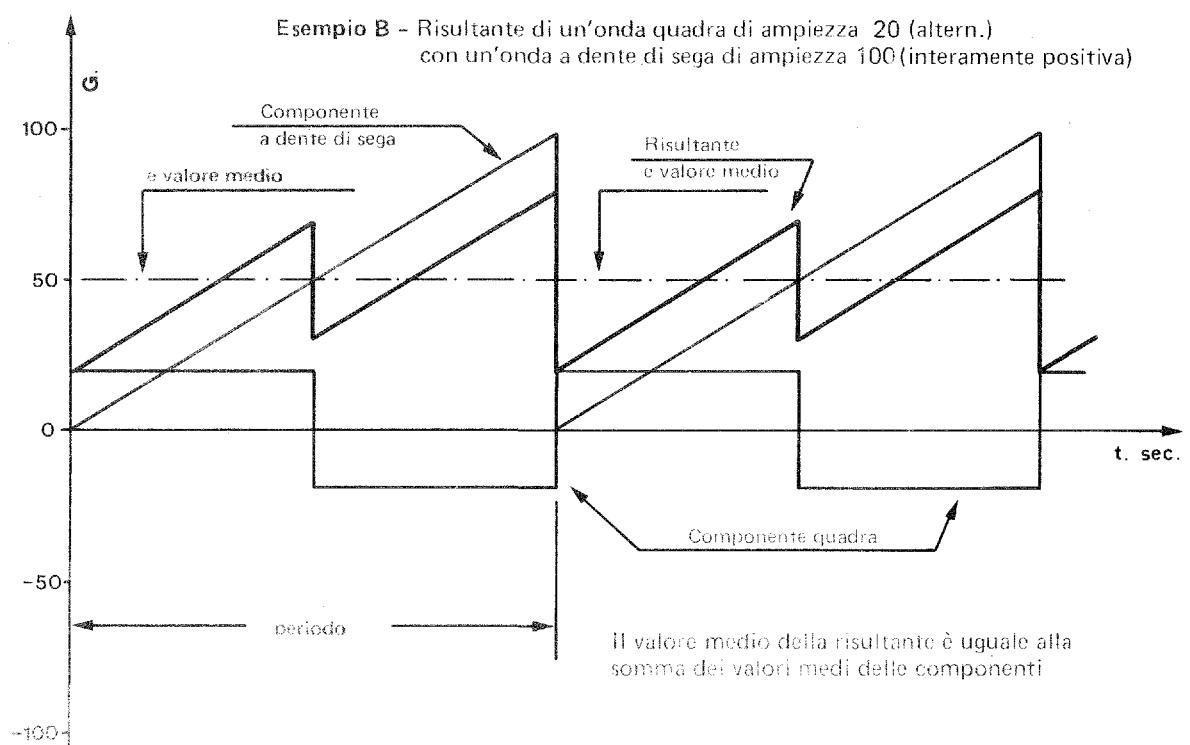
La composizione avviene tenendo conto dei valori, istante per istante, e sommando fra loro quelli relativi a ogni stesso istante, facendo bene attenzione al segno.

Si citano due esempi corredati da osservazioni:

**Esempio A** - Risultante di un'onda rettangolare asimmetrica di ampiezza 20 (altern.) con un'onda triangolare simmetrica di ampiezza 80 (altern.)



**Esempio B** - Risultante di un'onda quadra di ampiezza 20 (altern.) con un'onda a dente di sega di ampiezza 100 (interamente positiva)



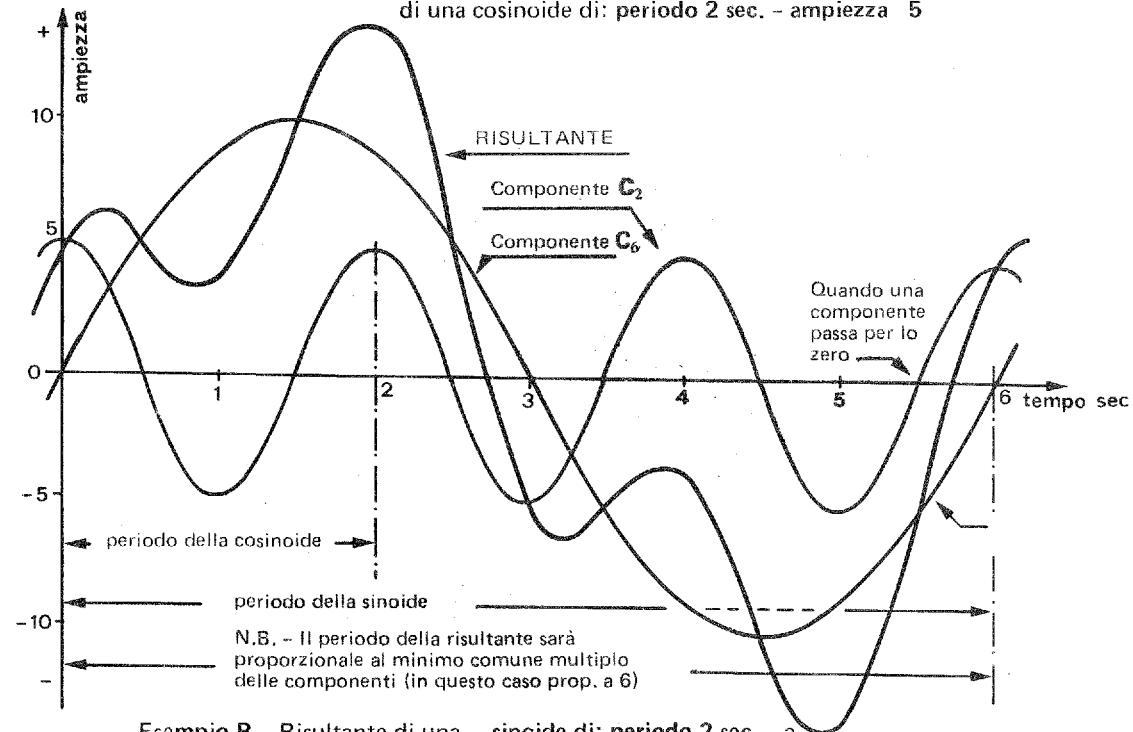
1.8. - Per la composizione di grandi onde nonoidali di uguali frequenze vedi par. 10.3

### COMPOSIZIONE DI GRANDEZZE SINOIDALI DI FREQUENZA E AMPIEZZE DIVERSE

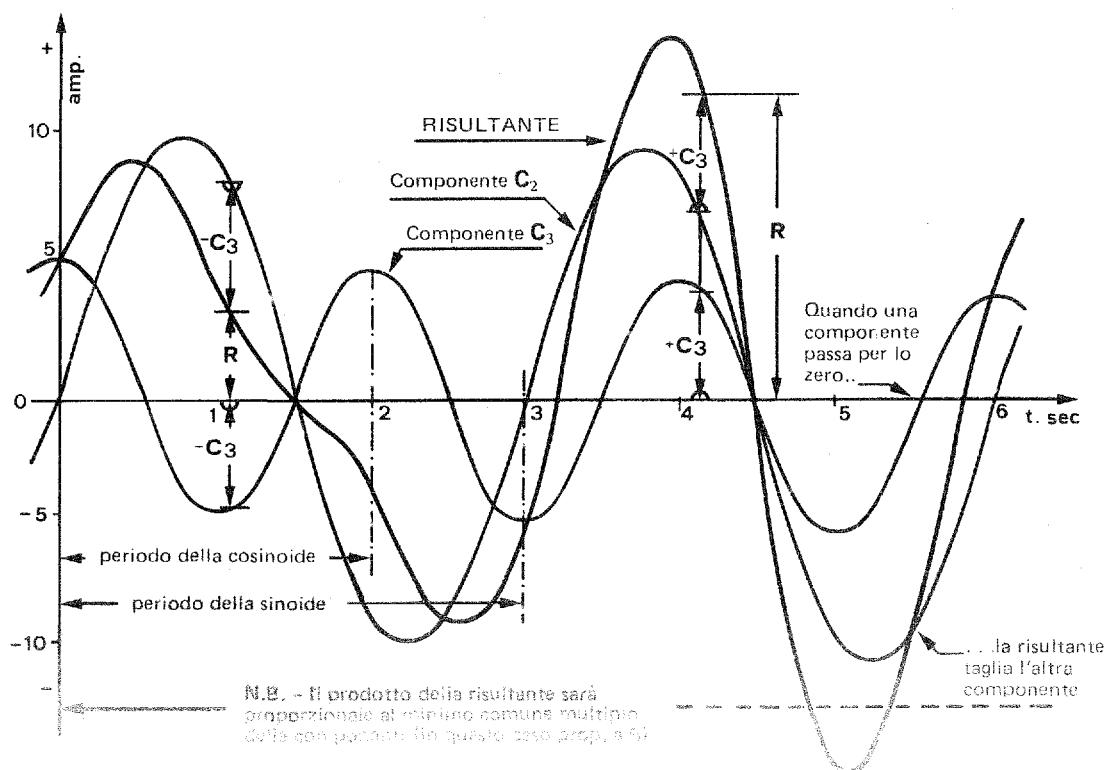
La composizione avviene tenendo conto dei valori, istante per istante, e sommandoli fra di loro, facendo bene attenzione al segno.

Si citano due esempi corredati di osservazioni e di un'importante nota.

**Esempio A - Risultante di una** **sinoide di: periodo 6 sec. - ampiezza 10**  
**di una cosinoide di: periodo 2 sec. - ampiezza 5**



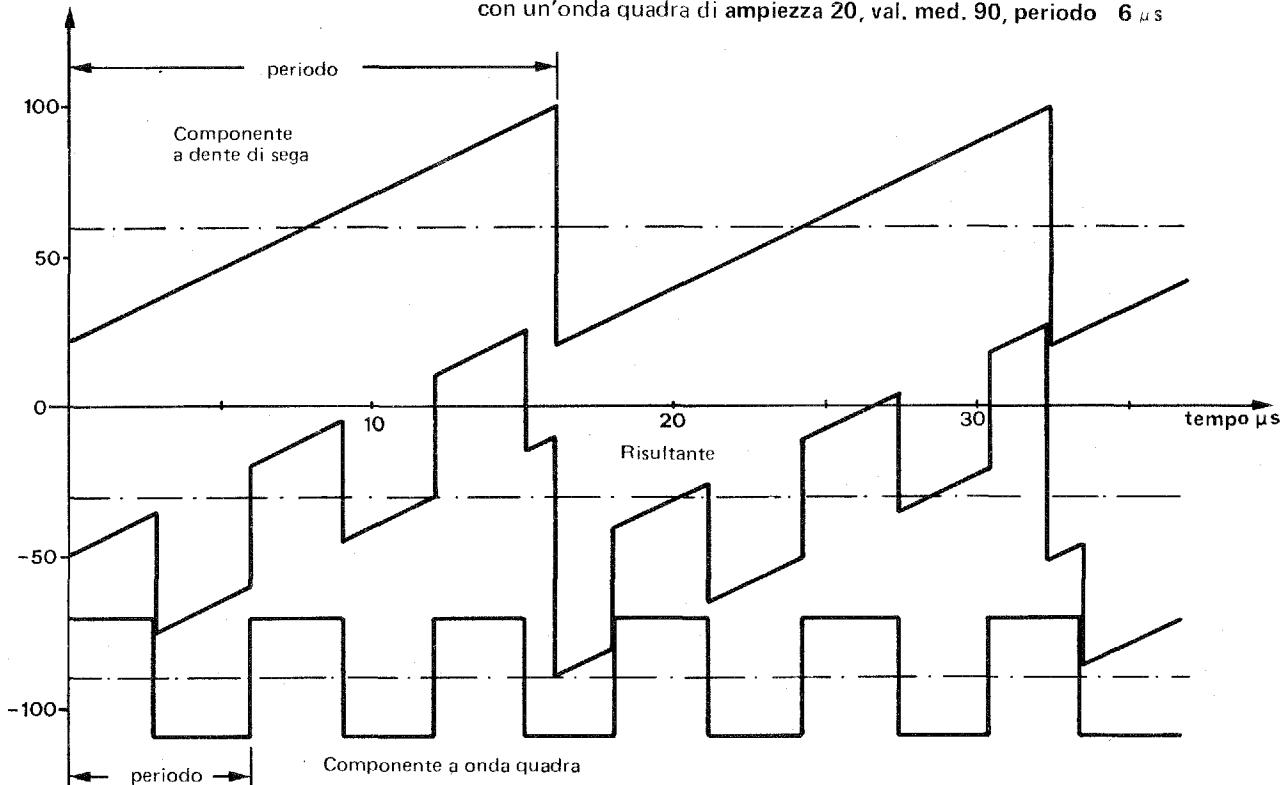
**Esempio B - Risultante di una** **sinoide di: periodo 2 sec. - a**



### COMPOSIZIONE DI GRANDEZZE NON SINOIDALI QUALSIASI

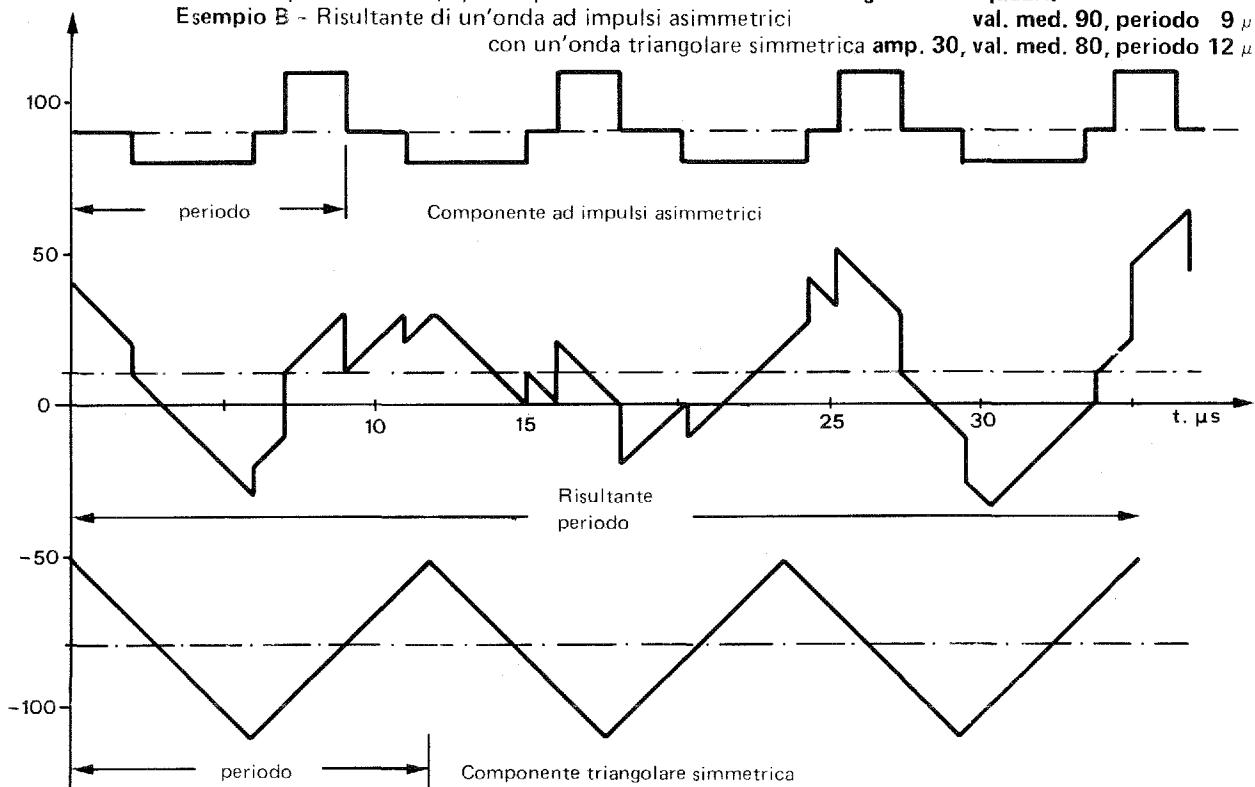
Abituiamoci ad usare un sottomultiplo del minuto secondo molto usato in elettronica: il **microsecondo ( $\mu s$ )**  
 Nei diagrammi che seguono in ascissa 1 microsecondo è rappresentato da 4 mm.

**Esempio A** - Risultante di un'onda a dente di sega di ampiezza 40, val. med. 60, periodo  $16 \mu s$   
 con un'onda quadra di ampiezza 20, val. med. 90, periodo  $6 \mu s$



La risultante ha un periodo di  $48 \mu s$ , corrispondente a 3 cicli a dente di sega e 8 cicli quadri.

**Esempio B** - Risultante di un'onda ad impulsi asimmetrici val. med. 90, periodo  $9 \mu s$   
 con un'onda triangolare simmetrica amp. 30, val. med. 80, periodo  $12 \mu s$



La risultante ha un periodo di  $36 \mu s$ , corrispondente a 4 cicli ad impulsi e 3 cicli triangolari.

## Paragrafo 10.5

# ANALISI DELLE OSCILLAZIONI

### Indice degli argomenti e delle pagine

**arg. 10.51 – Teorema di Fourier**

- pag. 1 – Premessa storica su Fourier
- Analisi delle oscillazioni e teorema di Fourier
- Significato pratico
- " 2 – Significato del teorema di Fourier
- " 3 – Teorema di Fourier
- " 4 – Concetti generali sulle forme d'onda

**arg. 10.52 – Onda quadra**

- pag. 1 – Analisi armonica dell'onda quadra
- " 2 – Sintesi dell'onda quadra

**arg. 10.53 – Onda triangolare**

- pag. 1 – Analisi armonica dell'onda triangolare
- " 2 – Sintesi dell'onda triangolare

**arg. 10.54 – Onda a dente di sega**

- pag. 1 – Analisi armonica dell'onda a dente di sega
- " 2 – Sintesi dell'onda a dente di sega

**arg. 10.55 – Onda a semi-sinoide**

- pag. 1 – Analisi armonica dell'onda a semisinoide
- " 2 – Sintesi dell'onda a semisinoide

**arg. 10.56 – Onda a doppia semi-sinoide**

- pag. 1 – Analisi armonica dell'onda a doppia semisinoide
- " 2 – Sintesi dell'onda a doppia semisionide

**arg. 10.58 – Valori e fattori caratteristici**

- pag. 1 – Valore efficace delle forme d'onda
- " 2 – Fattori di forma e di cresta delle forme d'onda

**arg. 10.59 – Esame comparativo delle forme d'onda**

- pag. 1 – Tabella riassuntiva delle armoniche per le principali forme d'onda
- " 2 – Spettri delle frequenze per le principali forme d'onda

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
Capitolo : 10 Nozioni preliminari  
Paragrafo : 10.5 Analisi delle oscillazioni  
Argomento : 10.51 Teorema di Fourier

### PREMESSA STORICA SU FOURIER

Al paragrafo 10.4 si sono esaminate le forme d'onda più comuni nelle applicazioni elettroniche.

La grande scoperta di J.B.J. Fourier consiste nell'aver stabilito una relazione fra una forma d'onda qualsiasi, purché periodica e matematicamente determinabile, e la forma sinusoidale.

E' interessante constatare che Jean Baptiste Joseph Fourier visse in Francia fra il 1768 e il 1830, quando cioè l'elettronica era di là da venire e l'elettrotecnica stava buttando i primi passi con Luigi Galvani (1737-1798) e Alessandro Volta (1745-1827).

A quei tempi la sua scoperta non poteva che avere un valore puramente matematico applicabile solo nei campi della fisica allora conosciuti.

Non è raro il caso in cui l'elettronica sia stata preceduta da oltre un secolo da scoperte appartenenti al campo della matematica pura.

Quando l'elettronica nacque trovò il terreno già preparato per svilupparsi nel modo esplosivo al quale noi stiamo assistendo.

### Analisi delle oscillazioni e teorema di Fourier

Fourier poté dunque stabilire che:

una forma d'onda qualsiasi

(purché periodica e matematicamente determinabile)

può essere scomposta in

una serie infinita di onde sinusoidali

ciascuna di frequenza multipla di quella forma d'onda e di ampiezza via via decrescente con l'aumentare della frequenza, secondo una legge matematica precisa.

(non troppo facilmente determinabile per un principiante!).

### SIGNIFICATO PRATICO

Un significato pratico di questa legge consiste ad esempio nel fatto che:

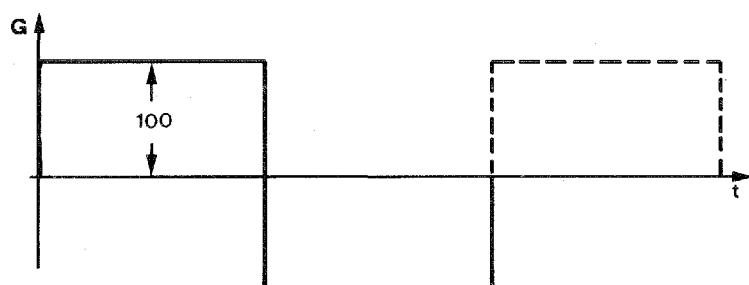
- generare un'onda diversa dalla sinusoidale significa generare una serie di onde sinusoidali di varie caratteristiche, oppure che:
- la distorsione di un segnale può essere considerata come la generazione di onde sinusoidali indesiderate, conoscendo le quali, non è difficile eliminarle con opportuni circuiti (filtri).

### SIGNIFICATO DEL TEOREMA DI FOURIER

Con la premessa fatta alla pagina precedente vediamo se riusciamo a far capire il significato e la portata di una simile scoperta.

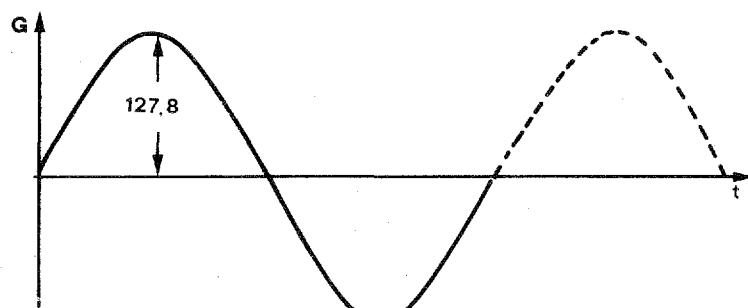
Prendiamo ad esempio un ciclo di forma d'onda quadra di ampiezza uguale a 100

Il teorema di Fourier dice che questa onda si può scomporre:



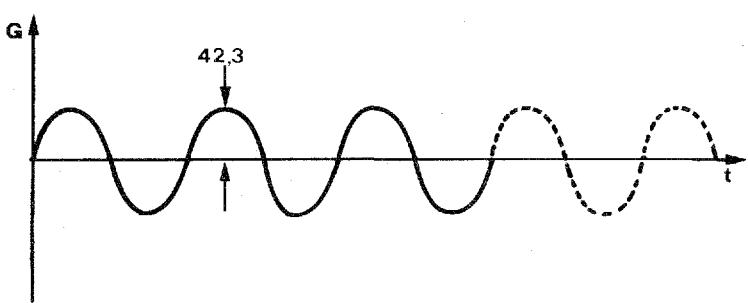
a) -- In un'onda sinoidale (1<sup>a</sup> armonica o fondamentale) della stessa frequenza di quella data in fase con la stessa e di ampiezza uguale a 127,8

più



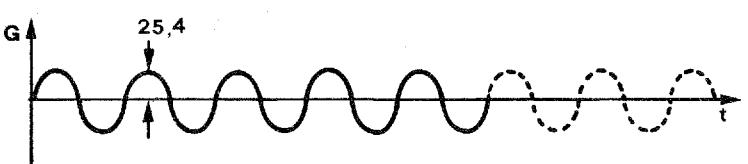
b) -- un'onda sinoidale di frequenza tripla rispetto a quella data (3<sup>a</sup> armonica) in fase rispetto al suo punto di partenza e di ampiezza pari a 42,3

più



c) -- un'onda sinoidale di frequenza quintupla rispetto a quella data (5<sup>o</sup> armonica) in fase rispetto al suo punto di partenza e di ampiezza pari a 25,4

più



d) -- la 7<sup>a</sup> armonica ecc. come risulta dalla tabella illustrata in 10.59-1

#### Osservazione

Questa forma d'onda è mancante delle armoniche di ordine pari (la 2<sup>o</sup>, la 4<sup>o</sup>, ecc.) altre forme d'onda invece le posseggono (v. 10-59).

#### Avvertenze

Vale anche la proposizione inversa secondo la quale infatti prendendo tutte insieme queste sinusoidali e sommandole fra di loro per punti corrispondenti si può ricomporre, quale risultante, l'onda originaria.

Si vedano gli esempi riportati nelle seconde pagine degli argomenti che seguono.



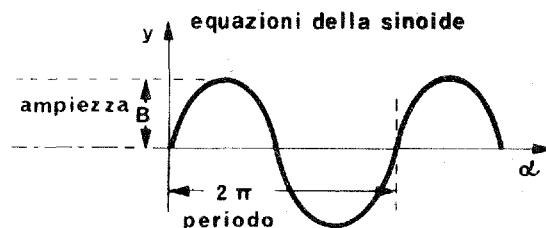
### TEOREMA DI FOURIER

Una forma d'onda qualsiasi, purché sia periodica, può essere scomposta in un insieme di infinite componenti sinusoidali e cosinusoidali.

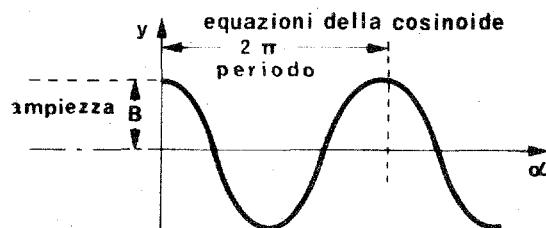
Rispetto alla sinode fondamentale di frequenza uguale alla forma d'onda in esame, la frequenza di ogni componente è crescente secondo multipli interi, mentre l'ampiezza decresce secondo una determinata legge algebrica e geometrica.

Inversamente, ciò significa che ogni grandezza periodica di qualsiasi forma può essere ricostruita sommando algebricamente i valori di infinite sinusoidi e cosinusoidi di frequenza crescente secondo multipli interi e di ampiezza decrescente secondo una regola predeterminata per ogni forma.

#### Equazioni fondamentali



$$\begin{aligned}y_{1s} &= A_1 \sin \alpha && \text{fondamentali} \\y_{2s} &= A_2 \sin 2\alpha && 2^{\text{e}} \text{ armoniche} \\y_{3s} &= A_3 \sin 3\alpha && 3^{\text{e}} \text{ armoniche} \\y_{ns} &= A_n \sin n\alpha && n^{\text{e}} \text{ armoniche}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}y_{1c} &= B_1 \cos \alpha \\y_{2c} &= B_2 \cos 2\alpha \\y_{3c} &= B_3 \cos 3\alpha \\y_{nc} &= B_n \cos n\alpha\end{aligned}$$

#### Equazione generale di Fourier

In base al teorema enunciato, una forma d'onda qualsiasi, di frequenza  $f$ , è uguale alla seguente somma:

$$\text{valore della risultante } y = y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n$$

valore di un'eventuale componente continua che si presenta qualora il valore medio della forma d'onda fosse diverso da zero.

$$y_1 = y_{1s} + y_{2s}$$

valori della fondamentale di frequenza uguale a quella della forma d'onda in analisi

$y_n = y_{ns} + y_{nc}$  valori delle successive componenti (o armoniche) di ordine (o frequenza)  $n$ , rispetto alla fondament.

$$y_3 = y_{3s} + y_{3c}$$

valori della 3a armonica di frequenza tripla rispetto alla fondament.

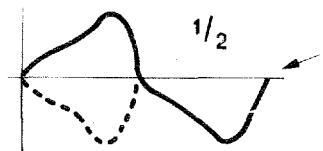
$$y_2 = y_{2s} + y_{2c}$$

valori della 2a armonica di frequenza doppia rispetto alla fondament.

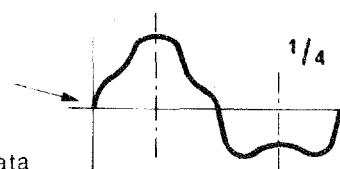
#### Alcune osservazioni di carattere generale

Ogni forma d'onda di tipo geometrico (oltre che periodico) presenta caratteristiche diverse di simmetria.

**Simmetria di quarto d'onda:** ogni semionda, tagliata con un asse mediano, forma due quarti d'onda fra loro simmetrici.



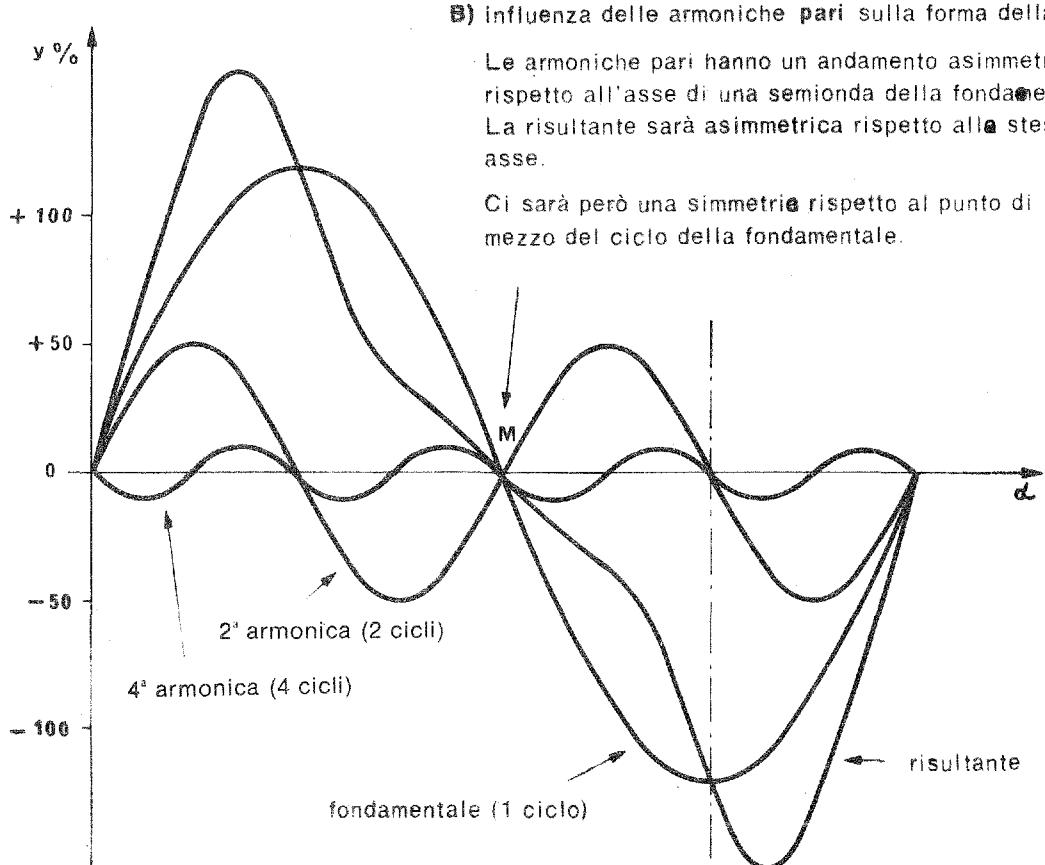
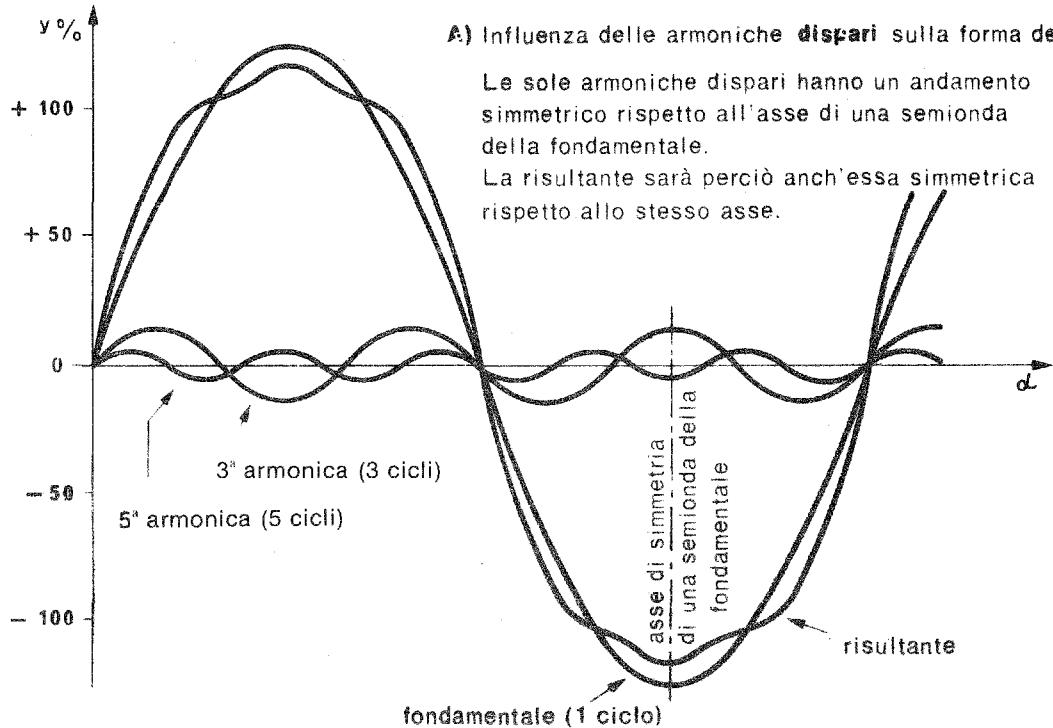
**Simmetria di semionda:** ogni semionda, traslata di un semiperiodo è simmetrica a quella opposta.



Le armoniche, cioè le varie sinusoidi e cosinusoidi che le compongono, si presentano secondo un certo ordine logico che dipende dal tipo di simmetria della forma d'onda, come si può vedere nelle analisi che seguono.



## CONCETTI GENERALI SULLE FORME D'ONDA





### ANALISI ARMONICA DELL'ONDA QUADRA

Le serie armoniche delle frequenze sinusoidali che compongono la forma d'onda quadra sono le seguenti:

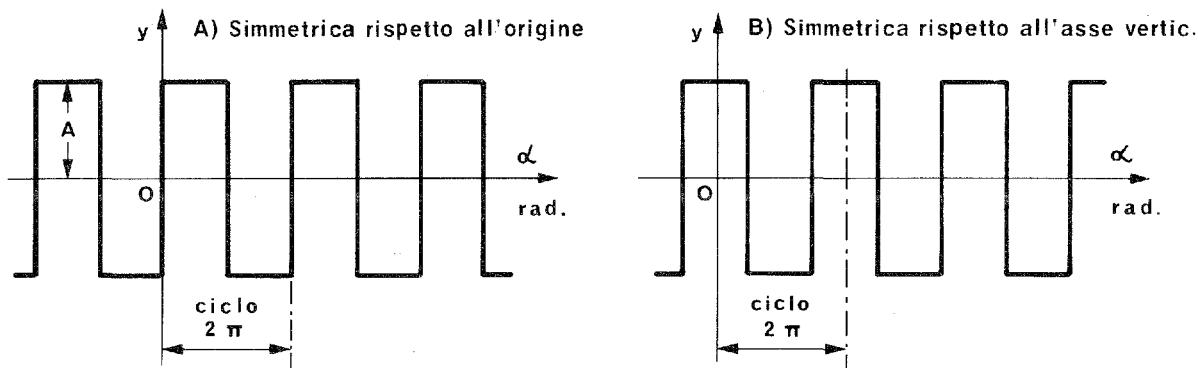


Tabella analitica delle componenti sinusoidali

Definizione di ogni componente sinusoidale	Frequenza rispetto a quella della quadra	TERMINI CORRISPONDENTI A OGNI COMPONENTE	Note		
nome	simbolo	Aampiezza (identica nei 2 casi)	A) per simmetrica resp all'orig (solo seni)	B) per simmetrica resp all'asse vertic (solo coseni)	
Valore medio	$y_0$	0	—	—	L'assenza di valore medio indica mancanza di componente costante
Fondamentale	$y_1$	$f$	$\frac{4}{\pi}$	$+\sin \alpha$	$+\cos \alpha$
3 armonica	$y_3$	$3f$	$\frac{4}{3\pi}$	$+\sin 3\alpha$	$-\cos 3\alpha$
5 armonica	$y_5$	$5f$	$\frac{4}{5\pi}$	$+\sin 5\alpha$	$+\cos 5\alpha$

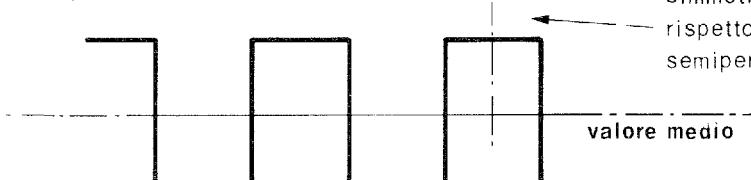
$$(2n-1) \text{ armonica } y_{(2n-1)} = \frac{4}{(2n-1)\pi} \sin((2n-1)\alpha) - (-1)^{(2n-1)} \cos((2n-1)\alpha)$$

sono presenti solo armoniche di frequenza dispari.

Infatti (vedi 10.50) la forma possiede simmetria di quarto d'onda e simmetria di semionda

vedi 10.59 per l'analisi di questa forma d'onda

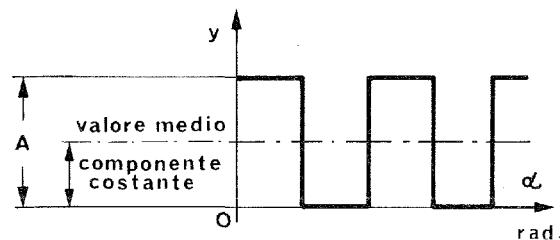
Simmetria di quarto d'onda:  
rispetto a questo asse verticale il semiperiodo è simmetrico.



Simmetria di semionda:

la semionda inferiore traslata di un semiperiodo è simmetrica alla semionda superiore rispetto all'asse del valore medio.

N.B. - Forme d'onda quadra interamente al disopra delle ascisse hanno un valore medio  $= A/2$





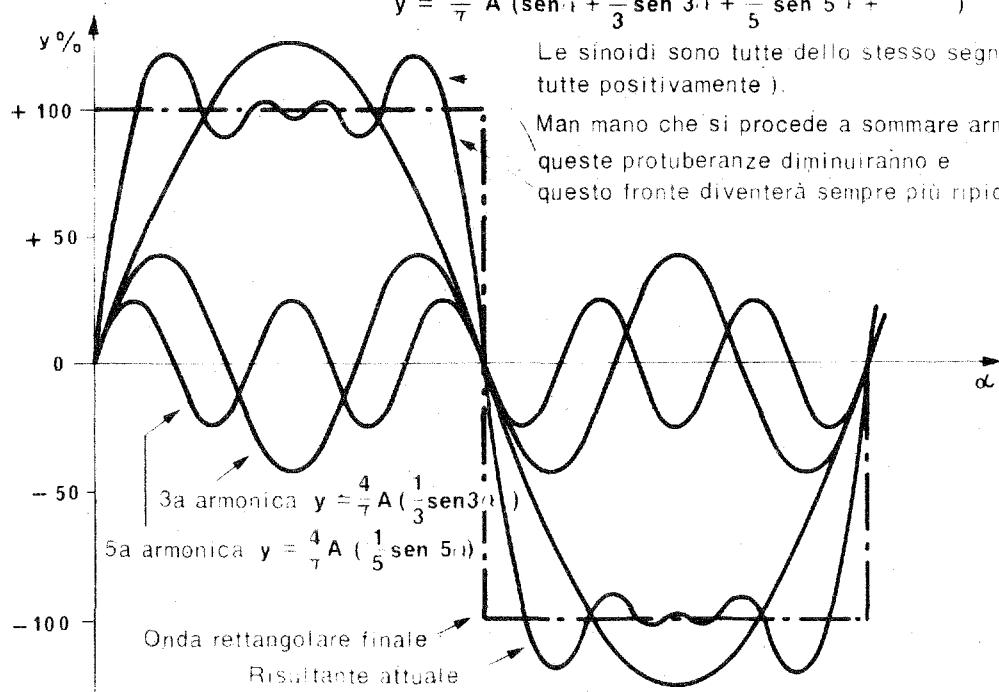
### SINTESI DELL'ONDA QUADRA

A) Per composizione di sinoidi (simmetrica rispetto all'origine)

$$y = \frac{4}{\pi} A (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots)$$

Le sinoidi sono tutte dello stesso segno (cioè partono tutte positivamente).

Man mano che si procede a sommare armoniche superiori queste protuberanze diminuiranno e questo fronte diventerà sempre più ripido.

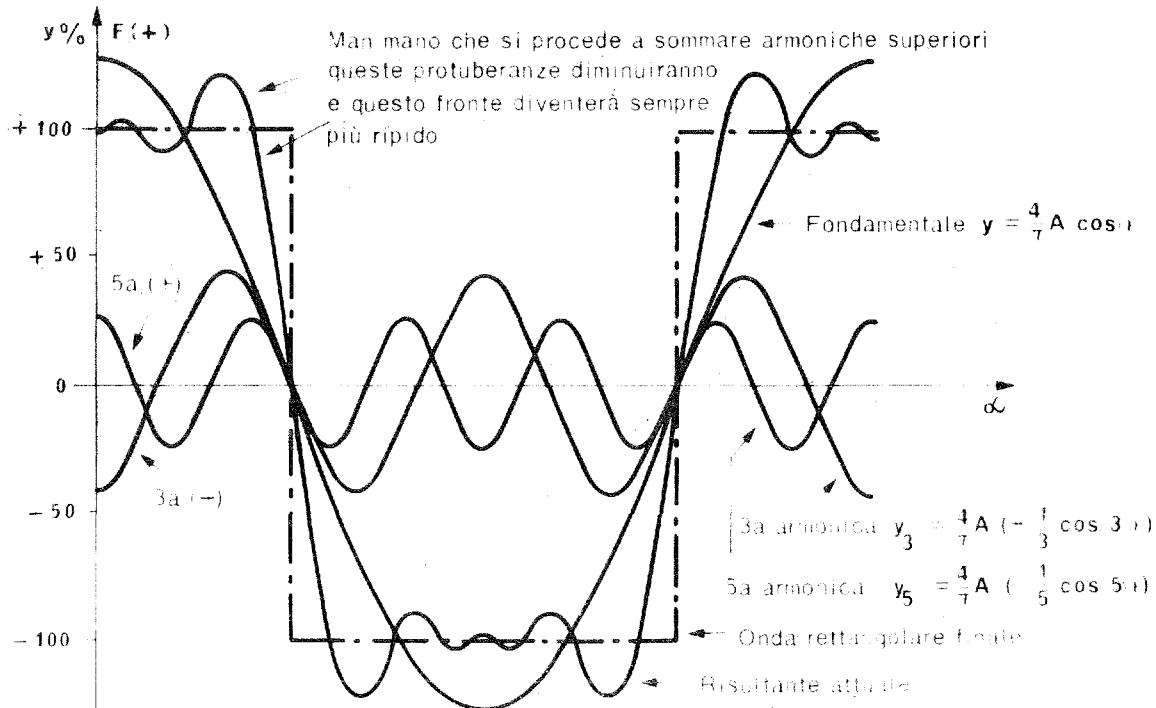


B) Per composizione di cosinoidi (simmetrica rispetto alle ordinate)

Le cosinoidi sono alternativamente positive e negative (cioè partono alternativamente da valori positivi e negativi)

$$y = \frac{4}{\pi} A (\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots)$$

Man mano che si procede a sommare armoniche superiori queste protuberanze diminuiranno e questo fronte diventerà sempre più ripido

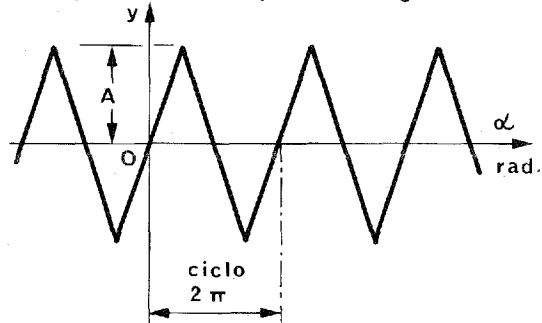




### ANALISI ARMONICA DELL'ONDA TRIANGOLARE

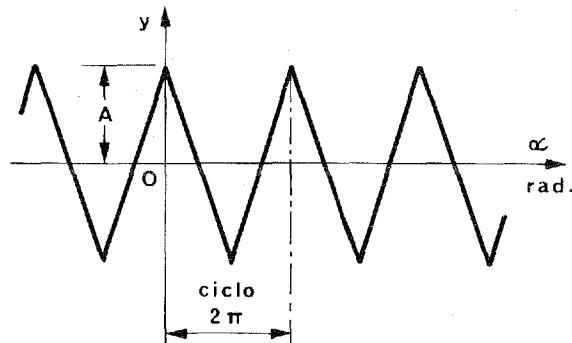
Le serie armoniche delle frequenze sinusoidali che compongono la forma d'onda triangolare sono le seguenti:

A) Simmetrica rispetto all'origine



$$y = \frac{8}{\pi^2} A (\sin \alpha - \frac{1}{9} \sin 3\alpha + \frac{1}{25} \sin 5\alpha - \dots)$$

B) Simmetrica rispetto all'asse verticale



$$y = \frac{8}{\pi^2} A (\cos \alpha + \frac{1}{9} \cos 3\alpha + \frac{1}{25} \cos 5\alpha + \dots)$$

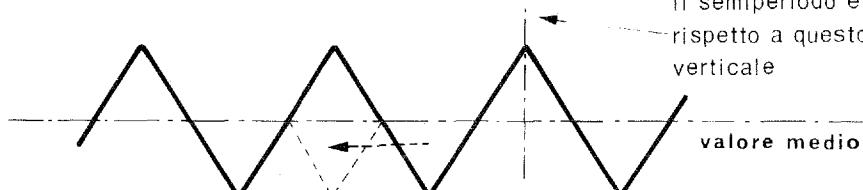
Tabella analitica delle componenti sinusoidali

Definizione di ogni componente sinusoidale nome	simbolo	Frequenza rispetto a quella della triangolare	TERMINI CORRISPONDENTI A OGNI COMPONENTE Ampiezza (identica nei 2 casi)	TERMINI CORRISPONDENTI A OGNI COMPONENTE		Note
				A) per simmetrica risp all'orig. (solo seni)	B) per simmetrica risp all'asse vertic. (solo coseni)	
Valore medio	$y_0$	0	0	—	—	L'assenza di valore medio indica mancanza di componente costante
Fondamentale	$y_1$	f	$\frac{8}{\pi}$	$+\sin \alpha$	$+\cos \alpha$	
3a armonica	$y_3$	$3f$	$\frac{8}{9\pi^2}$	$-\sin 3\alpha$	$+\cos 3\alpha$	
5a armonica	$y_5$	$5f$	$\frac{8}{25\pi^2}$	$+\sin 5\alpha$	$+\cos 5\alpha$	

$$(2n-1) \text{ armonica } y_{(2n-1)} = \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} (-1)^{\frac{n}{2}} \sin ((2n-1)\alpha) \cos ((2n-1)\alpha)$$

sono presenti solo armoniche di frequenza dispari.

Infatti (vedi 10.50) la forma possiede simmetria di quarto d'onda e simmetria di semionda

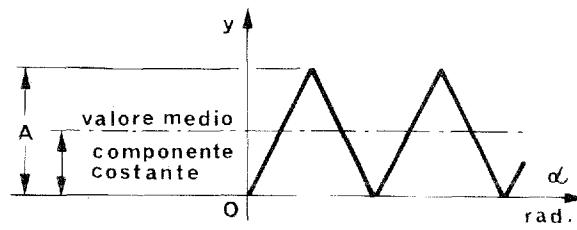


Simmetria di semionda:

la semionda inferiore traslata di un semiperiodo è simmetrica alla semionda superiore rispetto all'asse del valore medio.

N.B. - Forme d'onda triangolari interamente al disopra delle ascisse hanno un valore medio =  $A/2$ .

Simmetria di quarto d'onda:  
 il semiperiodo è simmetrico  
 rispetto a questo asse  
 verticale



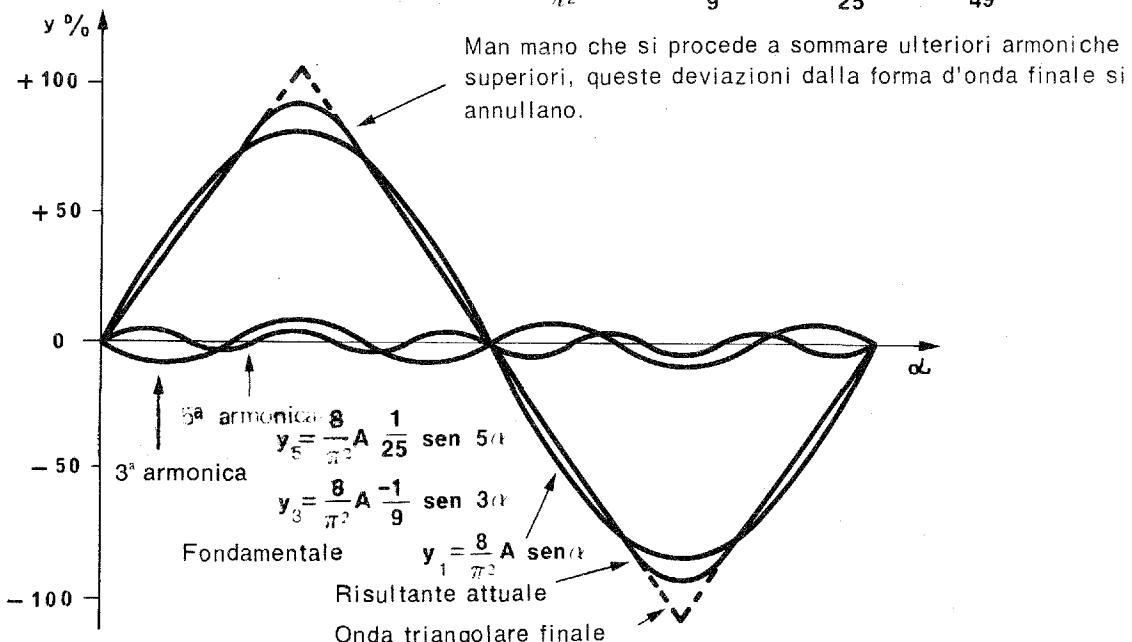


### SINTESI DELL'ONDA TRIANGOLARE

Questa forma d'onda è così povera di armoniche che già con le prime tre si trova ben delineata.

#### A) Per composizione di sinoidi (simmetrica rispetto all'origine)

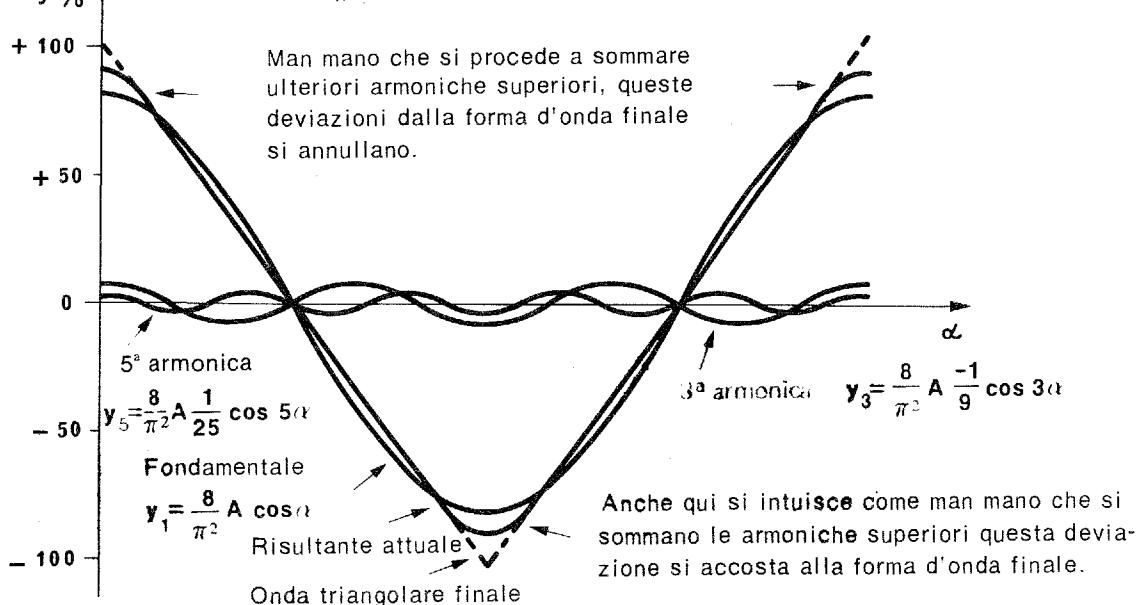
Le sinoidi sono alternativamente di segno opposto (partono alternativamente assumendo valori positivi e negativi). Equazione:  $y = \frac{8}{\pi^2} A (\sin \alpha - \frac{1}{9} \sin 3\alpha + \frac{1}{25} \sin 5\alpha - \frac{1}{49} \sin 7\alpha + \dots)$



#### B) Per composizione di cosinoidi (simmetrica rispetto alle ordinate)

Le cosinoidi sono tutte dello stesso segno (partono tutte positivamente)

$$\text{Equazione: } y = \frac{8}{\pi^2} A (\cos \alpha + \frac{1}{9} \cos 3\alpha + \frac{1}{25} \cos 5\alpha + \frac{1}{49} \cos 7\alpha + \dots)$$



N.B. - I diagrammi sono costruiti per un ciclo della fondamentale e per  $A = 100$ .



### ANALISI ARMONICA DELL'ONDA A DENTE DI SEGA

Le serie armoniche delle frequenze sinusoidali che compongono la forma d'onda triangolare asimmetrica o a dente di sega sono le seguenti:

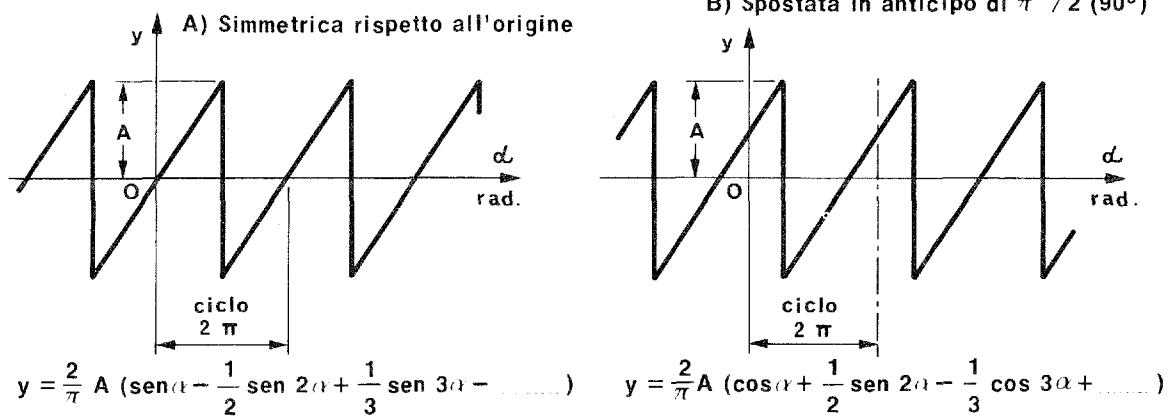


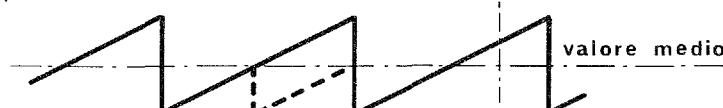
Tabella analitica delle componenti sinusoidali

Definizione di ogni componente sinusoidale	Frequenza rispetto alla dente di sega	TERMINI CORRISPONDENTI A OGNI COMPONENTE	Note	
nome	simbolo	ampiezza (identica nei due casi)	A) per simmetrica risp all'origine (solo seni)	B) per spostata in anticipo di $\pi/2$ (solo coseni)
Valore medio	$y_0$	0	0	—
Fondamentale	$y_1$	$f$	$\frac{2}{\pi}$	$+\sin \alpha$
2a armonica	$y_2$	$2f$	$\pi$	$-\sin 2\alpha$
3a armonica	$y_3$	$3f$	$\frac{2}{3\pi}$	$+\sin 3\alpha$
<hr/>				
$n^a$ armonica	$y_n$	$nf$	$\frac{2}{n\pi}$	$-(-1)^{(2n-1)} \sin n\alpha$
<hr/>				

sono presenti tutte le armoniche (vedi 10.51)

questa forma non possiede simmetrie né di quarto d'onda né di semionda

Asimmetria di quarto d'onda:  
 il semiperiodo non è simmetrico rispetto a questo asse verticale

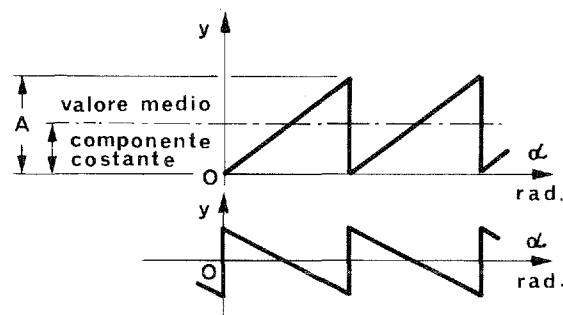


Asimmetria di semionda:

la semionda inferiore, traslata di un semiperiodo, non è simmetrica alla semionda superiore rispetto all'asse del valore medio.

N.B. - Forme d'onda a dente di sega interamente al disopra delle ascisse hanno valore medio =  $A/2$ .

N.B. - Per avere il diagramma in discesa basta invertire di segno il valore delle componenti.



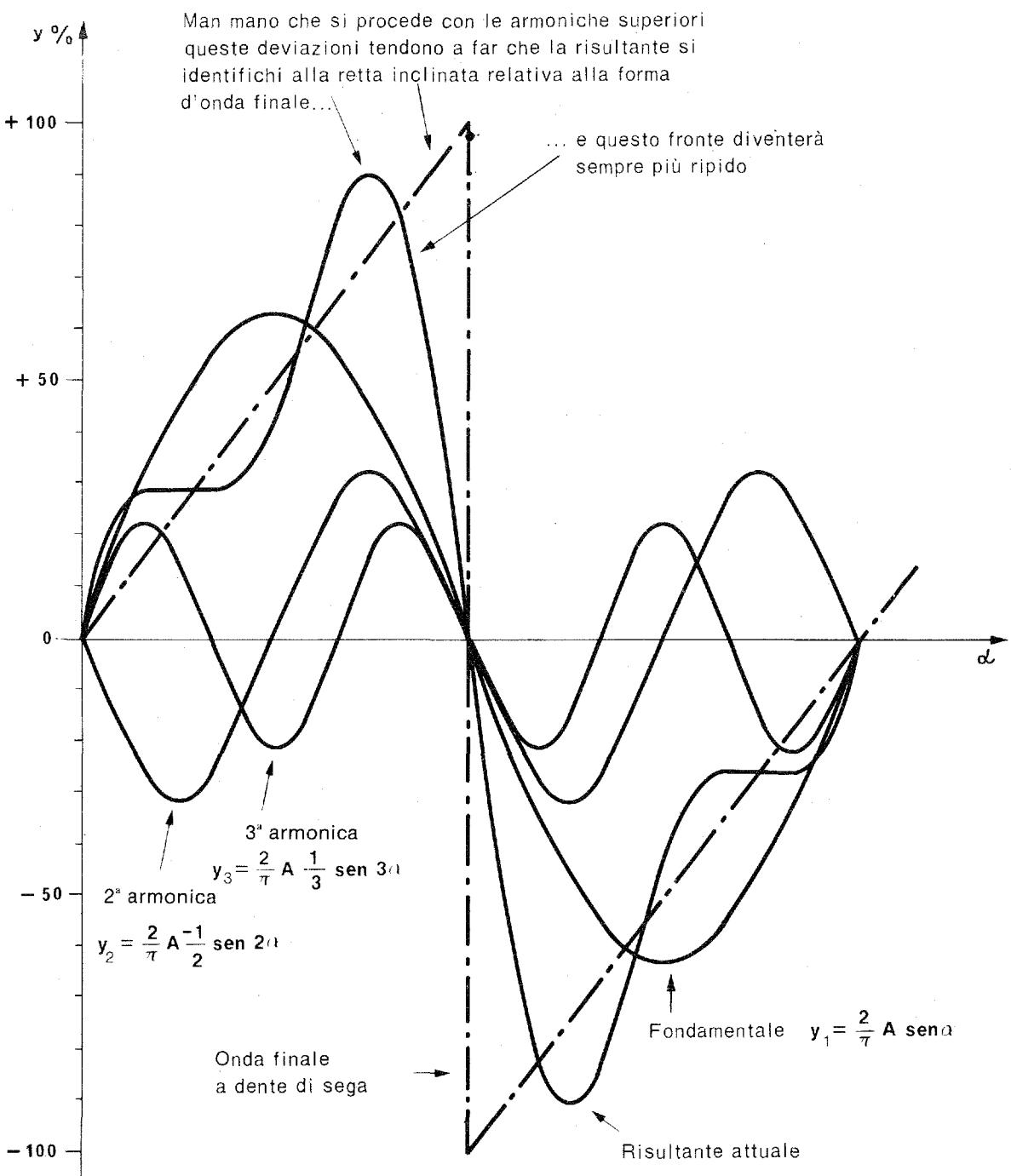


### SINTESI DELL'ONDA A DENTE DI SEGA

#### A) Per composizione di sinoidi (simmetrica rispetto all'origine)

Le sinoidi sono alternativamente positive e negative (cioè assumono all'inizio valori positivi o negativi).

$$\text{Equazione: } y = \frac{2}{\pi} A (\sin \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha + \frac{1}{3} \sin 3\alpha - \frac{1}{4} \sin 4\alpha + \dots)$$



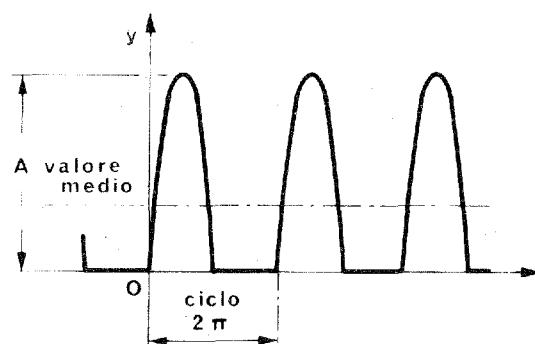
N.B. - Il diagramma è costruito per un ciclo della fondamentale e per  $A = 100$ .



### ANALISI ARMONICA DELL'ONDA A SEMISINOIDE

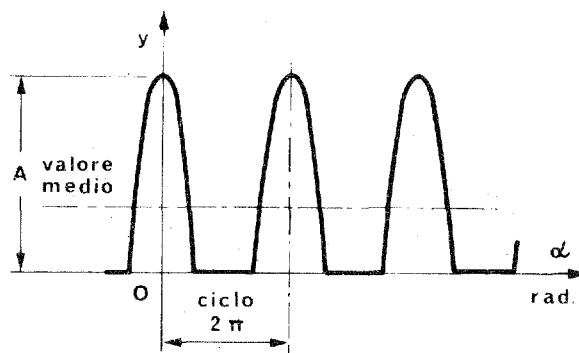
Le serie armoniche delle frequenze sinusoidali che compongono la forma d'onda a semisinoide sono le seguenti:

A) Con inizio dall'origine



$$y = \frac{1}{7} A \left( 1 + \frac{7}{2} \sin x - \frac{2}{3} \cos 2x - \frac{2}{15} \cos 4x + \dots \right)$$

B) Simmetrica rispetto alle ordinate



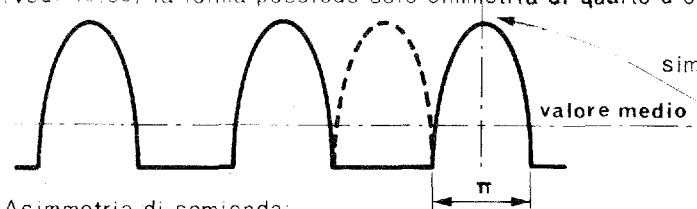
$$y = \frac{1}{7} A \left( 1 + \frac{7}{2} \cos x + \frac{2}{3} \cos 2x - \frac{2}{15} \cos 4x + \dots \right)$$

Tabella analitica delle componenti sinusoidali

Definizione di ogni componente sinusoidale	Frequenza rispetto alla semisinoide	Ampliezza identica nei due casi	TERMINI CORRISPONDENTI A OGNI COMPONENTE		Note
			A) per inizio dall'origine (solo seni)	B) per simmetrica risp. all'asse vertic. (solo coseni)	
Valore medio	$y_0$	0	$\frac{1}{7}$		Il valore medio indica la presenza di una componente costante pari a circa il 32% dell'ampiezza A della semisinoide
Fondamentale	$y_1$	f	$\frac{1}{2\pi}$	$+ \sin x$	$+ \cos x$
2a armonica	$y_2$	2f	$\frac{2}{3\pi}$	$- \cos 2x$	$+ \cos 2x$
4a armonica	$y_4$	4f	$\frac{2}{15\pi}$	$- \cos 4x$	$- \cos 4x$

$$2n - a \text{ armonica} \quad 2nf \quad \frac{2}{(n^2-1)\pi} \quad - \cos 2nx \quad (-1)^{\frac{n}{2}+1} \cos 2nx$$

sono presenti solo armoniche di frequenza pari (vedi 10.50) la forma possiede solo simmetria di quarto d'onda e non simmetria di semionda



simmetria di quarto d'onda:

il semiperiodo è simmetrico rispetto a questo asse verticale.

Asimmetria di semionda:

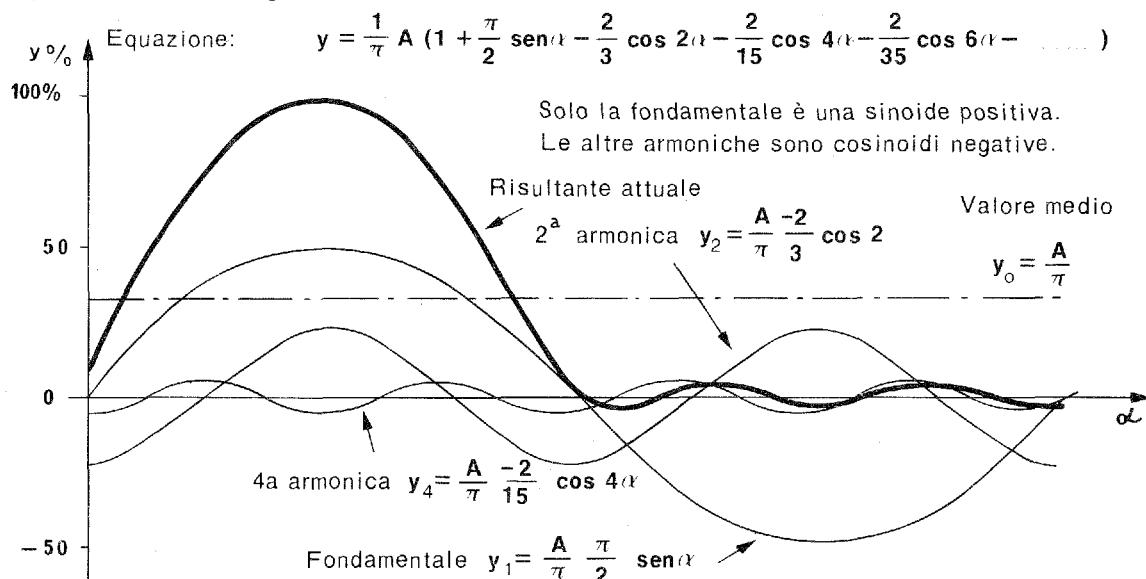
la semionda inferiore, traslata di un semiperiodo non è simmetrica alla semionda superiore rispetto all'asse del valore medio



### SINTESI DELL'ONDA A SEMISINOIDE

Questa forma d'onda è così povera di armoniche che essa si trova già ben delineata con le prime tre.

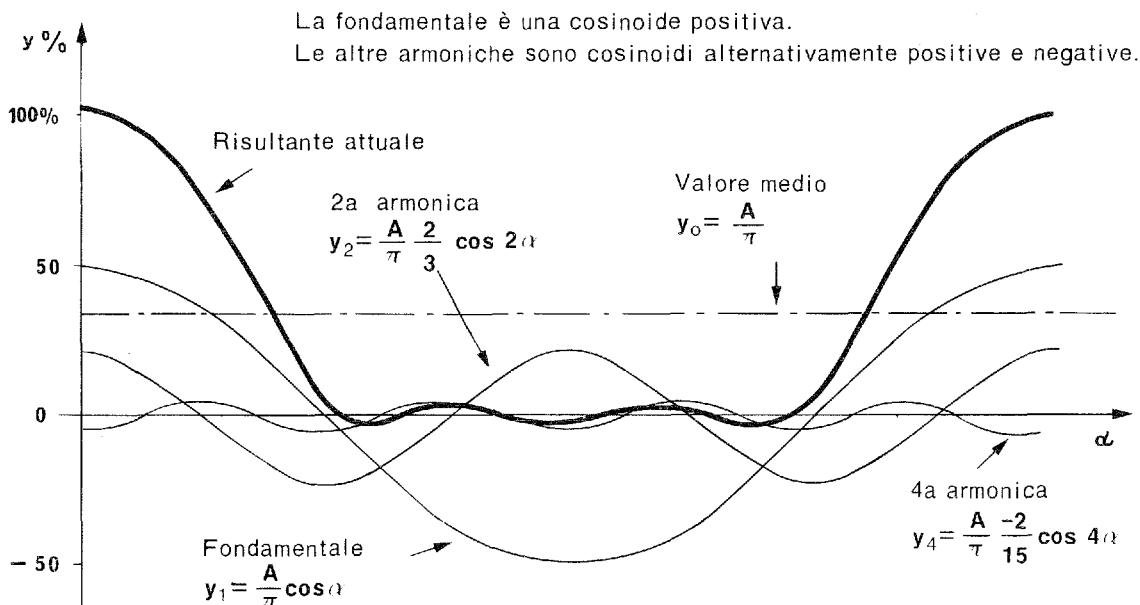
#### A) Con inizio dall'origine



Man mano che si procede a sommare ulteriori armoniche superiori, le deviazioni dalla forma d'onda finale (qui non indicata) si annullano.

#### B) Simmetrica rispetto alle ordinate

Equazione:  $y = \frac{1}{\pi} A (1 + \frac{\pi}{2} \cos \alpha + \frac{2}{3} \cos 2\alpha - \frac{2}{15} \cos 4\alpha + \frac{2}{35} \cos 6\alpha - \dots)$



Man mano che si procede a sommare ulteriori armoniche superiori, le deviazioni dalla forma d'onda finale (qui non disegnata) si annullano.

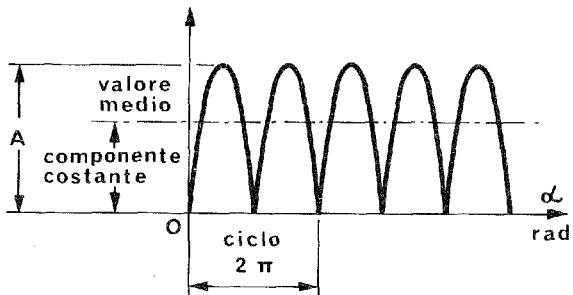
N.B. - I diagrammi sono costruiti per un ciclo della fondamentale e per A = 100.



### ANALISI ARMONICA DELL'ONDA A DOPPIA SEMISINOIDE

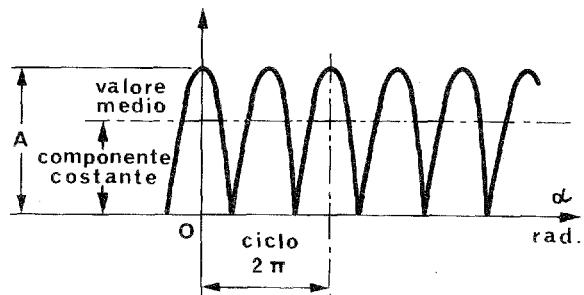
Le serie armoniche di frequenze sinusoidali che compongono la forma d'onda a doppia semisinoide sono le seguenti:

A) Con inizio dall'origine



$$y = \frac{2}{\pi} A \left( 1 - \frac{2}{3} \cos 2\alpha - \frac{2}{15} \cos 4\alpha - \frac{2}{35} \cos 6\alpha - \dots \right)$$

B) Simmetrica rispetto all'asse verticale



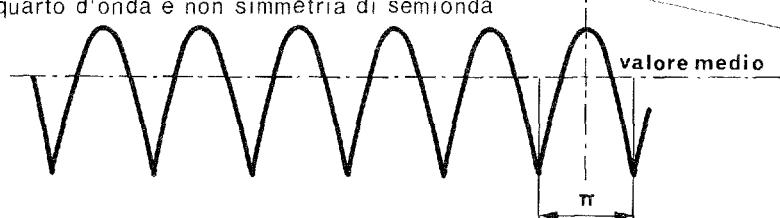
$$y = \frac{2}{\pi} A \left( 1 + \frac{2}{3} \cos 2\alpha + \frac{2}{15} \cos 4\alpha + \frac{2}{35} \cos 6\alpha + \dots \right)$$

Tabella analitica delle componenti sinusoidali

Definizione di ogni componente sinusoidale	Frequenza rispetto alla doppia semisinoide	Ampiezza (identica nei due casi)	TERMINI CORRISPONDENTI A OGNI COMPONENTE		Note
nome	simbolo		A) per inizio dall'origine (solo seni)	B) per simmetrica risp. all'asse vertic. (solo coseni)	
Valore medio	$y_0$	0	$\frac{2}{\pi}$	—	Il valore medio indica la presenza di una componente costante pari a circa il 63,6% dell'ampiezza A della doppia semisinoide.
Fondamentale	$y_1$	$2f$	$\frac{4}{3\pi}$	$-\cos 2\alpha$	$+\cos 2\alpha$
4a armonica	$y_4$	$4f$	$\frac{4}{15\pi}$	$-\cos 4\alpha$	$-\cos 4\alpha$
6a armonica	$y_6$	$6f$	$\frac{4}{35\pi}$	$-\cos 6\alpha$	$+\cos 6\alpha$

$$2n \text{ armonica } y_{2n} \quad 2nf \quad \frac{4}{(n^2-1)\pi} \quad -\cos 2n\alpha \quad (-1)^{\frac{(n+1)}{2}} \cos 2n\alpha$$

sono presenti solo armoniche di frequenza pari (vedi 10.50) questa forma possiede solo simmetria di quarto d'onda e non simmetria di semionda



Simmetria di quarto d'onda:  
 il semiperiodo è simmetrico rispetto a questo asse verticale.

Asimmetria di semionda:

la semionda inferiore, traslata di un semiperiodo non è simmetrica alla semionda superiore rispetto all'asse del valore medio, ma vi coincide.

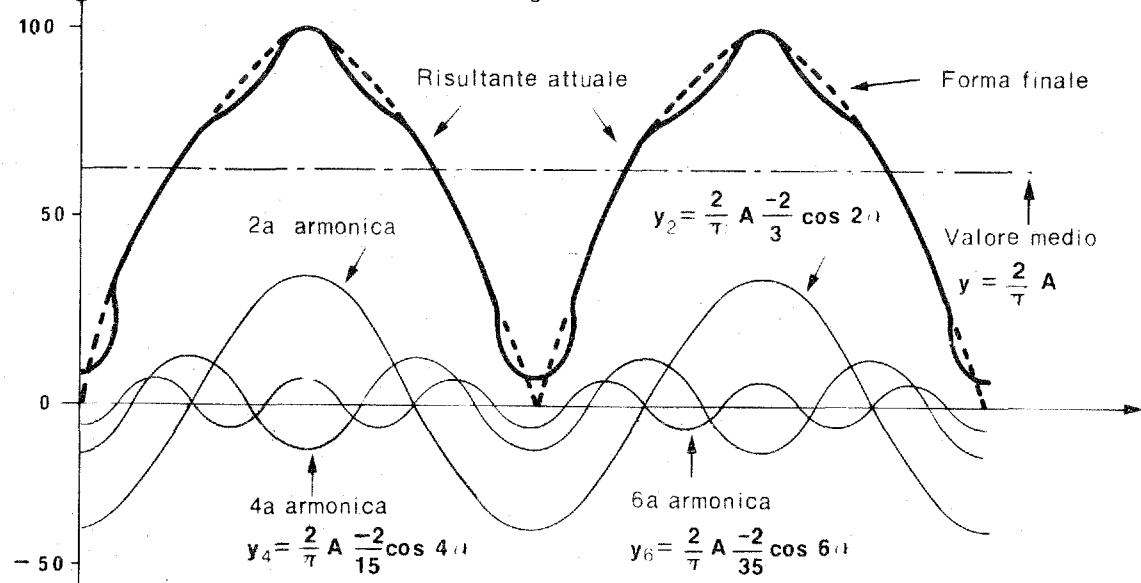


### SINTESI DELL'ONDA A DOPPIA SEMISINOIDE

#### A) Con inizio dall'origine

$$\text{Equazione: } y = \frac{2}{\pi} A \left( 1 - \frac{2}{3} \cos 2t - \frac{2}{15} \cos 4t - \frac{2}{35} \cos 6t - \dots \right)$$

Non esiste la fondamentale. La 2a armonica è una cosinoide negativa.  
Le altre armoniche sono cosinoidi negative.

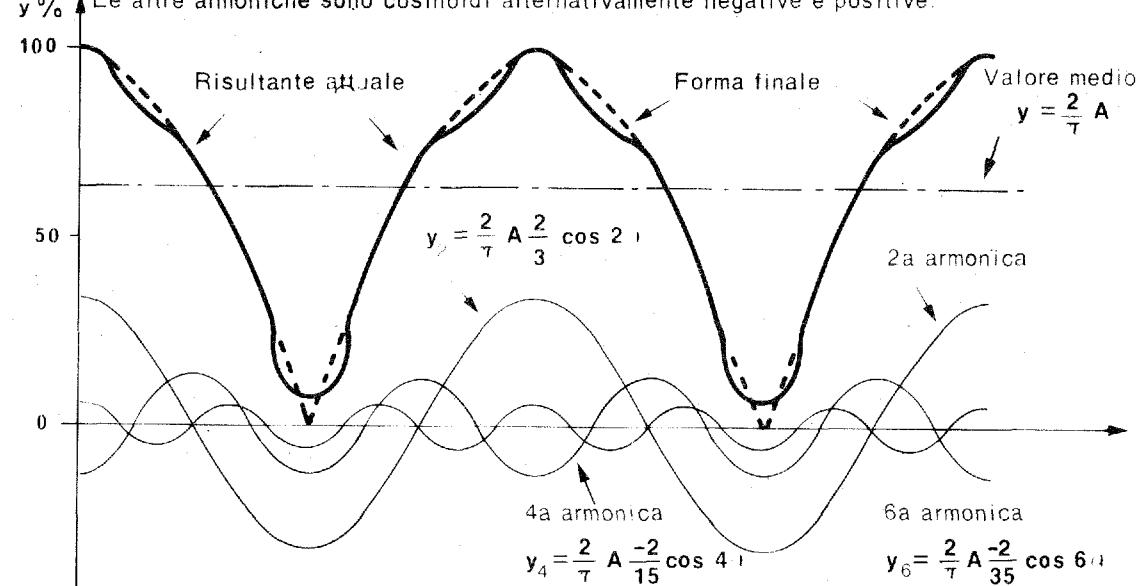


Man mano che si procede a sommare ulteriori armoniche, le deviazioni dalla forma d'onda finale si annullano.

#### B) Simmetrica rispetto all'asse verticale

$$\text{Equazione: } y = \frac{2}{\pi} A \left( 1 + \frac{2}{3} \cos 2t - \frac{2}{15} \cos 4t + \frac{2}{35} \cos 6t - \dots \right)$$

Non esiste la fondamentale. La 2a armonica è una cosinoide positiva.  
Le altre armoniche sono cosinoidi alternativamente negative e positive.



Man mano che si procede a sommare ulteriori armoniche, le deviazioni dalla forma d'onda finale si annullano.



## VALORE EFFICACE DELLE FORME D'ONDA

### Concetto di valore efficace

La determinazione del valore efficace di una grandezza alternata qualsiasi parte dalla necessità di esprimere la potenza nello stesso semplice modo usato per la corrente continua, cioè (vedi anche paragrafi 11.5 e 11.6):

$$\text{potenza in watt} \quad \begin{aligned} P &= RI^2 && \text{resistenza (in ohm)} \\ P &= GV^2 && \text{corrente (in ampere)} \\ & && \text{tensione (in volt)} \\ & && \left\{ \begin{array}{l} \text{conduttanza (in siemens)} \\ \text{espressione algebrica della forma d'onda} \\ \text{angolo del ciclo (variabile indipendente)} \\ \text{periodo dell'oscillazione (per } \omega \text{ in radianti, } T = 2\pi \text{)} \end{array} \right. \end{aligned}$$

Quando queste due grandezze sono alternate è sufficiente esprimere con quel valore in continua capace di produrre la medesima potenza sullo stesso elemento del circuito.

Il valore efficace è dunque un valore medio particolare che nella letteratura anglosassone è chiamato R.M.S. = Root Mean Square (radice della media quadratica).

### Calcolo del valore efficace

L'espressione per una grandezza alternata di qualsiasi forma è la seguente:

$$\text{valore efficace} \quad E = \sqrt{\frac{\int_0^T y^2 dt}{T}} \quad \begin{aligned} &\text{espressione algebrica della forma d'onda} \\ &\text{angolo del ciclo (variabile indipendente)} \\ &\text{periodo dell'oscillazione (per } \omega \text{ in radianti, } T = 2\pi \text{)} \end{aligned}$$

Questa è l'espressione del **valore medio del quadrato della funzione** estesa per un intero periodo della forma d'onda presa in considerazione.

### Valore efficace per la forma d'onda sinoidale

L'espressione algebrica di questa forma d'onda è  $y = A \sin \omega t$  (vedi 10.50) per cui il

$$\text{valore efficace} \quad E = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad \begin{aligned} &\text{ampiezza massima dell'oscillazione} \\ &\text{costante} = 1.41 \end{aligned}$$

### Valore efficace della somma di sinoidi

La scomposizione armonica delle forme d'onda o la loro composizione con sinoidi e cosinoidi di dato valore efficace, richiede un'importante precisazione.

Sebbene la composizione di una forma d'onda si ottiene sommando algebricamente i valori istantanei corrispondenti, la somma di due sinoidi di frequenza diversa non corrisponde alla somma dei loro valori efficaci.

L'espressione generale alla quale si giunge (non troppo facilmente) è la seguente:

$$E = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}$$

cioè: il valore efficace  $E$  di una forma d'onda qualsiasi è uguale alla radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci  $E_m$  delle singole armoniche, compreso l'eventuale valore medio  $E_0$

### Valori efficaci di alcune forme d'onda particolari

Vedi tabella alla pagina seguente.



## FATTORI DI FORMA E DI CRESTA DELLE FORME D'ONDA

### A cosa servono i fattori di forma e di cresta

Prima di decidere di effettuare una laboriosa analisi armonica di una forma d'onda, talvolta, è sufficiente conoscere quanto essa si discosta da quella che si vuole ottenere.

In questo caso è sufficiente conoscere determinate grandezze, misurabili facilmente e con semplici strumenti, con le quali ricavare dei fattori che possono individuare la forma d'onda che si vuole analizzare.

### Definizioni

Osserveremo come con i valori massimo ( $G_{max}$ ), efficace ( $G$ ) e medio ( $G_{med}$ ) delle grandezze oscillanti periodicamente, riferiti ad una sola semionda, si possono determinare i due seguenti interessanti fattori:

$$\begin{array}{ll} \text{Fattore di forma} & K_f = \frac{G}{G_{med}} \quad \begin{array}{l} \text{valore efficace di una semionda} \\ \text{--- diviso ---} \\ \text{valore medio di una semionda} \end{array} \\[10pt] \text{Fattore di cresta} & K_c = \frac{G_{max}}{G} \quad \begin{array}{l} \text{valore massimo di una semionda} \\ \text{--- diviso ---} \\ \text{valore efficace di una semionda} \end{array} \end{array}$$

### Tabella dei valori

La seguente riassume i valori per le forme d'onda più note.

Forma d'onda		Fattori		Valori per una semionda rispetto al massimo $G_{max} = 1$	
Denominazione	Figura	di forma $K_f$	di cresta $K_c$	efficace $G$	medio $G_{med}$
Rettangolare indefinita (corrente continua)		1.00	1.00	1.000	1.00
Semicerchio e Semiellisso		1.04	1.22	0.819	0.787
Sinoide, Semisinoide e Doppia semisinoide		1.11	1.41	0.707	0.637
Triangolare e Dente di sega		1.15	1.72	0.577	0.500
Cuspide sinoidale		1.31	2.08	0.480	0.366
Cuspide ellittica		1.44	3.22	0.310	0.215

### Osservazioni

Il fattore di cresta è l'inverso del valore efficace e indica quante volte il valore massimo supera il valore efficace.

Il fattore di forma indica quante volte il valore efficace supera il valore medio.

## TABELLA RIASSUNTIVA DELLE ARMONICHE PER LE PRINCIPALI FORME D'ONDA

Si sono calcolate per ogni forma d'onda le ampiezze delle sue armoniche fino ad un valore apprezzabile.

Preso come 100 il valore dell'ampiezza della forma d'onda in esame, i valori delle armoniche sono espressi come percentuale fino ad un valore non inferiore al 3%.

**Valori percentuali dell'ampiezza delle armoniche rispetto all'ampiezza della forma d'onda originale**

Nome →	quadrata	triangolare	dente di sega	semi sineside	doppia semi sineside
Forma →					
Amp. originar.	100.-	100.-	100.-	100.-	100.-
Valore medio	-	-	-	31.8	63.6
1	127.8	81.0	63.6	50.0	-
2	31.8	21.2	21.2	42.4	
3	42.3	9.0	21.2		
4		15.9	4.2	8.5	
5	25.4	3.2	12.7		
6			10.6		3.6
7	18.0	-----	9.1		
8			7.9		
9	14.1		7.0		
10			6.3		
11	11.6		5.8		
12			5.3		
13	9.8		4.9		
14			4.5		
15	8.3		4.2		
16			4.0		
17	7.4		3.7		
18			3.5		
19	6.7		3.3		
20			3.2		
21	6.0		3.0		
22			-----		
23	5.0				
24					
25	4.6				

Le forme più ricche di armoniche sono:

**rettangolare**

**dente di sega** che ha tutte le frequenze con ampiezze sostenute

che ha solo le frequenze dispari ma con ampiezze ancor più sostenute

Per questo motivo le forme d'onda rettangolare ed a dente di sega sono molto utili per analizzare il comportamento dei circuiti alle varie frequenze.

Infatti, inserire in un circuito un'onda rettangolare o a dente di sega, significa inserire contemporaneamente tutte le frequenze che ciascuna di queste due forme d'onda possiede.

Se il circuito non crea distorsioni, esse si devono ritrovare tutte all'uscita nelle stesse proporzioni.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice      Pagina  
10.59      2

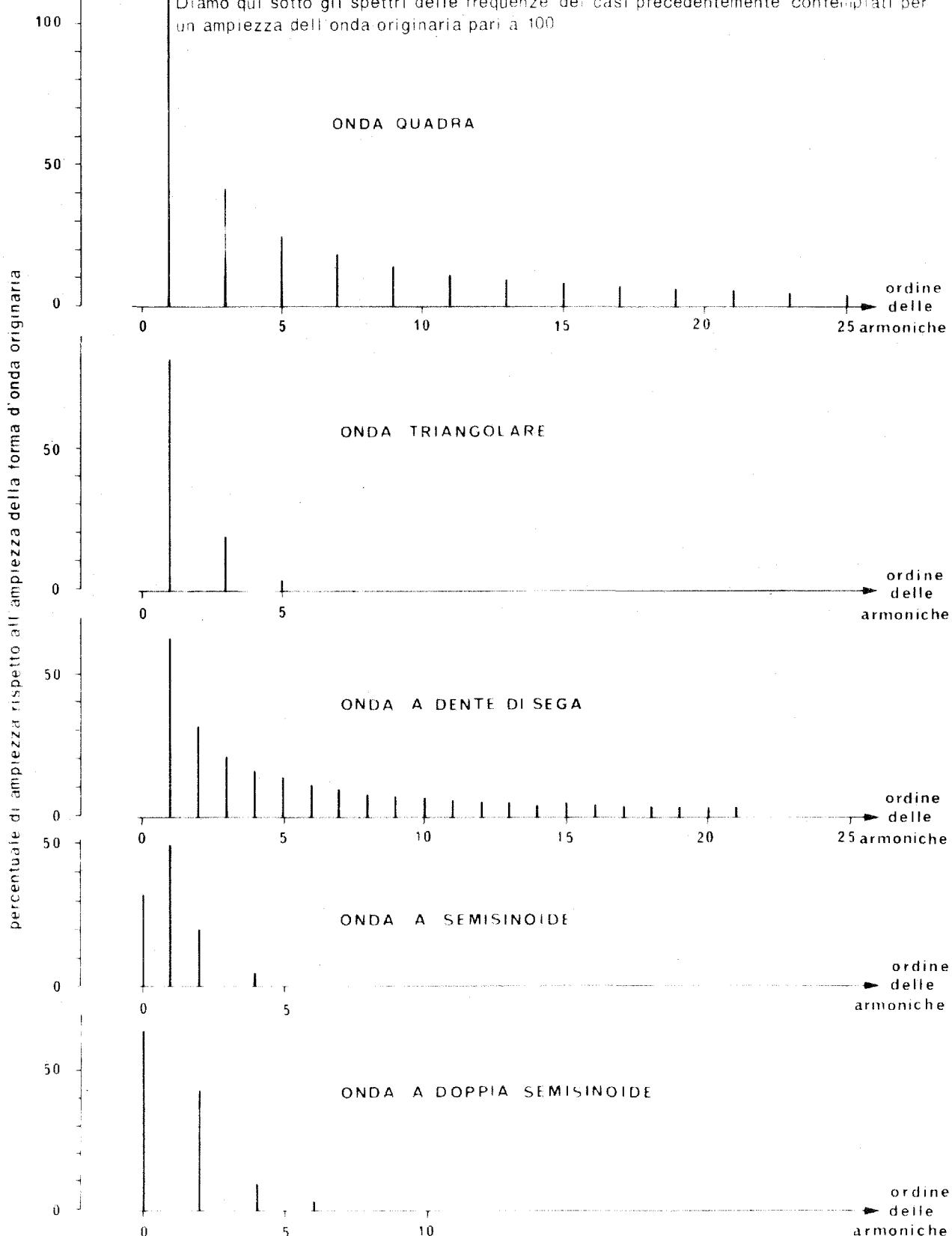
Sezione : 1      Grandezze fondamentali  
Capitolo : 10      Nozioni preliminari  
Paragrafo : 10.5      Teorema di Fourier  
Argomento : 10.59      Esame comparativo delle forme d'onda

**SPETTRI DELLE FREQUENZE PER LE PRINCIPALI FORME D'ONDA**

Si chiamano spettri delle frequenze quei particolari diagrammi che riportano:

- sulle ascisse i valori delle frequenze delle armoniche
- sulle ordinate i valori delle ampiezze per ogni corrispondente armonica.

Diamo qui sotto gli spettri delle frequenze dei casi precedentemente contemplati per un'ampiezza dell'onda originaria pari a 100



Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza  
Paragrafo : 11.0 Indice del capitolo  
Argomento : 11.00 Indice del paragrafo

APPUNTI  
DI ELETTRONICA  
Codice Pagina  
11.00 1

## Capitolo 11

# TENSIONE CORRENTE RESISTENZA

### Indice dei paragrafi e degli argomenti

#### par. 11.1 — Concetti generali

- arg. 11.10 — Indice delle pagine
- arg. 11.11 — Premesse
- arg. 11.12 — Principi fondamentali
- arg. 11.13 — Generatore di forza elettromotrice

#### par. 11.2 — Tensione costante e corrente continua

- arg. 11.20 — Indice delle pagine
- arg. 11.21 — Espressioni del livello energetico
- arg. 11.22 — Espressioni della corrente elettrica

#### par. 11.3 — Tensione variabile unidirezionale

- arg. 11.30 — Indice delle pagine
- arg. 11.31 — Composizione di due valori
- arg. 11.32 — Modulazione di corrente continua
- arg. 11.33 — Risultante da modulazione di corrente continua

#### par. 11.4 — Corrente variabile unidirezionale

- arg. 11.40 — Indice delle pagine
- arg. 11.41 — Composizione di due valori
- arg. 11.42 — Modulazione di corrente continua

#### par. 11.5 — Tensione alternata

- arg. 11.50 — Indice delle pagine
- arg. 11.51 — Concetti generali
- arg. 11.52 — Valori caratteristici

#### pag. 11.6 — Corrente alternata

- arg. 11.60 — Indice delle pagine
- arg. 11.61 — Concetti generali
- arg. 11.62 — Valori caratteristici

#### par. 11.7 — Resistenza a statica e resistenza differenziale

- arg. 11.70 — Indice delle pagine
- arg. 11.71 — Panoramica generale
- arg. 11.72 — Caratteristica della resistenza perfetta
- arg. 11.73 — Caratteristica di una resistenza non lineare
- arg. 11.74 — Elementi a caratteristica non lineare — Evi

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza  
Paragrafo : 11.1 Concetti generali  
Argomento : 11.10 Indice del paragrafo

APPUNTI  
DI ELETTRONICA  
Codice Pagina  
11.10 1

## Paragrafo 11.1

# CONCETTI GENERALI

### Indice degli argomenti e delle pagine

#### arg. 11.11 — Premesse

- pag. 1 — Tensione e corrente
  - Rapporti statici
  - Rapporti dinamici
- pag. 2 — Mettiamoci d'accordo sugli aggettivi

#### arg. 11.12 — Principi fondamentali

- pag. 1 — Forza elettromotrice e tensione
- pag. 2 — Generatore di tensione, generatore di corrente

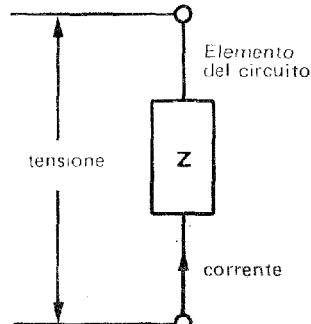
#### arg. 11.13 — Generatore di forza elettromotrice

- pag. 1 — Diagramma generale di funzionamento di un generatore di f.e.m.
- pag. 2 — Caratteristica di lavoro di un generatore di f.e.m.

### TENSIONE E CORRENTE

In questo capitolo 11 vogliamo mettere in evidenza i concetti di tensione e di corrente, che i principianti spesso confondono.

Chiariti questi concetti, ci soffermiamo su due grandezze fra loro reciproche, che derivano dal rapporto che quelle due grandezze fondamentali stabiliscono fra di loro quando si trovano ad operare su un elemento del circuito.



### RAPPORTI STATICI

Abbiamo già visto in 10.21, quando consideravamo la Legge di Ohm, che esiste una reciprocità di rapporti e abbiamo chiamato

$$\text{resistenza } R = \frac{\text{il valore della tensione (in volt)}}{\text{il valore della corrente (in ampere)}} \text{ diviso}$$

$$\text{conduttanza } G = \frac{\text{il valore della corrente (in ampere)}}{\text{il valore della tensione (in volt)}} \text{ diviso}$$

Da questa definizione deriva che  $G = \frac{1}{R}$  e  $R = \frac{1}{G}$  per cui spesso si usa parlare indifferentemente dell'una (la resistenza) o dell'altra (la conduttanza). Più spesso si usa parlare unicamente di resistenza causando dei traumi ai principianti quando devono passare dal calcolo di un circuito parallelo a quello di un circuito serie e viceversa.

### RAPPORTI DINAMICI

A complicare le idee al principiante interviene il concetto di resistenza differenziale, e quindi di conduttanza differenziale, che nel campo dell'elettronica sono di fondamentale importanza.

Conviene fin d'ora ricordare che l'elettronica è principalmente orientata nelle applicazioni delle variazioni di valori di tensione e di corrente intorno ad un valore medio di queste.

Nella maggioranza dei casi, e spesso di proposito, il comportamento fra tensione e corrente in un elemento del circuito non si mantiene ugualmente proporzionale per qualsiasi valore di esse.

E' sufficiente per le applicazioni pratiche che certi elementi del circuito (i transistor, ad esempio) vengano costruiti in modo da mantenere costante entro un ampio intervallo di valori il rapporto fra le variazioni di tensione e le corrispondenti variazioni di corrente.

E' questo il concetto di resistenza differenziale o dinamica, sul quale non ci stancheremo di parlare ogni volta che lo riterremo opportuno.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 1 Pagina

11.11 2

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	11	Tensione Corrente Resistenza
Paragrafo	:	11.1	Concetti generali
Argomento	:	11.11	Premesse

**Mettiamoci d'accordo sugli aggettivi**

Nel corso della trattazione spesso incontreremo gli aggettivi sottoelencati sui quali vogliamo dare delle definizioni per la corretta applicazione anche se spesso l'autore nella fretta qualche volta si è lasciato trasportare dalle abitudini del gergo.

Ecco gli aggettivi affiancati da brevi commenti:

- continua : trattasi di corrente che scorre in un solo senso senza cambiare di valore.  
Da applicarsi più alla corrente che alla tensione.  
Si parla infatti di "corrente continua" anche quando si tratta di fenomeni non legati alla corrente ed in questo caso si dovrebbe parlare più di "energia" che di corrente.  
Paradossalmente si dice comunemente: una tensione in corrente continua.!
- costante : trattasi di tensione che mantiene inalterato il suo valore nel tempo.  
Da riferirsi più alla tensione che alla corrente.  
Di regola una batteria è un generatore di tensione costante, ma il gergo ci fa dire: un generatore di corrente continua.
- unidirezionale : è indicato per correnti e tensioni variabili, mantenendo la medesima polarità.  
Per questo motivo una variabile unidirezionale è sempre polarizzata (v. sotto).
- alternata : è usato per indicare variabili dove l'inversione di polarità avviene più o meno regolarmente mantenendo un valore medio uguale a zero. Queste possono essere:  
Aperiodica quando non rispondono a leggi periodiche ben definite  
Sinoidale Quadra Rettangolare Triangolare ecc. (v. 10.43) quando le alternative periodiche presentano forme ben definite e caratterizzate dall'aggettivo appropriato
- polarizzata : si dice per una corrente o una tensione alternata che presentino un valore medio diverso da zero (positivo o negativo).  
In questo caso può verificarsi l'inversione di polarità qualora valori istantanei di polarità opposte a quella del valore medio superino il valore medio stesso.

Tensioni e correnti alternate o comunque variabili nel tempo sono quelle che maggiormente vengono sfruttate nella tecnica elettronica.

La tensione costante, salvo qualche rara eccezione, viene usata esclusivamente per l'alimentazione delle apparecchiature a correnti deboli.

La corrente continua, intesa come corrente, non come energia, e la tensione alternata hanno rare applicazioni nella tecnica delle correnti deboli e sono largamente usate quale servomezzo nell'elettronica industriale.

Per la lettura di questa pagina si ritengono noti i concetti espressi in 10.43.

### FORZA ELETTROMOTRICE E TENSIONE

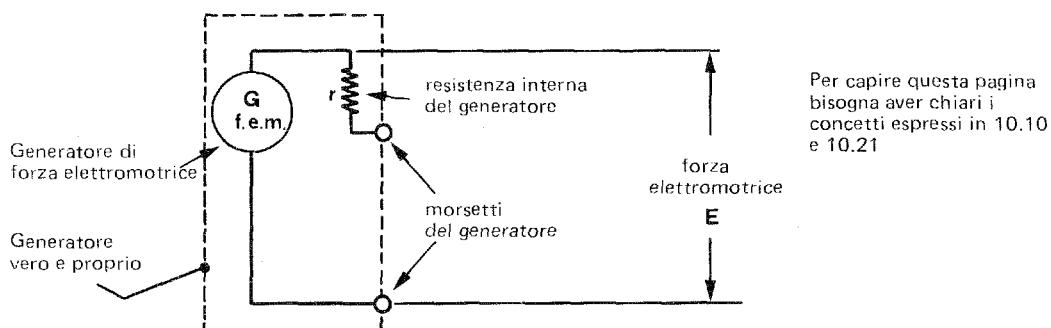
I cosiddetti "Generatori di tensione" sono in realtà

#### Generatori di Forza Elettromotrice

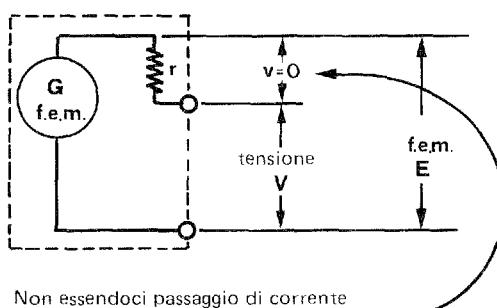
Tensione e Forza elettromotrice sono grandezze della stessa natura (si misurano infatti in volt), ma bisogna distinguerle.

Questa necessità di distinzione è dovuta al fatto che i generatori di forza elettromotrice posseggono una resistenza interna, che modifica molto le cose, soprattutto in elettronica.

Stando al nostro metodo rappresentativo, disegniamo il generatore così:



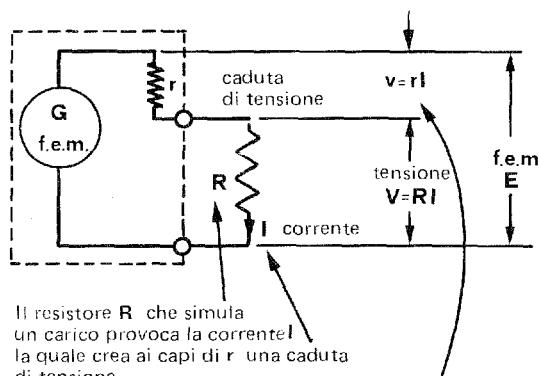
#### GENERATORE A VUOTO (a circuito aperto o senza carico)



Perciò la tensione  $V$  è uguale alla f.e.m.  $E$   
cioè

$$V = E$$

#### GENERATORE SOTTO CARICO



Perciò la tensione  $V$ , rispetto ad  $E$  diminuisce di questa c.d.t., cioè

$$V = E - v$$

In altre parole:

si forma un partitore di tensione che abbassa tanto maggiormente la tensione  $V$  quanto più forte è la corrente  $I$  (e ciò avviene quando  $R$  diminuisce) ed essendo costante la f.e.m. impressa, resterà inalterata la somma

$$v + V = E$$

#### ATTENZIONE

Forza Elettromotrice e Tensione non sono sinonimi, ma sono due entità ben distinte da non confondere!

## GENERATORE DI TENSIONE E GENERATORE DI CORRENTE

All'origine dei fenomeni elettrici si immagina sempre una tensione, così come all'origine dei fenomeni idraulici si immagina sempre un dislivello.

E' più facile immaginare una tensione che genera una corrente che non una corrente che genera una tensione.

Una volta assimilato il principio di reciprocità, non dovrebbero esserci più dubbi, che si possa creare una tensione sfruttando una corrente che, attraversando una resistenza, alza il potenziale di un suo terminale rispetto all'altro.

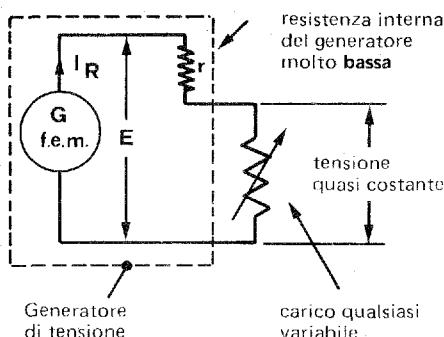
Ora vediamo un altro importante concetto della reciprocità.

### GENERATORE DI TENSIONE

E' facile immaginare un generatore di tensione.

Da un generatore di tensione noi chiediamo una tensione costante (nei limiti del possibile) in qualsiasi condizione di carico.

Per arrivare a questo occorre una



Con una resistenza interna molto bassa si hanno modeste cadute di tensione al variare del carico e quindi la tensione di uscita resta sensibilmente costante.

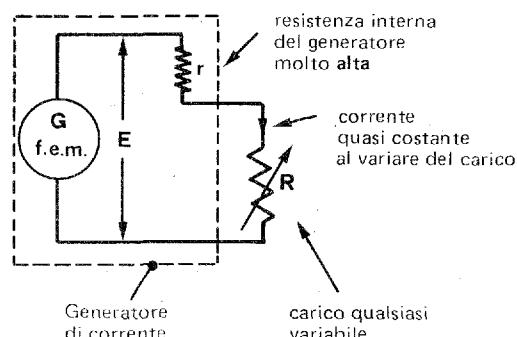
Il principio di reciprocità è espresso anche in 10.21 dove si nota che una tensione  $V$  genera una corrente  $I = \frac{V}{R}$  e che una corrente  $I$  genera una tensione  $V = RI$ .

### GENERATORE DI CORRENTE

Non è facile immaginare un generatore di corrente.

Da un generatore di corrente noi chiediamo una corrente costante (nei limiti del possibile) in qualsiasi condizione di carico.

Per arrivare a questo occorre una



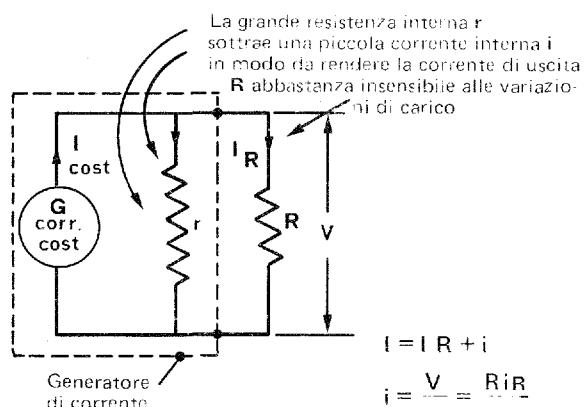
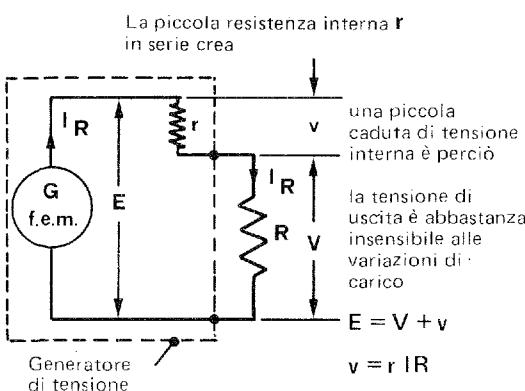
Con una resistenza interna molto alta si hanno modeste variazioni di corrente al variare del carico e quindi la corrente di uscita resta sensibilmente costante.

Per compensare la forte caduta di tensione è necessario generare un'alta forza elettromotrice.

Per completare il concetto di reciprocità si usa immaginare un effettivo

### GENERATORE DI CORRENTE COSTANTE

con la sua alta resistenza interna in parallelo





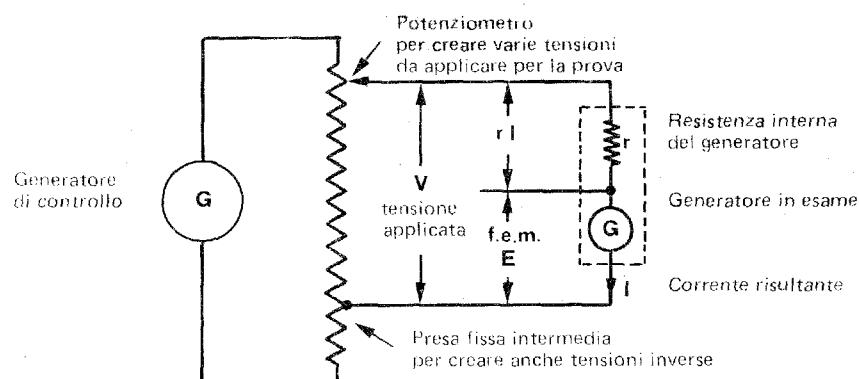
## DIAGRAMMA GENERALE DI FUNZIONAMENTO DI UN GENERATORE DI F.E.M.

Per studiare il comportamento di un generatore di forza elettromotrice si sottopone il generatore in esame a varie tensioni provenienti da un altro generatore.

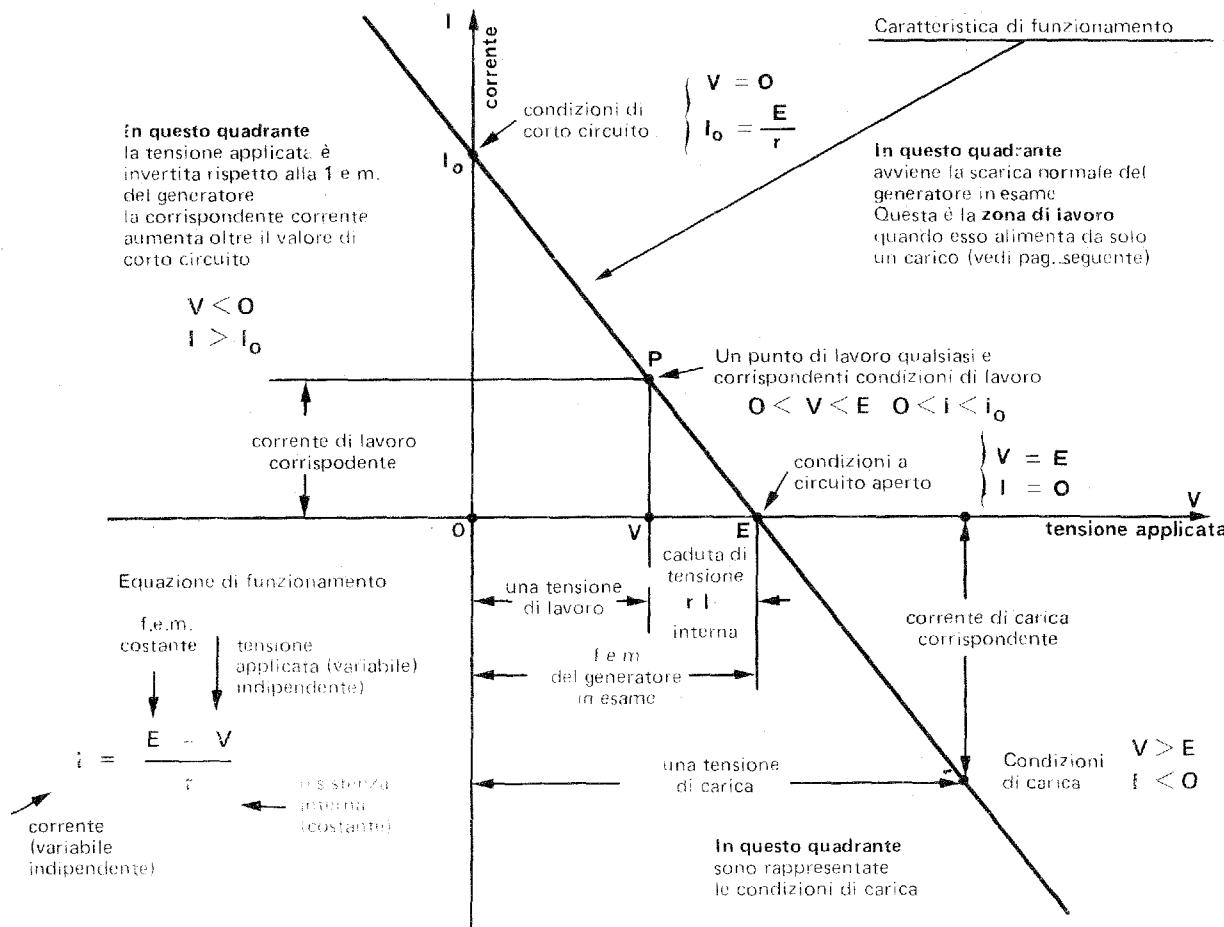
Si fanno variare queste tensioni in modo che esse si presentino ora positive ora negative; ora maggiori, ora minori della f.e.m. del generatore in esame.

Si annotano i vari valori della tensione applicata ed i corrispondenti valori di corrente.  
 Con le coppie di valori (tensione e corrente) si costruisce un diagramma che commenteremo;

## SCHEMA DEL CIRCUITO



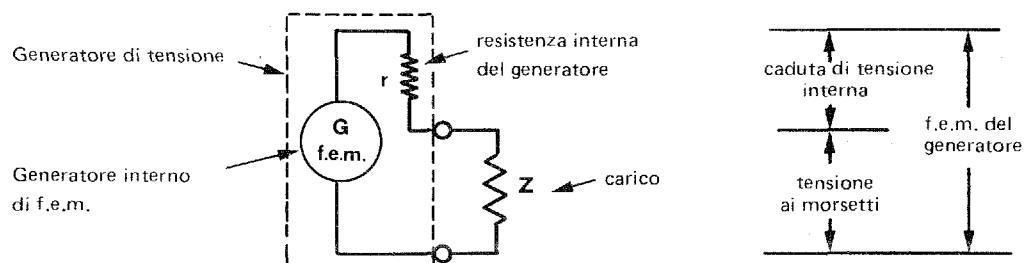
## DIAGRAMMA DI FUNZIONAMENTO



### CARATTERISTICA DI LAVORO DI UN GENERATORE DI F.E.M.

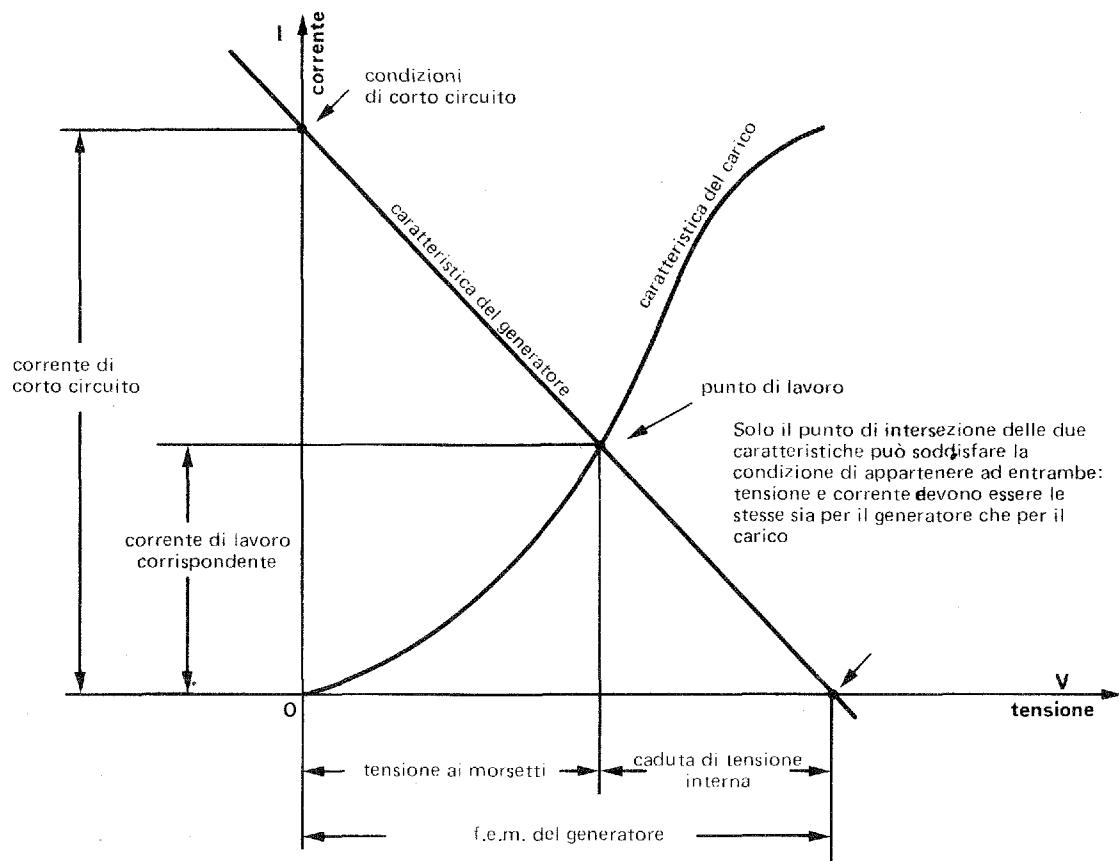
Combinando sullo stesso diagramma la caratteristica del generatore e quella del carico si possono ricavare concetti molto interessanti.

**SCHEMA DEL CIRCUITO**



### D'AGRAMMA DI LAVORO

- Del diagramma illustrato nella pagina precedente si esamina solo il quadrante riguardante la **zona di lavoro**



**Commento** - La tensione di lavoro per un dato generatore dipende dal carico

Se si vuole che essa vari poco al variare del carico, occorre munirsi di un generatore che abbia una resistenza interna molto bassa, cioè

- cioè ancora {
- una corrente di corto circuito molto alta.
  - una caratteristica del generatore molto piatta (quasi orizzontale)

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	11	Tensione Corrente Resistenza
Paragrafo	:	11.2	Tensione costante e corrente continua
Argomento	:	11.20	Indice del paragrafo

## Paragrafo 11.2

# TENSIONE COSTANTE E CORRENTE CONTINUA

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 11.21 — Espressioni del livello energetico

- pag. 1 — Potenziale
  - Modifica dei potenziali
  - Distinzioni
- " 2 — Concetto di caduta di tensione
  - Paragoni idraulici

arg. 11.22 — Espressioni della corrente elettrica

- pag. 1 — Quantità di elettricità — Unità di misura
  - Corrente elettrica — Unità di misura
  - Corrente non significa velocità delle cariche
- " 2 — Paragoni fra corrente d'acqua e corrente elettrica

## POTENZIALE

E' il livello energetico a cui una determinata **quantità di elettricità** si trova rispetto ad altre per varie cause:

- sfregamento elettrostatico, atmosferico, ecc.
- azione elettromeccanica (macchine elettriche)
- azione elettrochimica (batterie, ecc.)

Il potenziale può essere paragonato al livello a cui una **quantità di acqua** si trova rispetto ad altre per varie cause:

- evaporazione solare e ricondensazione in quota
- innalzamento con macchine idrauliche (pompe)

## MODIFICA DEI POTENZIALI

I livelli energetici delle cariche (quantità di elettricità) possono essere modificati per sfruttare le proprietà in vari modi:

a) — Mediante trasformazioni di altra energia non elettrica, come già detto.

- chimicamente (batterie, accumulatori, ecc.)
- elettromeccanicamente (macchine elettriche)

b) — Mediante il controllo della corrente elettrica,

- elettricamente ed electronicamente  
(elementi passivi percorsi da corrente)
- elettromagneticamente (trasformatori)

Il sistema elettronico di controllo di una corrente elettrica è molto usato in elettronica e sul retro è dato un paragone idraulico.

In altre parole: inserire un resistore e in un circuito attraversato da corrente è un sistema molto comodo e semplice per provocare una differenza di potenziale.

$$V = R \cdot I$$



Così come è molto semplice provocare un dislivello in un fiume inserendovi un ostacolo (sbarramento).

## DISTINZIONI

Vediamo di distinguere questi quattro termini che sembrano sinonimi.

**Potenziale:** (già detto) il livello energetico di una carica rispetto a un riferimento.

**Differenza di potenziale:** due punti appartenenti allo stesso circuito posseggono fra di loro una differenza di potenziale rispetto a un riferimento comune (come la differenza di altezza di due montagne calcolata riferendo ciascuna al livello del mare).

**Tensione:** è generalmente la differenza di potenziale provocata ai capi di un resistore in un circuito percorsa da corrente.

**Caduta di tensione:** è la perdita di potenziale creata da un resistore in un circuito percorso da corrente.

Spesso nel gergo si confondono l'uno con l'altro senza commettere gravi errori.

## UNITÀ DI MISURA

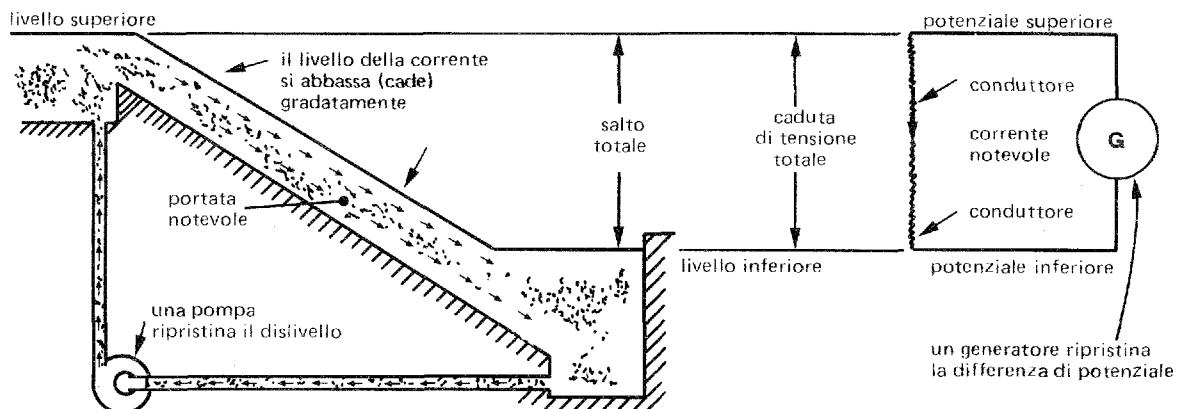
L'unità di misura di queste grandezze è il **volt** e corrisponde all'energia potenziale di un joule della carica di un coulomb.

### CONCETTO DI CADUTA DI TENSIONE — PARAGONI IDRAULICI

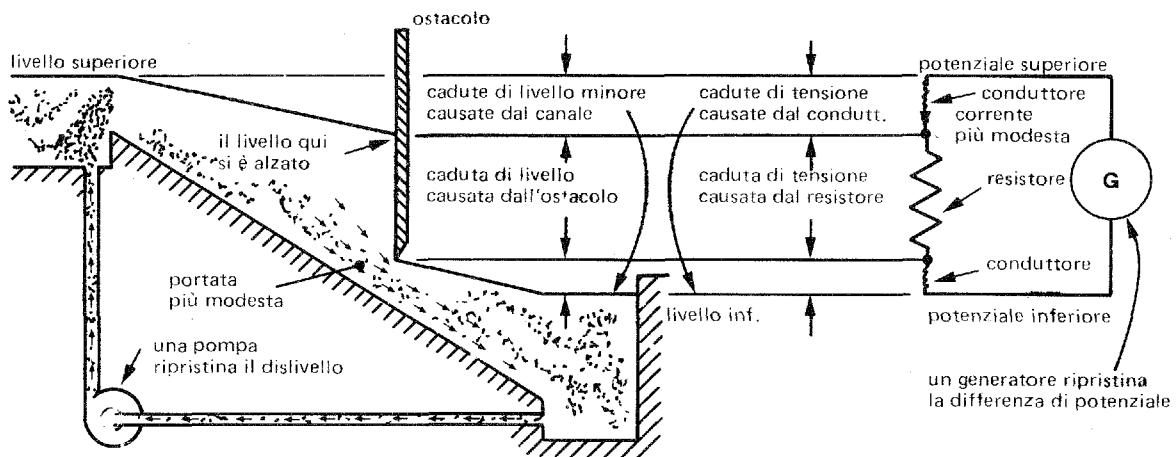
La corrente idraulica scorre dal livello superiore all'inferiore. La distribuzione dei livelli superficiali e il valore della portata dipendono dalla natura del canale e dalla presenza di ostacoli.

La corrente elettrica scorre dal potenziale superiore all'inferiore. La distribuzione dei potenziali e il valore della corrente dipendono dalla natura del conduttore e dalla presenza di resistori.

#### CANALE LIBERO SENZA OSTACOLI

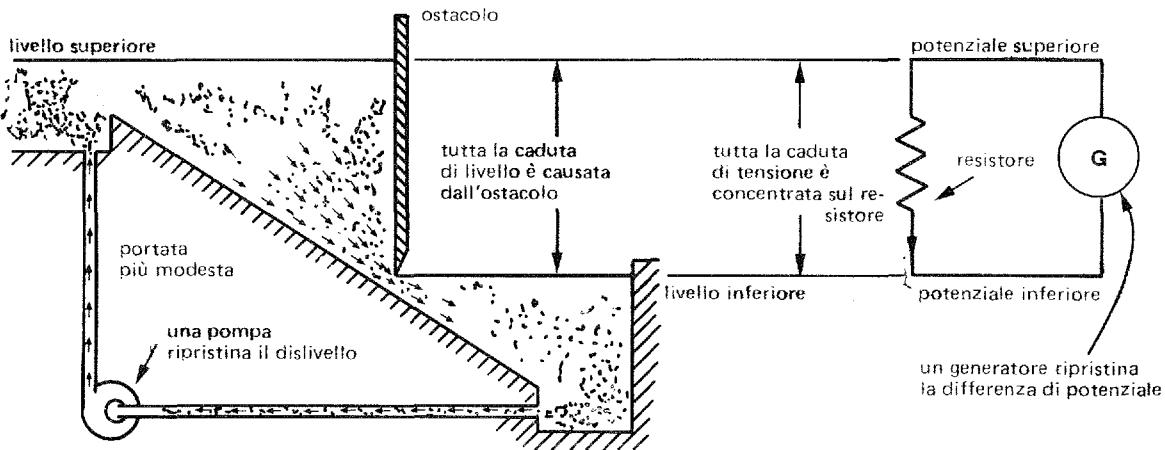


#### CANALE CON OSTACOLO



#### SEMPLIFICAZIONI

##### CANALE MOLTO LISCIO che non crea cadute di livello



**Sezione** : 1 Grandezze fondamentali  
**Capitolo** : 11 Tensione Corrente Resistenza  
**Paragrafo** : 11.2 Tensione costante e Corrente continua  
**Argomento** : 11.22 Espressioni della corrente elettrica

**QUANTITA' DI ELETTRICITA' -- UNITA' DI MISURA**

Fin dalla sua scoperta l'elettricità è stata immaginata come un fluido e la corrente elettrica come questo fluido in movimento.

Come per i fluidi si era preso il chilogrammo (o il litro) per stabilire una quantità di materia, così per l'elettricità si è considerato il

**COULOMB** (simbolo C)

come quantità di elettricità (simbolo Q), v. 10.11-2.

**CORRENTE ELETTRICA -- UNITA' DI MISURA**

Una corrente elettrica (simbolo I), dunque consiste nel passaggio di una certa quantità di elettricità attraverso un conduttore nell'intervallo di tempo di un minuto secondo e si scrive:

$\frac{\text{coulomb}}{\text{secondo}}$  (simbolo C/sec)

Questa grandezza si chiama

**AMPERE** (simbolo A)

**CORRENTE NON SIGNIFICA VELOCITA' DELLE CARICHE**

Non si deve confondere la corrente con la velocità delle cariche elettriche così come non si confonde la portata di un corso d'acqua in kg/sec. (o litri/sec) con la velocità del liquido stesso (in metri/sec).

Una stessa portata in un corso d'acqua si può ottenere mediante:

- un canale largo e poco pendente (velocità bassa)
- un canale stretto e molto pendente (velocità alta)

Elettricamente è la stessa cosa.

Una stessa corrente elettrica in un resistore si può ottenere mediante:

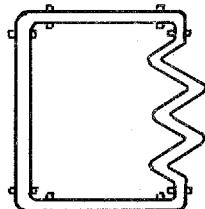
- un resistore di grande sezione con applicata una bassa tensione (cariche lente)
- un resistore di piccola sezione con applicata un'alta tensione (cariche veloci)

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

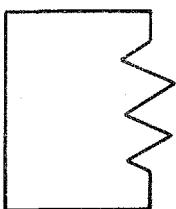
Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
11.22	2	Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza
		Paragrafo : 11.2 Tensione costante e Corrente continua
		Argomento : 11.22 Espressioni della corrente elettrica

### PARAGONI FRA CORRENTE D'ACQUA E CORRENTE ELETTRICA

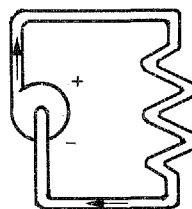
La presenza di elettroni in un conduttore può essere paragonata alla presenza di acqua in una tubazione



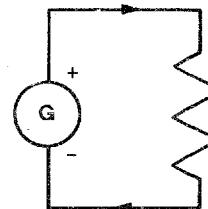
In questa tubazione c'è acqua ferma



In questo circuito non circolano elettroni



Per mettere in moto l'acqua bisogna inserire una pompa (generatore di pressione)



Per far circolare gli elettroni bisogna inserire un generatore di tensione

Se la differenza di pressione fra ingresso e uscita della pompa è costante, in questa tubazione l'acqua circola a portata costante (cioè i kg/sec oppure i litri/sec sono uguali in tutti i punti)

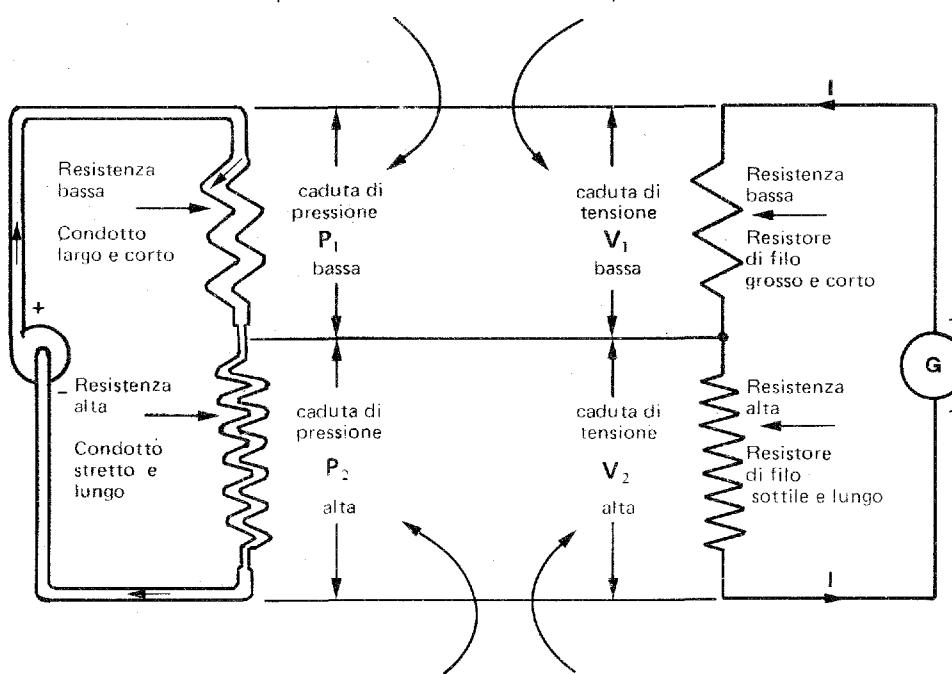
Per via delle differenti dimensioni dei condotti si avranno differenti velocità e perciò anche differenti cadute di pressione.

Se la differenza di potenziale ai capi del generatore è costante, in questo circuito circola la stessa corrente (cioè i coulomb/sec = ampere sono uguali in tutti i punti).

Per via delle diverse resistenze inserite, si avranno differenti velocità e perciò anche differenti cadute di tensione.

Infatti in questo tratto la velocità dell'acqua sarà bassa e la caduta di pressione sarà pure bassa

Infatti in questo tratto la velocità degli elettroni sarà bassa e la caduta di tensione sarà pure bassa



In questo tratto invece la velocità sarà alta e la caduta di pressione pure alta

In questo tratto invece la velocità sarà alta e la caduta di tensione pure alta

## Paragrafo 11.3

# TENSIONE VARIABILE UNIDIREZIONALE

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 11.31 — Principi fondamentali

- pag. 1 — Applicazioni e verifica di tensioni variabili unidirezionali  
" 2 — Partitore di tensione e potenziometro

arg. 11.32 — Composizione di due valori

- pag. 1 — Tensione risultante dalla composizione di alternata e continua  
" 2 — Diagrammi dimostrativi sulla composizione

arg. 11.33 — Risultante da modulazione di corrente continua

- pag. 1 — Tensione variabile unidirezionale risultante da modulazione  
" 2 — Diagramma illustrativo sulla modulazione di corrente continua

### APPLICAZIONI E VERIFICA DI TENSIONI VARIABILI UNIDIREZIONALI

E' un caso frequente in elettronica.

Una tensione che vari continuamente di valore senza cambiare di polarità, si dice variabile unidirezionale.

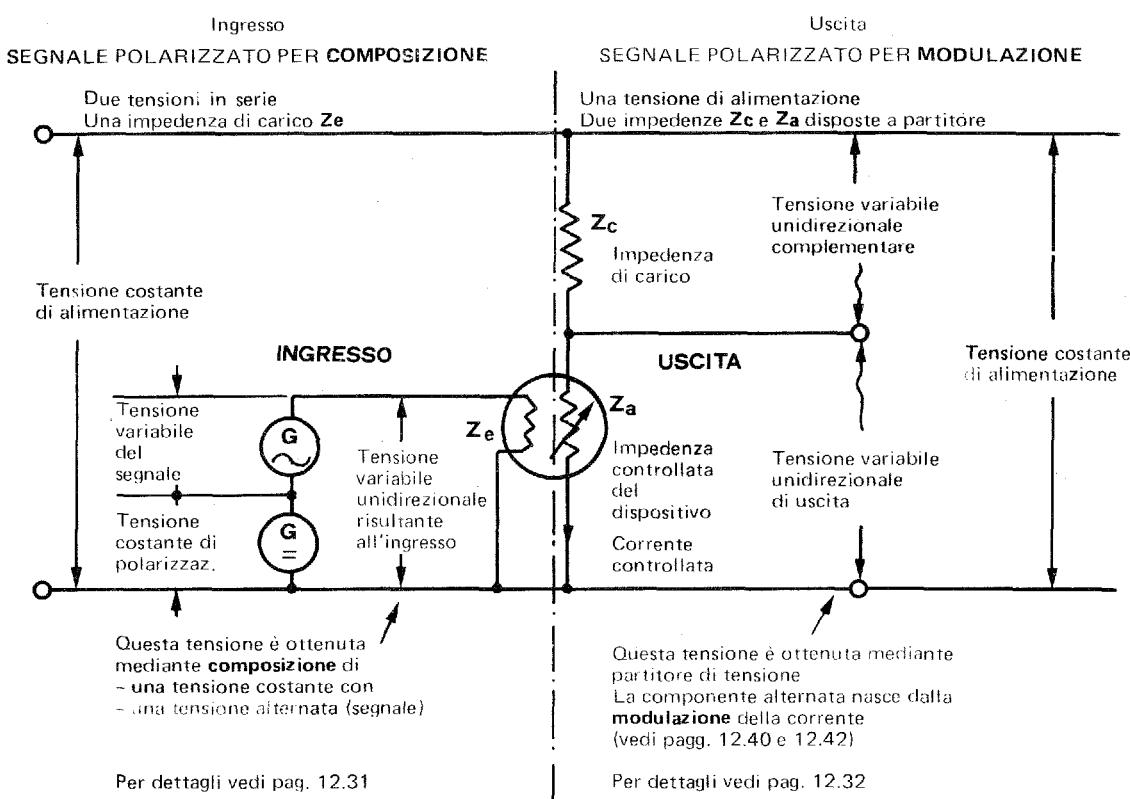
Essa può essere sempre considerata in continua o più una tensione alternata.

Per questo fatto viene chiamata anche tensione alternata polarizzata o segnale polarizzato.

A titolo di esempio, i quadripoli ad impedenza controllata (amplificatori ed altri) hanno:

- all'ingresso un segnale polarizzato per **composizione** cioè le due componenti vengono sommate di proposito:
  - la componente continua per far funzionare il dispositivo nel modo desiderato
  - la componente alternata per inserire nel dispositivo il segnale da manipolare
- all'uscita un segnale manipolato e polarizzato per **modulazione** di una corrente continua, cioè le due componenti si trovano sovrapposte inevitabilmente:
  - la componente continua come conseguenza del funzionamento prescelto del dispositivo
  - la componente alternata come risultato della manipolazione del segnale

I due casi si comprendono in questo schema.



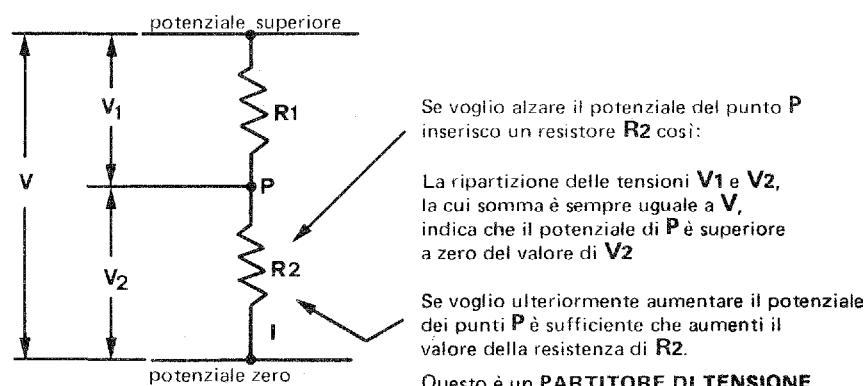
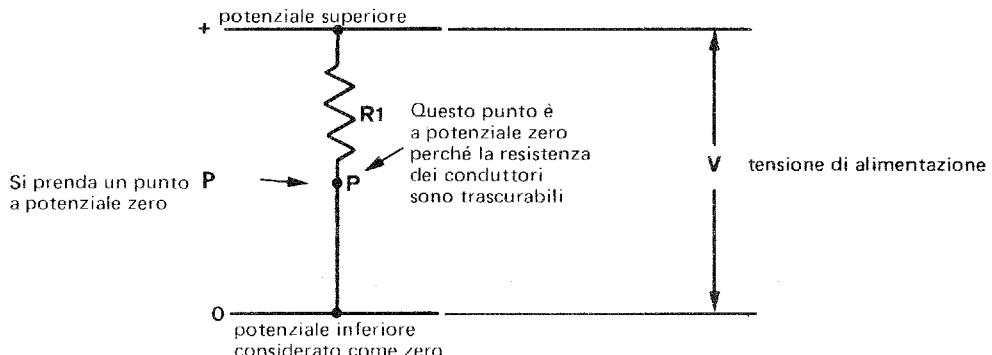
Il dispositivo è sempre assolutamente passivo perché alimentato dalla tensione costante di alimentazione.

Quando però modula la corrente che lo attraversa è come se fosse lui stesso a generare la componente alternata di uscita.

N.B. — Questo concetto è molto importante e ricorre spesso in elettronica.

### PARTITORE DI TENSIONE E POTENZIOMETRO

Insistiamo in questo concetto che è fondamentale nei circuiti elettronici.



Questo è un **PARTITORE DI TENSIONE**

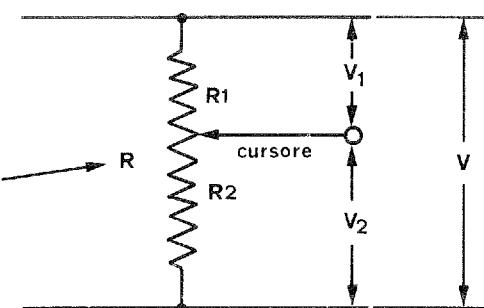
#### ATTENZIONE PERO':

- 1) Man mano che aumenta  $R_2$  la corrente  $I$  diminuisce
- 2) Il potenziale  $P$  (rispetto a zero) non potrà mai superare il potenziale superiore  $V$
- 3) Al limite il potenziale di  $P$  potrà essere molto vicino al potenziale  $V$  solo quando  $R_2$  sia molto maggiore di  $R_1$  ( $R_2 \gg R_1$ )
- 4) In questo caso però la corrente  $I$  diventa piccolissima (infinitesima)
- 5) Per evitare questo si può diminuire  $R_1$  man mano che aumenta  $R_2$  affinché la resistenza totale  $R_1 + R_2$  resti costante
- 6) Abbiamo scoperto il **POTENZIOMETRO**

Infatti esso è costituito da un unico resistore  $R$  provvisto di un cursore che striscia sulla sua superficie, dividendo così la resistenza  $R$  del resistore in due

$R_1$  ed  $R_2$

$$R = R_1 + R_2$$



Dettagli, forme e strutture in altra parte da trattare.

### TENSIONE RISULTANTE DALLA COMPOSIZIONE DI ALTERNATA E CONTINUA

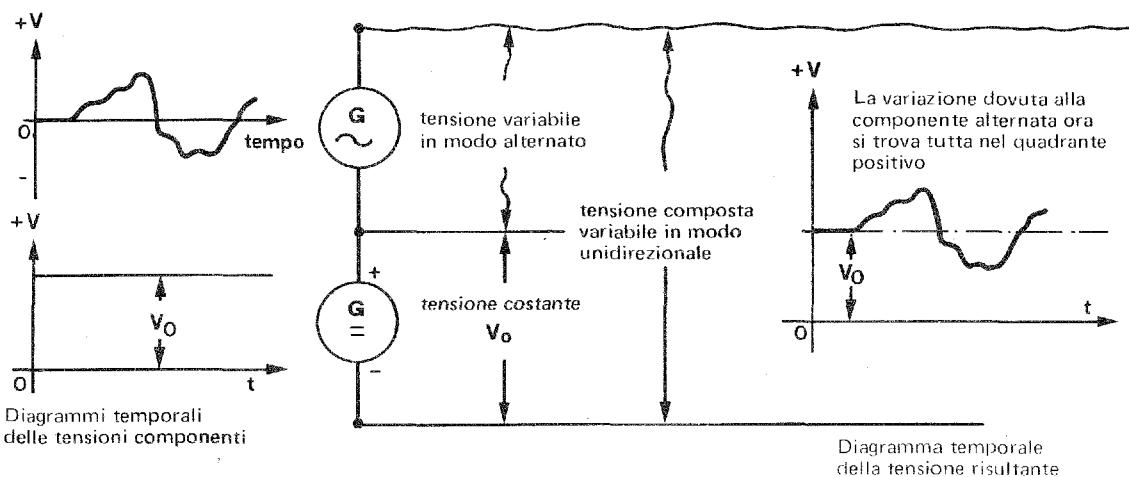
Questo modo di sommare

una tensione alternata con una tensione continua

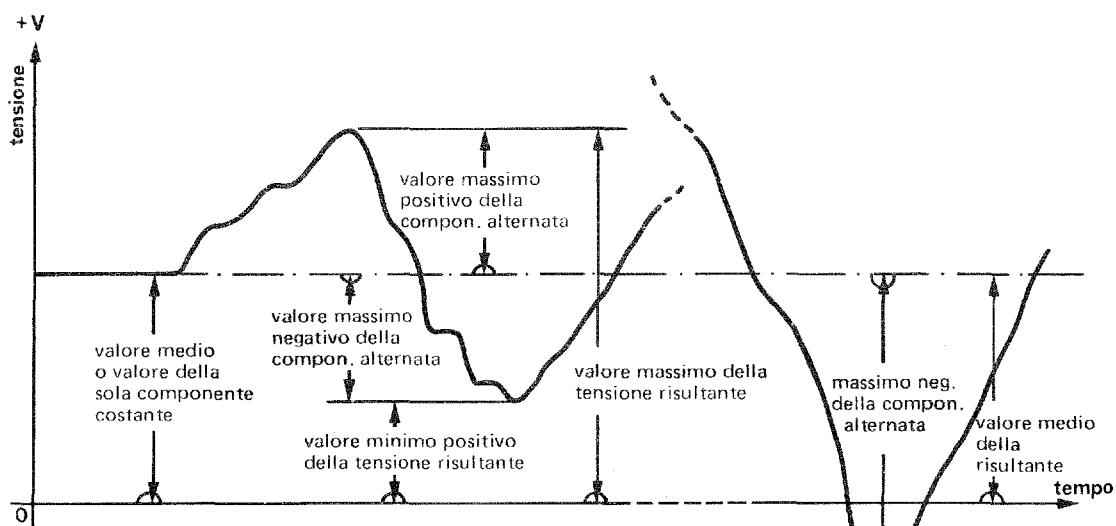
è detto anche polarizzazione di una tensione alternata e la risultante si chiama segnale polarizzato.

Per effettuare la composizione, basta semplicemente collegare in serie al generatore del segnale un generatore di tensione costante.

Se il collegamento è fatto col polo positivo, l'escursione del segnale sarà unidirezionale dalla parte positiva, sempre che l'ampiezza non superi il valore della componente continua.



### ANALISI DEL DIAGRAMMA TEMPORALE DELLA TENSIONE RISULTANTE



N.B. - Il valore medio della risult. coincide con il valore della compon. costante.  
 - I valori della comp. alternata partono dalla linea del valore medio.  
 - I valori della risult. partono dalla linea delle ascisse.

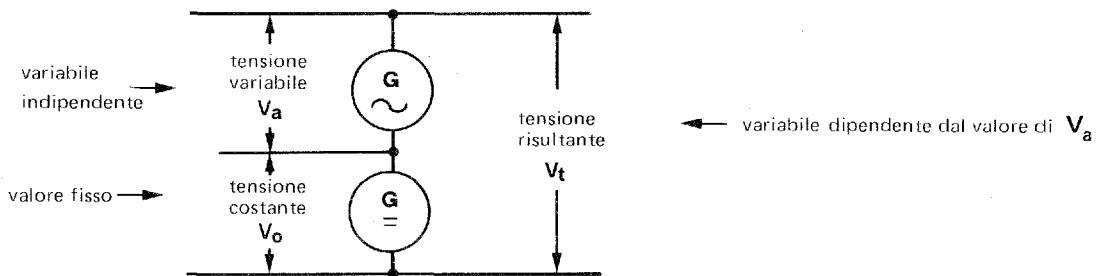
Se si vuole che la tensione risultante rimanga sempre unidirezionale e indispensabile che essa non vada mai al di sotto della linea delle ascisse. Se ciò si verificasse, significa che in quel tratto la tensione si inverte di polarità.

In questo caso è indispensabile che il valore massimo negativo della componente alternata non superi il valore medio (o valore della sola componente continua).



### DIAGRAMMI DIMOSTRATIVI SULLA COMPOSIZIONE

Riprendiamo il circuito illustrato a pag. 1.



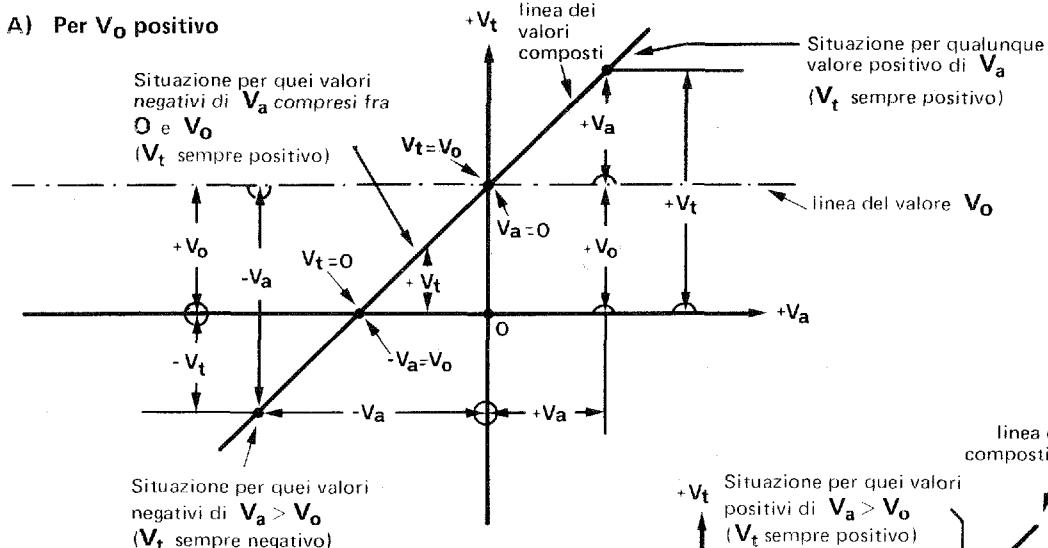
Con questa disposizione è inequivocabile che  $V_t$  cresca al crescere di  $V_a$ .

Infatti dalla figura qui sopra è chiaro che

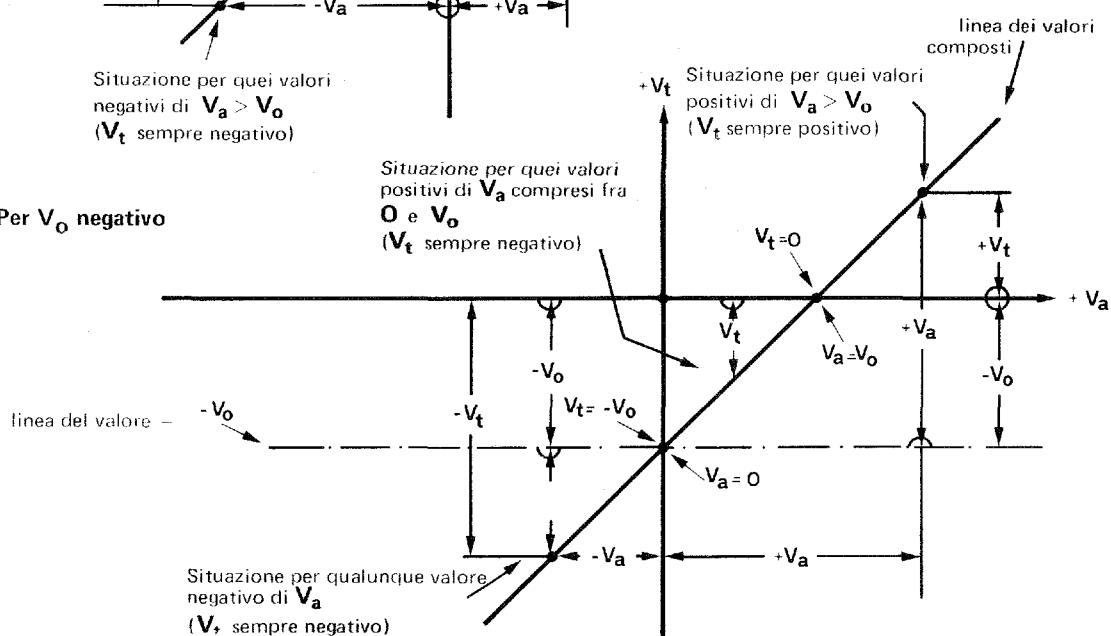
$$V_t = V_o + V_a \quad \begin{matrix} \text{tensione risultante} \\ \text{tensione variabile} \\ \text{tensione fissa o di polarizzazione} \end{matrix}$$

I diagrammi che esprimono questa relazione di  $V_t$  in funzione di  $V_a$  sono i seguenti:

#### A) Per $V_o$ positivo



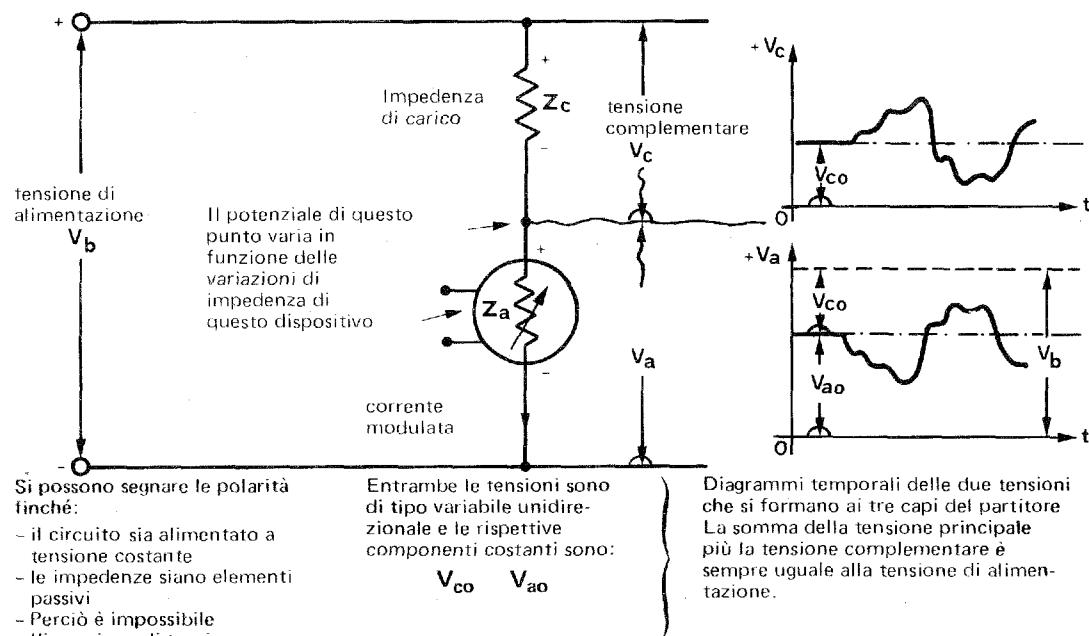
#### B) Per $V_o$ negativo



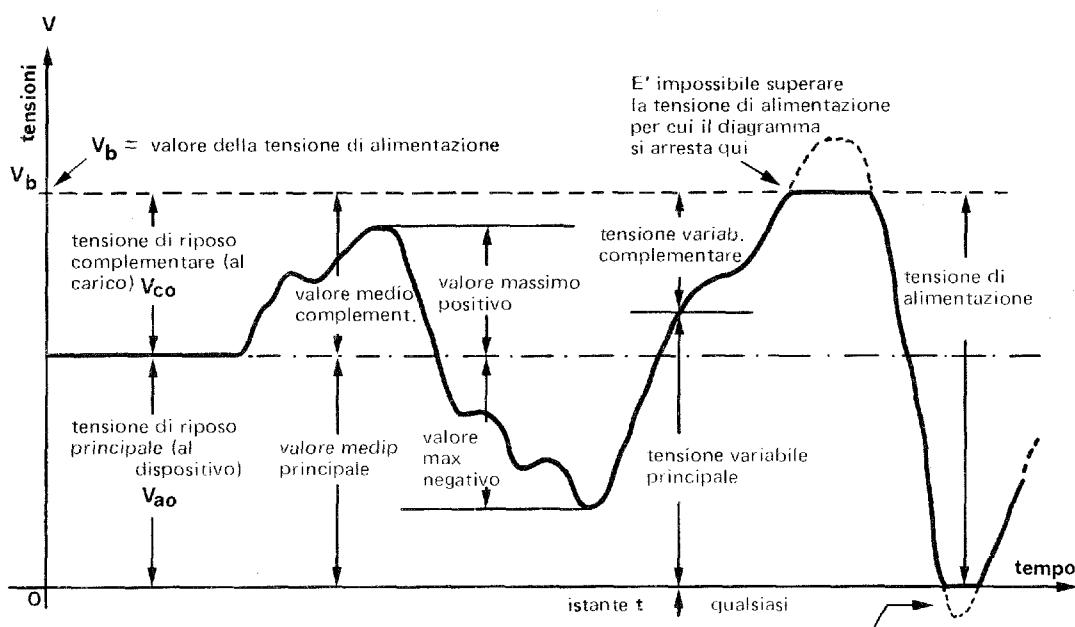
### TENSIONE VARIABILE UNIDIREZIONALE RISULTANTE DA MODULAZIONE

E' il caso molto frequente che si incontra, specie negli amplificatori, per ricavare un segnale manipolato da un dispositivo ad impedenza controllata.

Esaminiamo ora il solo circuito di uscita del dispositivo a impedenza controllata (partitore di tensione controllata).



### DIAGRAMMA SINOTTICO DELLA SITUAZIONE



**N.B.**

- il valore medio della risultante coincide con il valore della componente costante.
- i valori della componente alternata partono dalla linea del valore medio.
- I valori della risultante partono dalla linea delle ascisse.

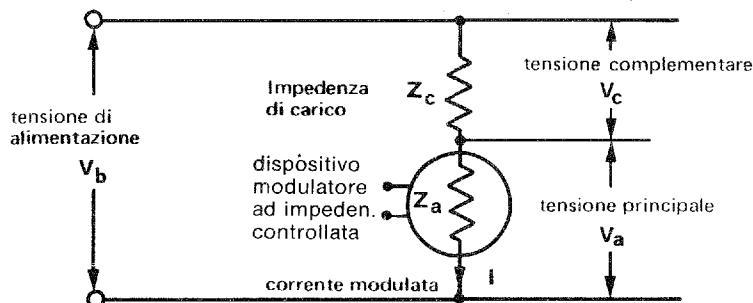
E' impossibile superare la tensione di alimentazione per cui il diagramma si arresta qui

E' impossibile questo debordamento perché significherebbe un'inversione di polarità della tensione di alimentazione.

Suggerimento: confrontare con 11.42 - 1

### DIAGRAMMA ILLUSTRATIVO SULLA MODULAZIONE DI CORRENTE CONTINUA

Riprendiamo il circuito illustrato a pag. 1.



Con questa disposizione,  
solo la tensione complementare  $V_c$  cresce col crescere della corrente e viceversa; pertanto

la tensione principale  $V_a$  diminuisce col crescere della corrente, perché

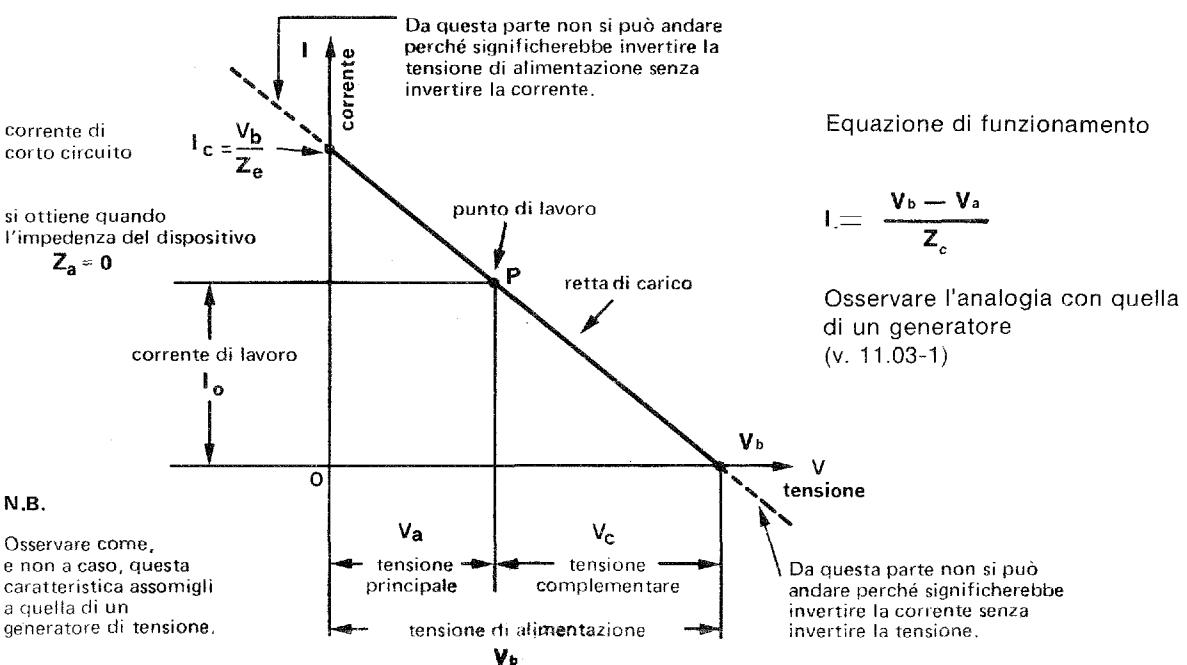
$$\text{tensione principale} \rightarrow V_a + V_c = V_b \leftarrow \begin{array}{l} \text{tensione di alimentazione} \\ (\text{costante}) \end{array}$$

tensione complementare

e perciò

$$V_a = V_b - V_c$$

Vediamo ora e commentiamo il diagramma che esprime come varia la tensione principale in funzione della corrente e viceversa (caratteristica di uscita).



Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza  
Paragrafo : 11.4 Corrente variabile unidirezionale  
Argomento : 11.40 Indice dei paragrafo

APPUNTI  
DI ELETTRONICA  
Codice Pagina  
11.40 1

## Paragrafo 11.4

# CORRENTE VARIABILE UNIDIREZIONALE

### Indice dei paragrafi e delle pagine

#### par. 11.41 — Composizione dei due valori

- pag. 1 — Generazione di correnti variabili unidirezionali  
" 2 — Corrente risultante da tensione unidirezionale

4

#### par. 11.42 — Modulazione di corrente continua

- pag. 1 — Generazione di correnti variabili unidirezionali per modulazione  
" 2 — Come varia la corrente al variare dell'impedenza controllata

### GENERAZIONE DI CORRENTI VARIABILI UNIDIREZIONALI

E' un caso molto frequente in elettronica.

Si ottiene una **corrente variabile unidirezionale** quando:

- si alimenta un carico con una tensione variabile unidirezionale
- si modula la corrente di un circuito alimentato a tensione costante, modificandone l'impedenza.

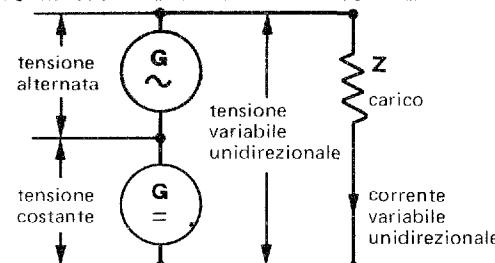
Una corrente variabile unidirezionale può essere sempre composta da due:

una corrente continua + una corrente alternata (segnaletica) di ampiezza max, inferiore alla continua.

Una corrente modulata è sempre unidirezionale se alimentata a tensione costante.

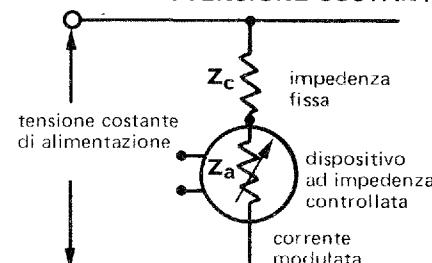
Esaminiamo entrambi i casi.

**CARICO ALIMENTATO DA TENSIONE VARIABILE UNIDIREZIONALE**



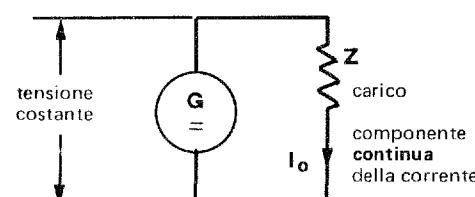
La corrente variabile unidirezionale può essere considerata come risultante delle due seguenti:

**CORRENTE MODULATA E ALIMENTATA A TENSIONE COSTANTE**

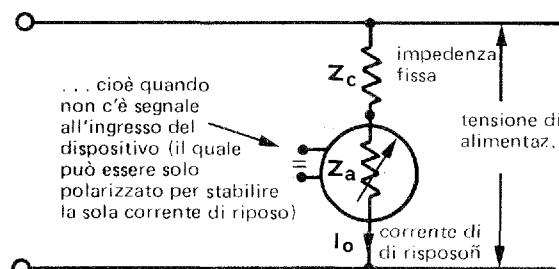


La corrente modulata può essere considerata come risultante delle sue seguenti:

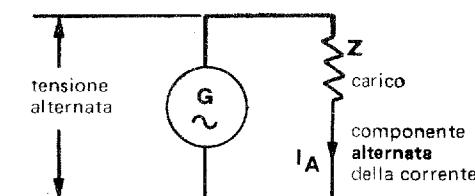
- A) Una **componente continua  $I_o$**  corrispondente a quella che si stabilirebbe se il generatore di tensione **costante** fosse il solo ad alimentare il carico



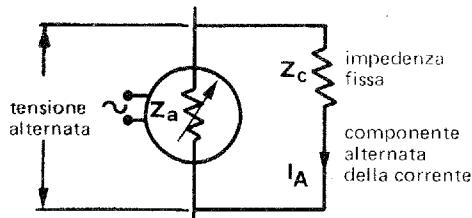
- A) Una **componente continua  $I_o$**  corrispondente al valore di riposo ...



- B) Una **componente alternata  $I_A$**  corrispondente a quella che si stabilirebbe se il generatore di tensione **alternata** fosse il solo ad alimentare il carico



- B) Una **componente alternata  $I_A$**  "generata" attorno al valore  $I_o$  da una corrispondente tensione alternata chiusura sull'impedenza fissa del partitore



**Attenzione.** - Questo concetto è molto importante e ricorrerà spesso

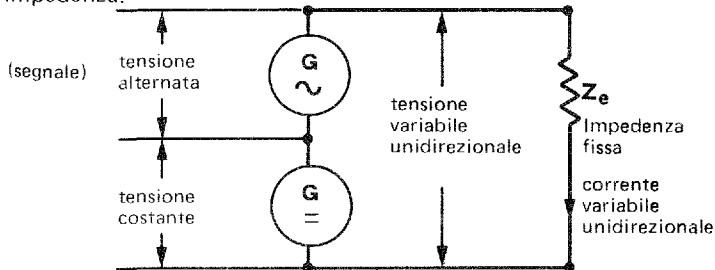
Conclusioni:  $I = I_o + I_A$

Per dettagli vedi 11.41 - 2

Per dettagli vedi 11.42

## CORRENTE RISULTANTE DA TENSIONE UNIDIREZIONALE

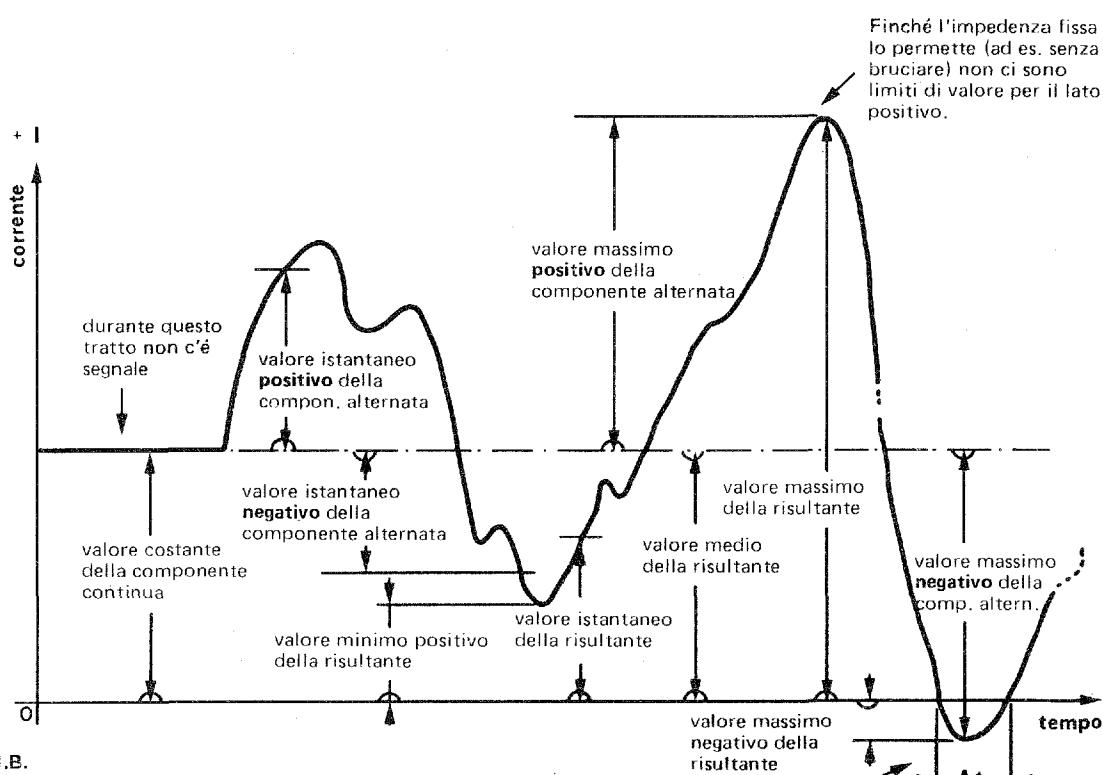
La corrente è quella che si stabilisce per la legge di Ohm a causa dell'effetto di due tensioni in serie chiuse su una impedenza.



Situazioni di questo genere si riscontrano nei transistors e in quei dispositivi a bassa impedenza di ingresso.

Esaminiamo un

### DIAGRAMMA TEMPORALE DI UNA CORRENTE VARIABILE UNIDIREZIONALE risultante da composizione.



## N.B.

- Il valore medio della risultante coincide con il valore costante della componente continua.
- I valori della componente alternata partono dalla linea del valore medio.
- I valori della risultante partono dalla linea delle ascisse.

Da questa parte della linea delle ascisse, e per la durata di questo intervallo di tempo, la direzione della corrente si inverte

(Il valore massimo negativo della componente alternata è maggiore della componente continua).

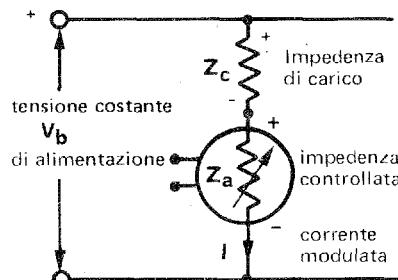
A rigore di termini in questo caso non si può parlare di corrente unidirezionale.

Inoltre una simile situazione può non essere tollerata da alcuni dispositivi come diodi, transistors, ecc. che modificano bruscamente la loro impedenza.

### GENERATORE DI CORRENTI VARIABILI UNIDIREZIONALI PER MODULAZIONE

Modulare una corrente continua significa stabilire una corrente continua e poi farla variare con qualsiasi artificio sopra e sotto il suo valore iniziale che prende il nome di valore medio.

Nel nostro caso la corrente è quella che si stabilisce per la legge di Ohm attraverso due impedenze disposte a partitore di tensione.

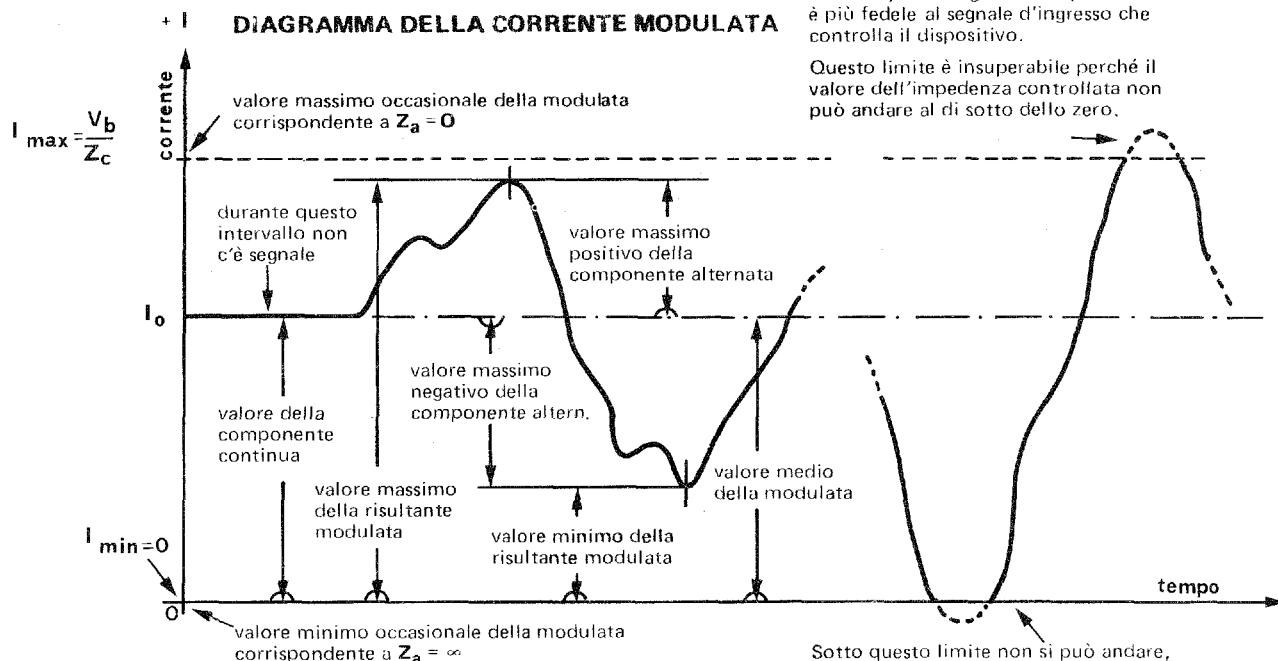


Si possono segnare le polarità finché  
 - il circuito sia alimentato a tensione costante  
 - le impedenze siano elementi passivi  
 (cioè non siano generatori né reattori )  
 - Perciò è impossibile l'inversione di corrente.

Se questa resistenza ha un valore fisso e costante, la corrente nel circuito è continua unidirezionale e costante.  
 Se questa resistenza varia anche la corrente varia.

**Atteni ai limiti**  
 oltre ai quali il segnale manipolato non è più fedele al segnale d'ingresso che controlla il dispositivo.

Questo limite è insuperabile perché il valore dell'impedenza controllata non può andare al di sotto dello zero.



Sotto questo limite non si può andare, perché a questo punto l'impedenza ha già un valore infinito.  
 (E' come se aprisse il circuito)

**N.B.**

- il valore medio della modulata coincide con il valore della componente continua.
- I valori della component alternata partono dalla linea del valore medio.
- I valori della risultante modulata partono dalla linea delle ascisse.

**DIAGRAMMA DELLA SOLA COMPONENTE ALTERNATA**

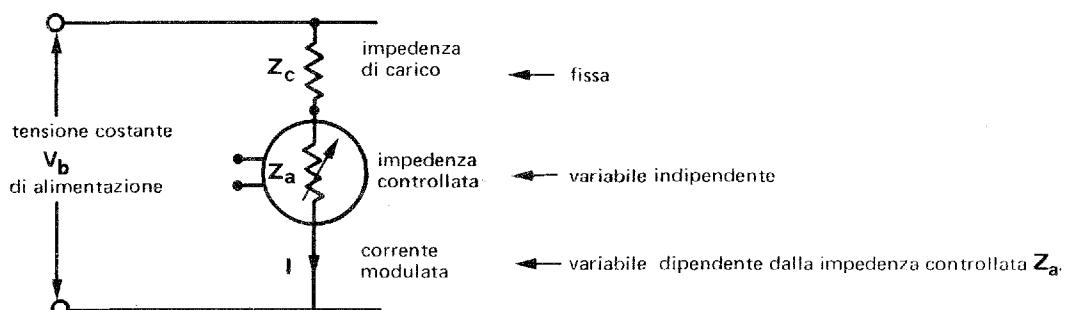


Suggerimento:  
 Confrontare con 11.33-1



### COME VARIA LA CORRENTE AL VARIARE DELL'IMPEDENZA CONTROLLATA

Riprendiamo il circuito illustrato a pag. 1



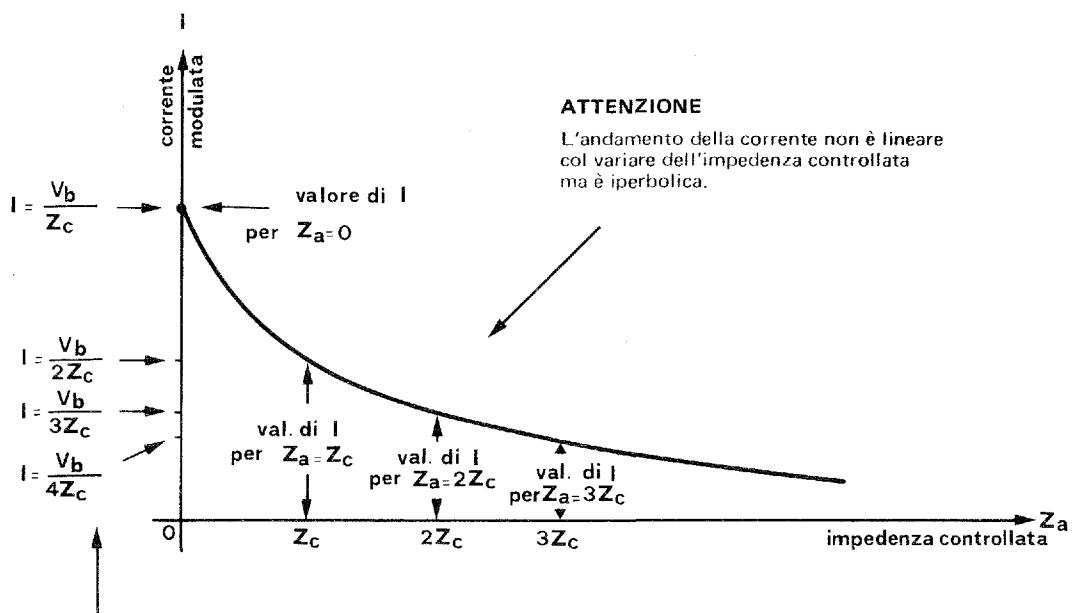
E' facile costruire la relazione fra  $I$  e  $Z_a$  con la legge di Ohm.

$$I = \frac{V_b}{Z_c + Z_a}$$

Diagram illustrating the derivation of the formula:

- corrente modulata (variabile dipendente)
- tensione di alimentazione diviso
- la somma delle due impedenze in serie
- impedenza controllata (variabile indipendente)
- impedenza di carico (fissa)

Il diagramma che esprime questa relazione di  $I$  in funzione di  $Z_a$  è il seguente



Si tratta di valori asintotici di  $I$ , perché tendono ad un valore fisso (zero) senza mai raggiungerlo.

so lo per la corrente  $Z_a = \infty$

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza  
Paragrafo : 11.5 Tensione alternata  
Argomento : 11.50 Indice del paragrafo

## **Paragrafo 11.5**

# **TENSIONE ALTERNATA**

### **Indice dei paragrafi e delle pagine**

**par. 11.51 — Concetti generali**

- pag. 1 — Paragone idraulico di tensione alternata
- " 2 — Valore efficace in generale di tensioni alternate

**par. 11.52 — Valori caratteristici**

- pag. 1 — Tensione alternata sinusoidale efficace. Tensione picco-picco
- " 2 — Potenza assorbita da tensione alternata polarizzata
- " 3 — Valore efficace totale di tensioni in serie
- " 4 — Alcuni esempi sul valore efficace, risultante totale della tensione

### PARAGONE IDRAULICO DI TENSIONE ALTERNATA

Fra tutti i tipi di tensione che si sono esaminati, la tensione alternata di qualsiasi forma è quella che viene più largamente sfruttata nelle apparecchiature elettroniche.

Spesso i profani ed i principianti si sorprendono nel venire a conoscenza che, ad esempio, in una radio solo la tensione di alimentazione e certe tensioni di polarizzazione sono costanti, mentre in qualsiasi altro punto dell'apparecchio sono presenti solo tensioni alternate o tensioni comunque variabili.

Si tenga presente che le radiazioni di qualsiasi tipo come la luce, il calore, il suono, sono fenomeni in cui sono presenti tensioni alternate di varia natura.

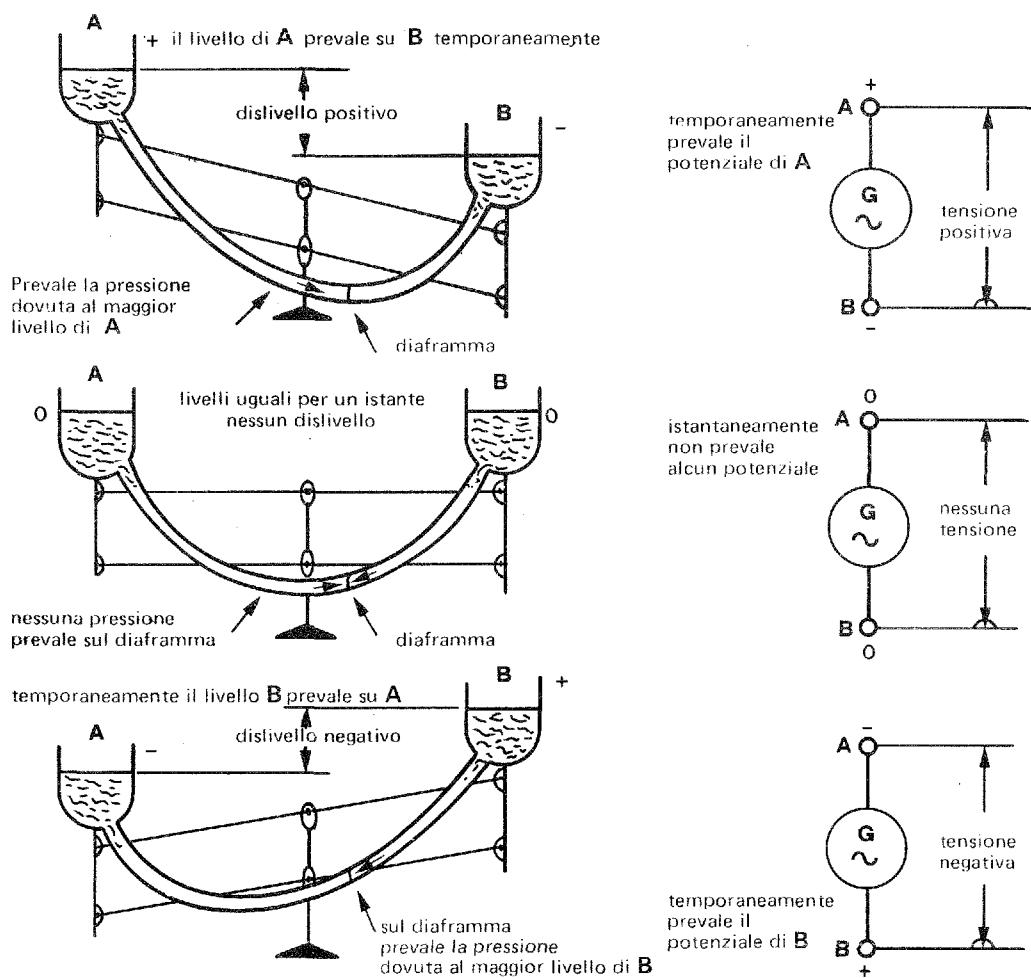
#### DEFINIZIONE (vedansi anche gli argomenti 10.4 e 10.5)

Per tensione alternata si intende una tensione che vari continuamente di valore nel tempo, invertendosi di polarità in modo tale da avere un valore medio uguale a zero.

Abitualmente si è portati ad intendere come tensione alternata la tensione sinoidale, ma non lasciamoci ingannare dalle comuni abitudini che sono legate al fatto che l'energia elettrica viene normalmente prodotta e distribuita sotto forma di tensione alternata sinoidale.

### PARAGONI IDRAULICI

Questa tensione, che continua a cambiare di polarità, è paragonabile alla differenza alternata di pressione che si esercita sulle opposte facce di un diaframma che ostruisce una tubazione sottoposta ad alternati dislivelli di acqua.



# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
11.51	2	Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza
		Paragrafo : 11.5 Tensione alternata
		Argomento : 11.51 Concetti generali

## VALORE EFFICACE IN GENERALE DI TENSIONI ALTERNATE

Sebbene il valore medio di una tensione alternata sia uguale a zero, non è zero il lavoro che essa compie quando viene utilizzata.

Infatti lo constatiamo ormai tutti i giorni nell'ambiente dove viviamo:

- la tensione alternata domestica e industriale è in grado di accendere le lampadine, produrre calore, azionare l'ascensore, gli apparecchi elettrodomestici, ecc.
- la tensione alternata che si produce per azionare un altoparlante è in grado di fargli emettere dei suoni.
- la tensione alternata che si genera per far funzionare un'antenna trasmittente è in grado di farle irradiare un'energia che è captabile dagli apparecchi riceventi.

### Prima conclusione

La tensione alternata, quando è messa in grado di far sviluppare una potenza, è attiva sia durante la semionda positiva, sia durante la semionda negativa.

### Seconda conclusione

Si tratta di trovare un valore convenzionale di tensione, rispetto al valore massimo, in modo che a quel valore corrispondano gli stessi effetti termici ed energetici, prodotti da una tensione costante dello stesso valore.

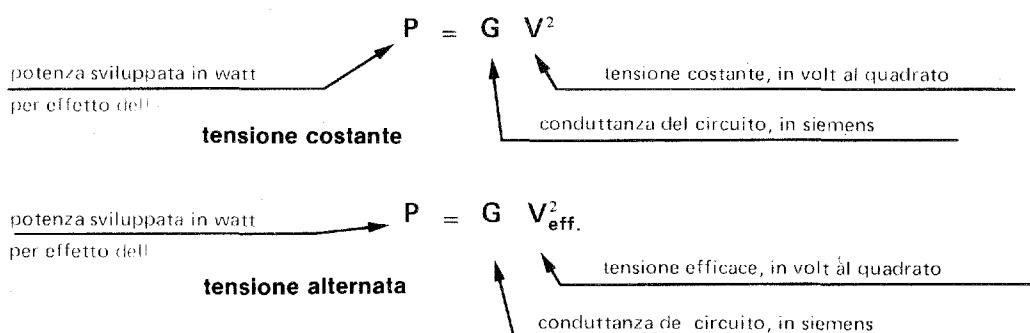
Questo valore si chiamerà valore effettivo o valore efficace.

### Avvertenza

Il valore efficace non corrisponde al valore medio di ogni semionda (vedi 10.58).

### Criterio di scelta del valore efficace

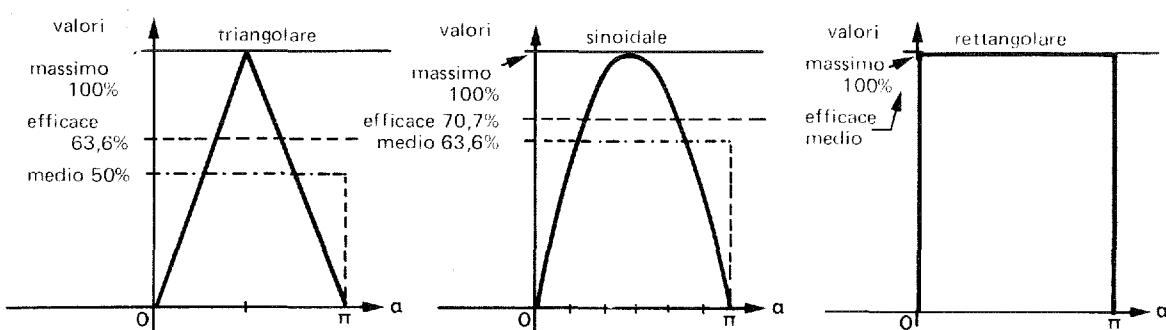
Infatti, viste tutte queste premesse, si considererà l'espressione della potenza sviluppata da una tensione su un circuito.



Come si vede, per sviluppare la stessa potenza, nello stesso circuito, in corrente alternata, occorre lo stesso valore di tensione per la corrente continua purché per tensione alternata si intenda il suo valore efficace.

### Il valore efficace è una frazione del valore massimo.

Questo valore dipende dalla forma di onda come si può vedere in questi esempi.



Suggerimento: confrontare questo con il foglio 11.61 per le analogie con la corrente.

### TENSIONE ALTERNATA SINOIDALE EFFICACE — TENSIONE PICCO-PICCO

#### Tensione efficace

La forma sinoidale è molto importante per la tensione e la corrente alternate, perché ad essa si può fare riferimento per qualsiasi altra forma di onda. (Paragrafo 10.5)

E' bene pertanto fissare qui le idee sul concetto e la tensione efficace.

Normalmente, quando si dice ad esempio, comunemente:

*"una tensione alternata da 300 volt"*

si intende sempre una tensione alternata sinoidale del valore efficace  $V = 300$  volt.

Nel caso della **forma sinoidale**, vediamo in che rapporto il valore efficace si trova con il valore massimo

$$\frac{\text{tensione massima}}{\text{tensione efficace}} = \frac{V_M}{V} = \sqrt{2} = 1,41$$

Perciò la

$$V_M = 1,41 V \quad \begin{matrix} \text{tensione efficace} \\ \longrightarrow \end{matrix}$$

e la

$$V = \frac{1}{1,41} V_M = 0,707 V_M \quad \begin{matrix} \text{tensione massima} \\ \longrightarrow \end{matrix}$$

Pertanto quella tensione efficace

$$V = 300 \text{ volt}$$

raggiunge un valore massimo

$$V_M = 1,41 \times 300 = 424 \text{ volt}$$

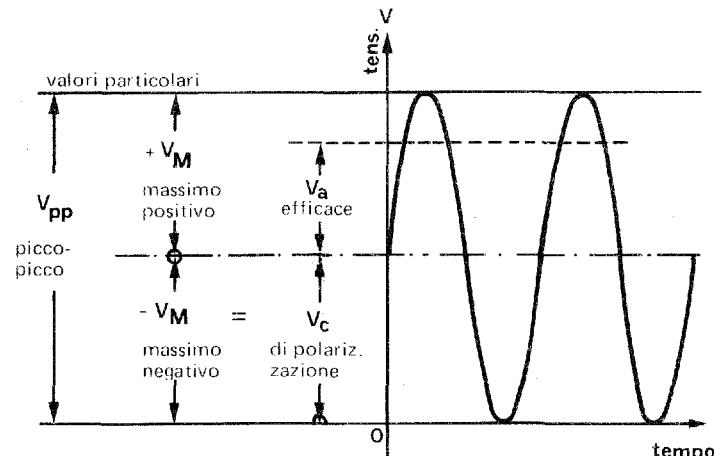
alternativamente  
positivo o negativo

#### Esercizio

Ricerchiamo il minimo valore di polarizzazione che dobbiamo aggiungere ad una tensione alternata affinché i valori assunti dalla tensione totale siano tutti positivi.

E' sufficiente che il valore di polarizzazione sia uguale o maggiore del valore massimo negativo, cioè

$$V_C = V_M = \sqrt{2} V_a$$



#### Tensione picco-picco

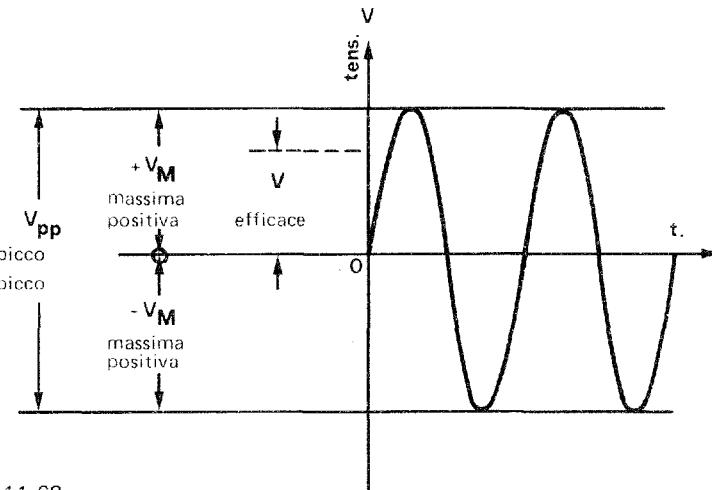
La tensione picco-picco di una oscillazione è molto importante in elettronica, poiché spesso è necessario conoscere il valore dell'escursione totale di una oscillazione.

Essa è uguale al doppio della tensione massima, cioè

$$V_{pp} = 2 V_M$$

e rispetto alla tensione efficace

$$V_{pp} = 2\sqrt{2} V$$



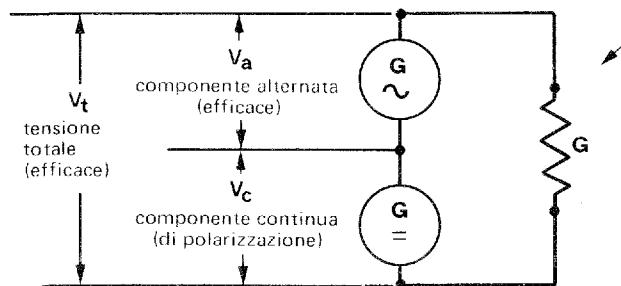
Suggerimento: confrontare questo foglio con 11.62



### POTENZA ASSORBITA DA TENSIONE ALTERNATA POLARIZZATA

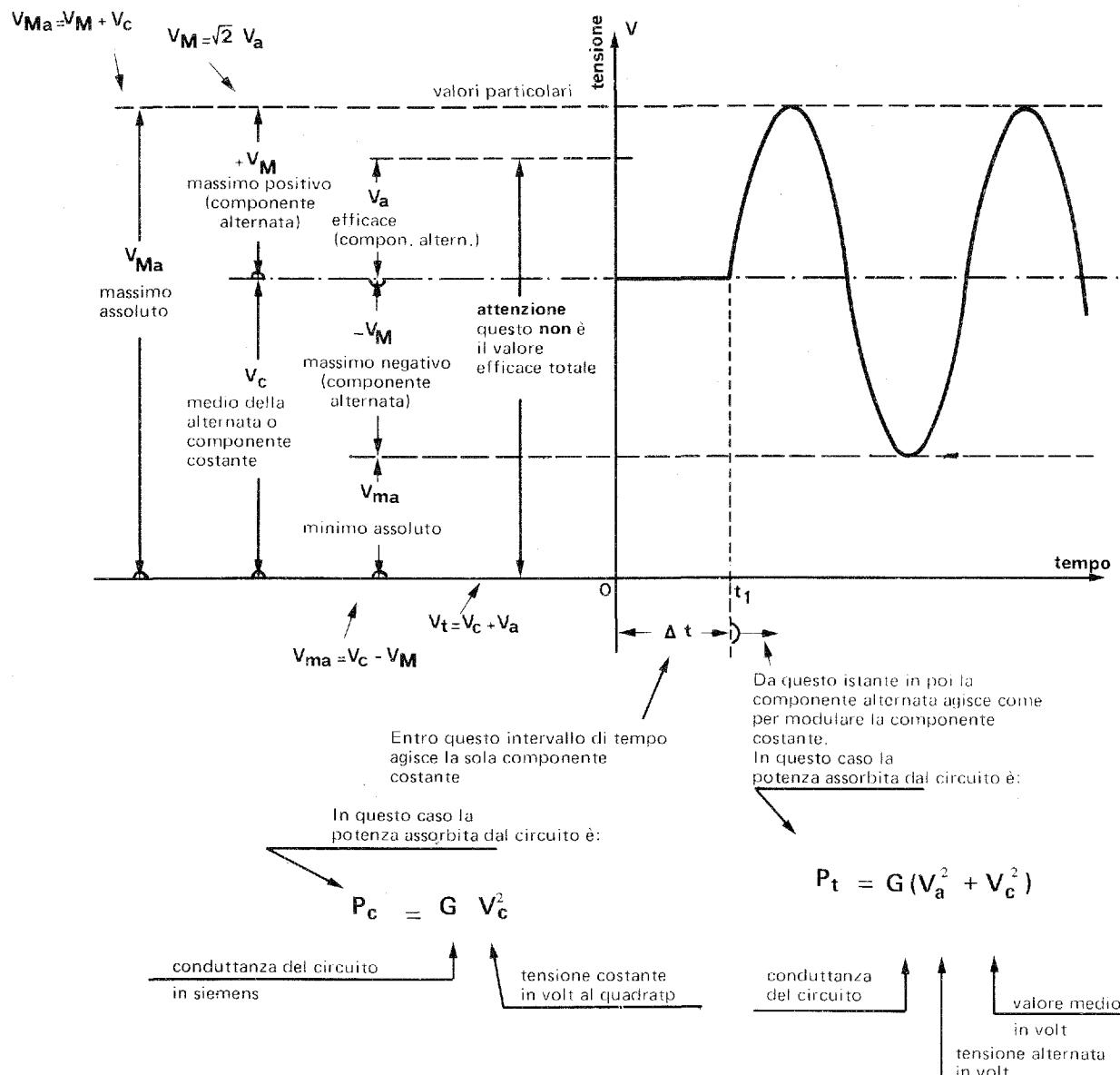
Esaminiamo un caso particolare dove il valore efficace di una componente alternata gioca un ruolo importante, quando si ha a che fare con tensioni costanti modulate.

Si osservi lo schema di circuito sotto riportato dove un generatore di tensione costante ed uno di tensione alternata in serie alimentano un circuito di conduttanza  $G$ .



Dimostreremo che, nel circuito rappresentato da questa conduttanza, si ha un assorbimento di potenza uguale alla somma delle potenze che ciascun generatore sarebbe chiamato a sviluppare, se intervenisse da solo sul circuito.

Questo concetto verrà sviluppato nel capitolo relativo a potenza ed energia.



**Suggerimento:** confrontare con il foglio 11.61



### VALORE EFFICACE TOTALE DI TENSIONI IN SERIE

**Oggetto:** Avendo più generatori di tensione alternata in serie, il valore efficace della tensione totale, dipende dalla differenza di frequenza delle tensioni componenti e delle relative fasi.

Affrontiamo subito un problema che istintivamente può sembrare paradossale.

Il valore efficace di una tensione, che corrisponde alla somma algebrica di più tensioni di valore efficace noto, si calcola differentemente a seconda dei casi sottoelencati.

#### Caso 1

- Solo tensioni alternate aventi la stessa frequenza ed in fase fra loro.
- Solo tensioni continue. Esse sono infatti casi particolari di tensioni alla stessa frequenza ( $f = 0$ ) ed in fase ( $\varphi = 0$ ).

#### Caso 2

- Tensioni alternate aventi la stessa frequenza, **ma fase diversa** fra loro.

#### Caso 3

- Tensioni alternate di frequenza diversa.
- Tensioni alternate di frequenza e fase diverse **più una tensione continua** (questa, come caso particolare di tensione alternata di frequenza  $f = 0$  è di frequenza diversa di qualsiasi altra tensione alternata).

#### Regola 1

Il valore efficace della tensione risultante è uguale alla somma dei singoli valori efficaci, cioè:

$$V = V_1 + V_2 + \dots V_n$$

#### Regola 2

Il valore efficace della tensione risultante deriva dalla composizione vettoriale delle tensioni componenti.

#### Regola 3

Il valore efficace della tensione risultante è uguale alla radice quadrata della somma dei quadrati dei singoli valori efficaci delle tensioni componenti, cioè:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots V_n^2}$$

Questo problema può lasciare sconcertato lo studioso che si rifiutasse di accettare dogmaticamente le regole citate, come infatti è rimasto sconcertato chi scrive.

L'approfondimento del problema ha portato ad uno studio che può essere oggetto di una piccola tesi separata, che però vogliamo risparmiare al lettore, per non portarlo troppo lontano dallo scopo che ci siamo prefissi.

Ricordiamo solo che quello del valore efficace è legato al concetto di potenza e che quindi ci troviamo di fronte ad espressioni algebriche che hanno a che fare con il quadrato della tensione.

**Avvertenza:** Non si confonda questo concetto di somma di tensioni sinusoidali di diversa frequenza con quello di modulazione sinusoidale di una sinusoide portante.

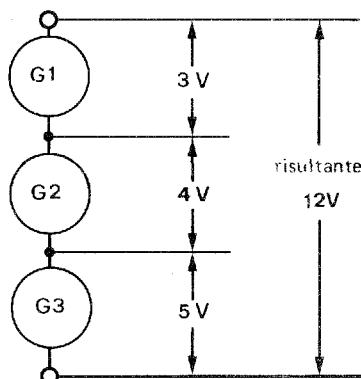
Questa infatti non è una somma, ma un prodotto di tensioni sinusoidali.



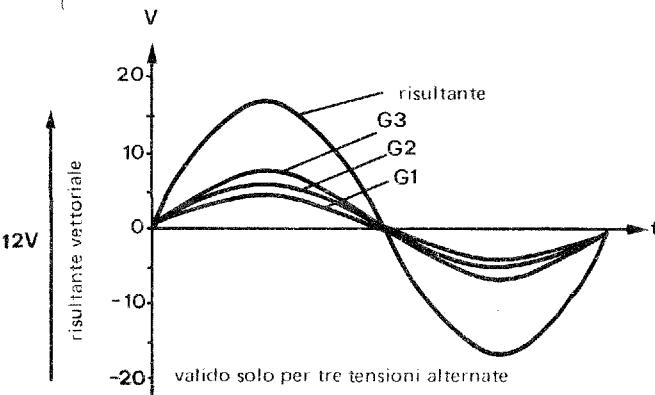
### ALCUNI ESEMPI SUL VALORE EFFICACE RISULTANTE TOTALE DELLA TENSIONE

Oggetto: Si esaminano numericamente i tre casi citati nella pagina precedente:

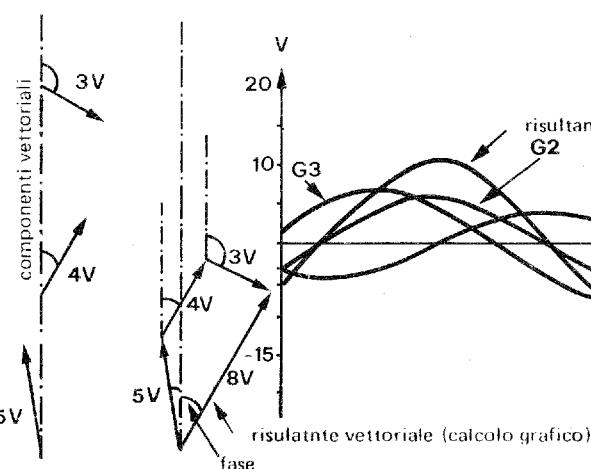
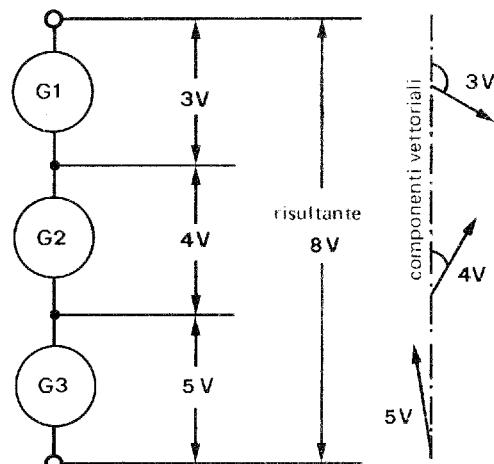
- 1) Le tre tensioni di questo esempio potrebbero essere



} tre tensioni alternate in fase ( $V_{eff}$ )  
tre tensioni continue

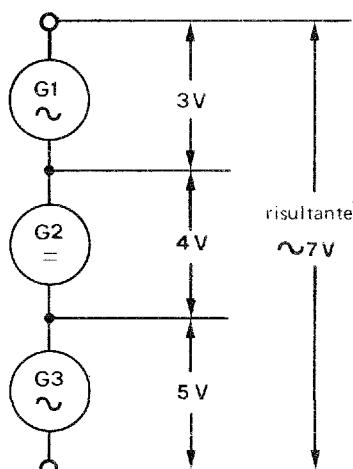


- 2) Le tre tensioni alternate di questo esempio sono della stessa frequenza, ma di fase diversa.



- 3) Le tre tensioni di questo esempio sono:

- alternata di frequenza pari a 10
- continua
- alternata di frequenza pari a 1

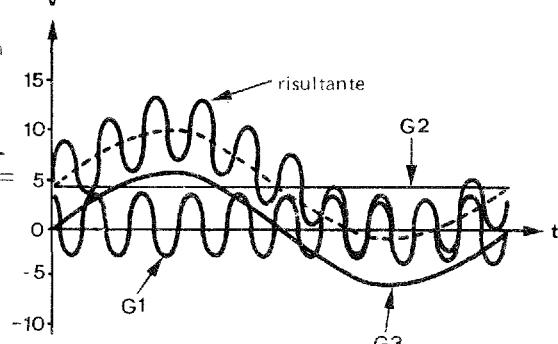


calcolo

$$V = \sqrt{3^2 + 4^2 + 5^2} =$$

$$= \sqrt{9 + 16 + 25} =$$

$$= \sqrt{50} = \sim 7 \text{ V}$$



Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza  
Paragrafo : 11.6 Corrente alternata  
Argomento : 11.60 Indice del paragrafo

APPUNTI  
DI ELETTRONICA  
Codice Pagina  
11.60 1

## Paragrafo 11.6

# CORRENTE ALTERNATA

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 11.61 — Concetti generali

- pag. 1 — Paragone idraulico di corrente alternata
- " 2 — Valore efficace in generale di correnti alternate

arg. 11.62 — Valori caratteristici

- pag. 1 — Corrente alternata sinoidale efficace — Corrente picco-picco
- " 2 — Potenza assorbita da corrente continua modulata.

### PARAGONE IDRAULICO DI CORRENTE ALTERNATA

**Suggerimento:** Confrontare questo testo con quello del foglio 11.51 per constatarne la perfetta reciprocità.

Fra tutti i tipi di corrente che si sono esaminati, la corrente alternata di qualsiasi forma è quella che viene più largamente sfruttata nelle apparecchiature elettroniche.

Spesso i profani ed i principianti si sorprendono nel venire a conoscenza che, ad esempio, in una radio, malgrado siano costanti le tensioni di alimentazione e certe tensioni di polarizzazione, circolano unicamente correnti alternate o correnti comunque variabili.

Si tenga presente che le radiazioni di qualsiasi tipo come la luce, il calore, il suono, sono fenomeni in cui sono presenti correnti alternate di varia natura.

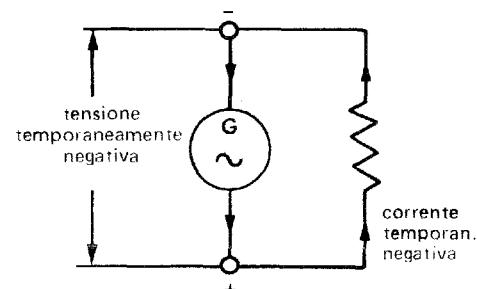
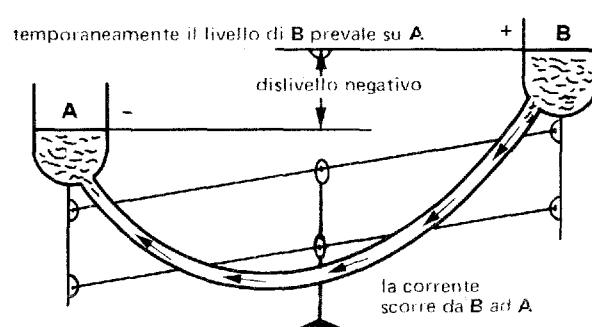
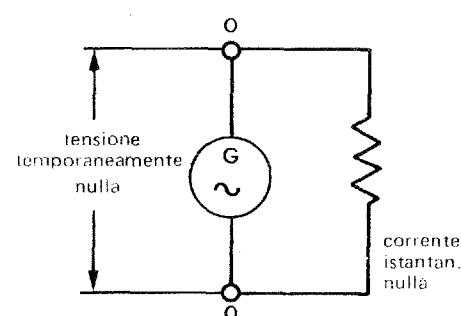
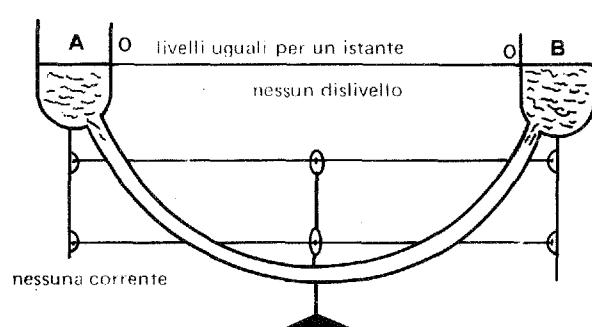
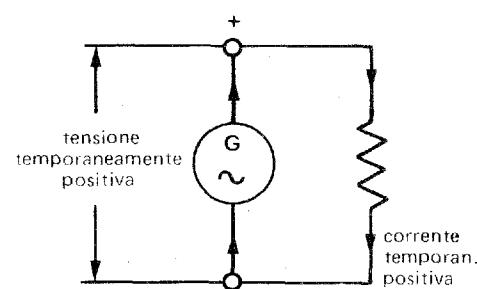
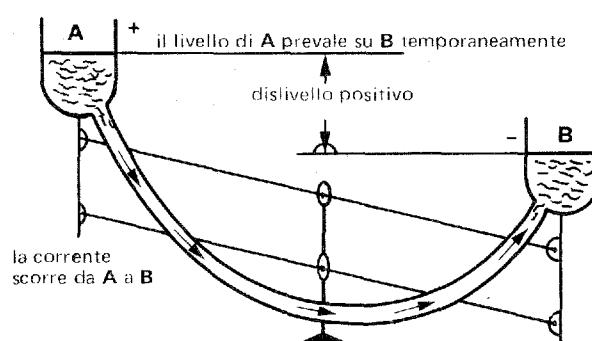
**Definizione** (Vedansi anche gli argomenti 10.4 e 10.5)

Per corrente alternata si intende una corrente che varia continuamente di intensità nel tempo, invertendosi di direzione in modo tale da avere un valore medio uguale a zero.

Abitualmente si è portati ad intendere come corrente alternata la corrente sinusoidale, ma non lasciamoci ingannare dalle comuni abitudini che sono legate al fatto che l'energia elettrica viene normalmente utilizzata sotto forma di corrente alternata sinusoidale.

#### Paragoni idraulici:

Questa corrente, che continua a cambiare di direzione, è paragonabile ad un moto alternato di acqua in una tubazione quando il livello di spinta alle estremità si alza e si abbassa alternativamente.;



# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice 11.61      Pagina 2

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 11	Tensione Corrente Resistenza
Paragrafo : 11.6	Corrente alternata
Argomento : 11.61	Concetti generali

## VALORE EFFICACE IN GENERALE DI CORRENTI ALTERNATE

Sebbene il valore medio di una corrente alternata sia uguale a zero, non è zero il lavoro che essa compie quando viene utilizzata.

Infatti lo constatiamo ormai tutti i giorni nell'ambiente dove viviamo:

- la corrente alternata domestica e industriale è in grado di accendere le lampadine, produrre calore, azionare l'ascensore, gli apparecchi elettrodomestici, ecc.
- la corrente alternata che si produce per azionare un altoparlante è in grado di fargli emettere dei suoni
- la corrente alternata che si genera per far funzionare un'antenna trasmittente è in grado di farle irradiare un'energia che è captabile dagli apparecchi riceventi.

### Prima conclusione

La corrente alternata, quando è in grado di sviluppare una potenza, è attiva sia durante la semionda positiva, sia durante la semionda negativa.

### Seconda conclusione

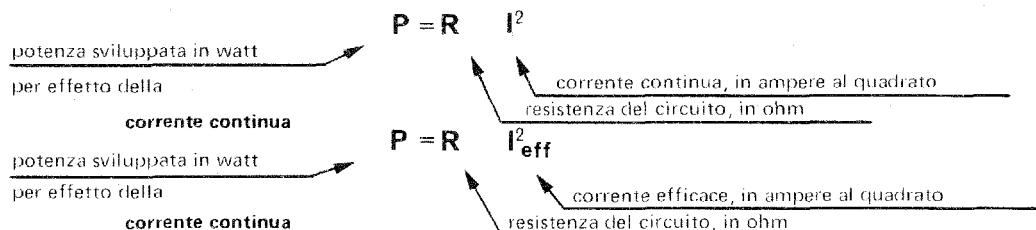
Si tratta di trovare un valore convenzionale di corrente, rispetto al valore massimo, in modo che a quel valore corrispondano gli stessi effetti termici ed energetici prodotti da una corrente continua dello stesso valore. Questo valore si chiama effettivo o valore efficace.

### Avvertenza

Il valore efficace non corrisponde sempre al valore medio di ogni semionda (vedi 10.57).

### Criterio di scelta del valore efficace

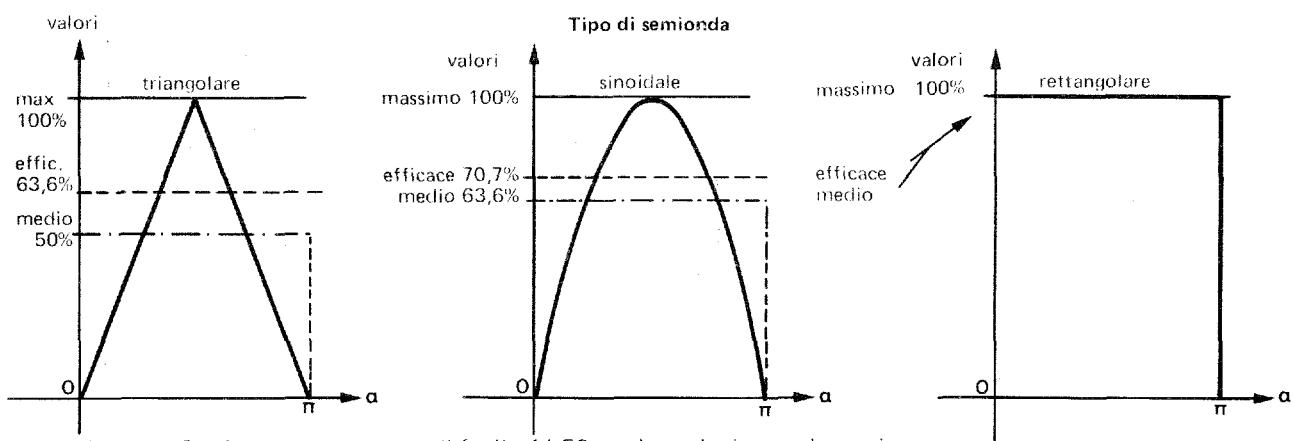
infatti, viste tutte queste premesse, si considererà l'espressione della potenza sviluppata da una corrente di un circuito.



Come si vede, per sviluppare la stessa potenza, nello stesso circuito, in corrente alternata, occorre lo stesso valore di corrente continua, purché per corrente alternata si intenda il suo valore efficace.

### Il valore efficace è una frazione del valore massimo

Questo valore dipende dalla forma di onda, come si può vedere in questi esempi comparativi.



**Suggerimento:** Confrontare questo con il foglio 11.50 per le analogie con la tensione.

### CORRENTE ALTERNATA SINOIDALE EFFICACE. CORRENTE PICCO-PICCO

#### Corrente efficace

La forma sinoidale è molto importante per la tensione e la corrente alternata, perché ad essa si può fare riferimento per qualsiasi altra forma di onda (paragrafo 10.5).

E' bene pertanto fissare qui le idee sul concetto di corrente efficace.

Normalmente, quando si dice ad esempio, comunemente: "una corrente alternata da 40 mA"

si intende sempre una corrente alternata sinoidale del valore efficace  $I = 40 \text{ mA}$

Nel caso della **forma sinoidale**, vediamo in che rapporto il valore efficace si trova con il valore massimo:

$$\frac{\text{corrente massima}}{\text{corrente efficace}} = \frac{I_M}{I} = \sqrt{2} = 1,41$$

Perciò la

$$\frac{\text{corrente massima}}{\text{corrente efficace}} = I_M = 1,41 \cdot I \quad \text{corrente efficace}$$

$$\frac{\text{corrente efficace}}{\text{corrente massima}} = I = \frac{1}{1,41} \cdot I_M = 0,707 \cdot I_M \quad \text{corrente massima}$$

Pertanto quella corrente efficace  $I = 40 \text{ mA}$

raggiunge un valore massimo

$$V_M = 1,41 \times 40 = 56,5 \text{ mA}$$

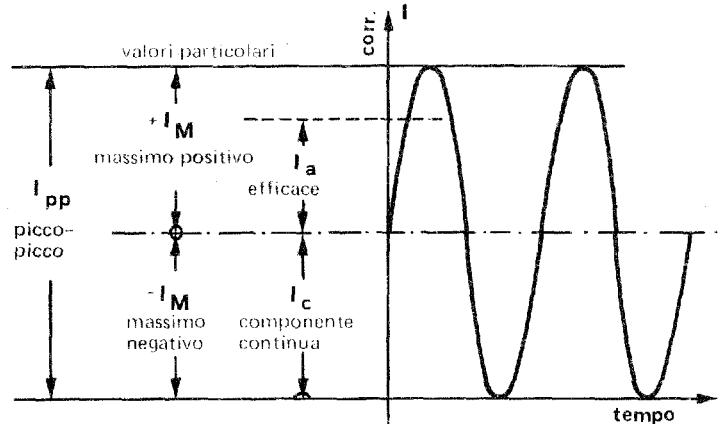
alternativamente positivo o negativo

#### Esercizio

Ricerchiamo il minimo valore di corrente continua che vogliamo modulare in modo da ottenere una componente alternata tale che i valori della risultante siano tutti positivi.

E' sufficiente che il valore di componente continua sia uguale o maggiore del valore massimo negativo della componente alternata, cioè:

$$I_c = I_M = \sqrt{2} V_a$$



#### Corrente picco-picco

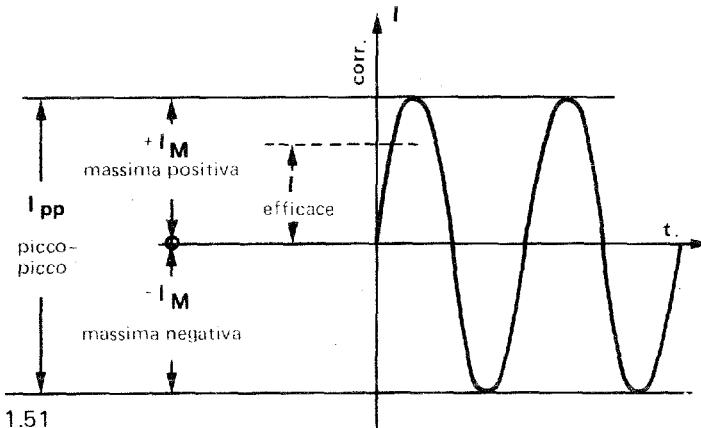
La corrente picco-picco di una oscillazione è molto importante in elettronica, poiché spesso è necessario conoscere il valore della escursione totale di una oscillazione.

Essa è uguale al doppio della corrente massima, cioè

$$I_{pp} = 2 I_M$$

e rispetto alla corrente efficace

$$I_{pp} = 2 \sqrt{2} I$$



**Suggerimento:** Confrontare questo foglio con 11.51

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice **11.62** Pagina **2**

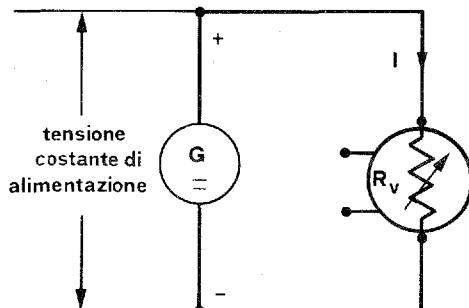
Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza  
 Paragrafo : 11.6 Corrente alternata  
 Argomento : 11.62 Valori caratteristici



### POTENZA ASSORBITA DA CORRENTE CONTINUA MODULATA

Esaminiamo un caso particolare dove il valore efficace di una componente alternata gioca un ruolo importante quando si ha a che fare con correnti continue modulate.

Si osservi lo schema del circuito sotto riportato dove un generatore di tensione costante alimenta un circuito la cui resistenza  $R_v$  sia variabile in funzione di un segnale (modulazione).

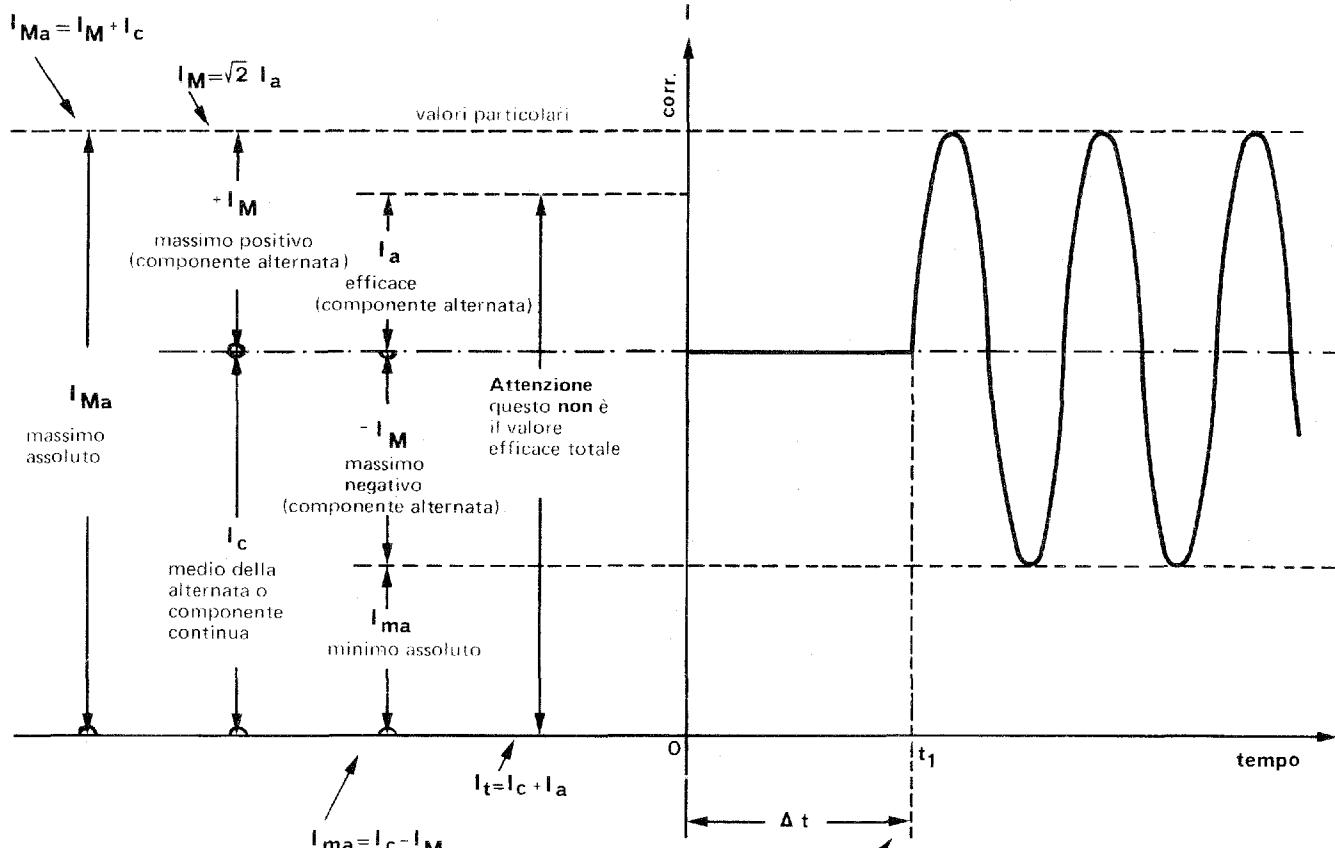


Dimostreremo che, nel circuito rappresentato da questo dispositivo a resistenza variabile, si ha un assorbimento di potenza che non dipende solo dal valore della corrente continua che si crea in assenza di segnale (assenza di modulazione) ma anche dalla componente alternata modulante.

Questa potenza è uguale alla somma delle potenze che ciascuna componente sarebbe chiamata a contribuire se intervenisse da sola nel circuito.

In altre parole, una batteria si esaurisce più rapidamente se deve fornire una corrente modulata invece di una corrente continua uguale al valore medio della modulata.

Osservare la perfetta analogia con le tensioni (v. 11.52)



Da questo istante in poi il circuito a resistenza variabile modula la corrente continua presente e le fa assumere valori alternativamente maggiori o minori.  
 In questo caso la potenza assorbita dal circuito è:

Entro questo intervallo di tempo agisce la sola componente continua.  
 In questo caso la potenza assorbita dal circuito è:

$$P = R I_c^2$$

resistenza del circuito in  $\Omega$

corrente continua in ampere al quadrato

$$P_t = R (I_a^2 + I_c^2)$$

resistenza del circuito in ohm

valore medio in amp

componente alternata in ampere

**Suggerimento:** Confrontare con foglio 11.51

## Paragrafo 11.7

# RESISTENZA STATICÀ e RESISTENZA DIFFERENZIALE

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 11.71 — **Panorama generale**

- pag. 1 — Caratteristica di funzionamento degli elementi del circuito
- “ 2 — Insistiamo sui concetti

arg. 11.72 — **Caratteristica della resistenza perfetta**

- pag. 1 — Resistenza perfetta in corrente continua
- “ 2 — Resistenza perfetta in corrente alternata

arg. 11.73 — **Caratteristica di una resistenza non lineare**

- pag. 1 — Caratteristica non lineare in corrente continua
- “ 2 — Caratteristica non lineare a tensione variabile polarizzata

arg. 11.74 — **Elementi a caratteristica non lineare — Evidenze e definizioni**

- pag. 1 — Con una data tensione alternata si possono ottenere diverse correnti alternate
- “ 2 — Resistenza statica e resistenza differenziale
- “ 3 — Deformazioni d'onda negli elementi a caratteristica curvilinea
- “ 4 — Confronti con la resistenza statica
- “ 5 — Resistenza differenziale positiva e negativa
- “ 6 — Esame generale di una caratteristica tensione-corrente

## CARATTERISTICA DI FUNZIONAMENTO DEGLI ELEMENTI DEL CIRCUITO

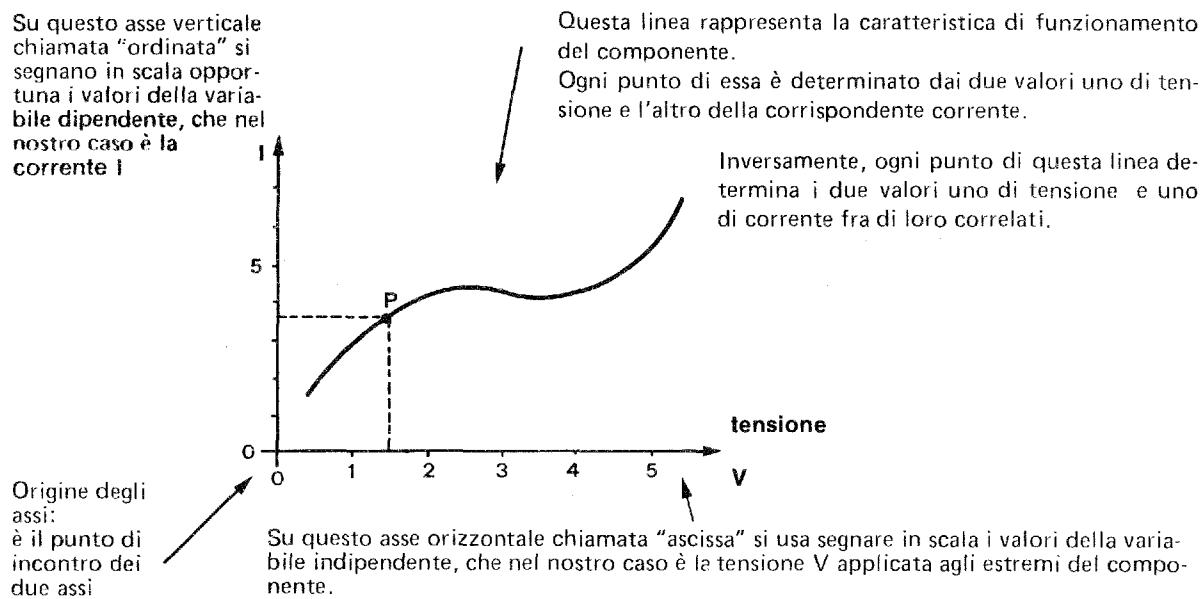
### Definizione

Dicendo semplicemente "caratteristica" di un elemento del circuito si intende l'analisi grafica su un diagramma (in coordinate cartesiane) di valori che la corrente che attraversa l'elemento in esame assume per ogni valore di tensione che viene applicato ai suoi estremi.

L'elemento del circuito (il componente per dirla in gergo) può essere analizzato nel suo comportamento sotto molti altri aspetti (v. sez. 2), ma la "caratteristica" per antonomasia è quella che abbiamo appena descritto e che in questo paragrafo andiamo ad analizzare a fondo nei suoi vari aspetti.

### Descrizione

Per "caratteristica" si intende l'insieme degli aspetti illustrati in questa figura.



### Osservazione

In questo paragrafo 11.7 noi analizzeremo gli aspetti di varie caratteristiche e i significati che da ciascuna si possono trarre e insisteremo ancora sulla differenza sostanziale dei due concetti di resistenza statica e resistenza dinamica o differenziale.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
11.71	2	Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza
		Paragrafo : 11.7 Resistenza statica e resistenza differenziale
		Argomento : 11.71 Panoramica generale

### INSISTIAMO SUI CONCETTI

Vedremo di chiarire il motivo, per cui insistiamo sul concetto di resistenza statica e di resistenza differenziale.

Tutti i componenti elettronici ad esclusione di quelli puramente resistivi o reattivi, presentano un fenomeno che si può esemplificare in questo modo.

Supponiamo di applicare una tensione continua di 10-V ad un certo componente e di ottenere per questo una corrente continua di 100 mA.

$$\text{La resistenza che ottengo è di } 100 \Omega \quad \text{cioè } R = \frac{V}{I} = \frac{10V}{0,1 A} = 100 \Omega$$

**Se insieme a questa tensione continua io applico una tensione alternata di 1 V mi aspetterei di ottenere una corrente alternata di 10 mA perché**

$$V = \frac{V}{R} = \frac{1 V}{100} = 10 \text{ mA}$$

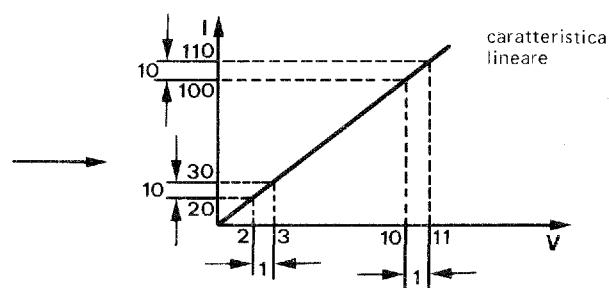
invece ottengo magari diciamo 2 mA di corrente alternata e anche meno, cioè come se la resistenza per la componente alternata fosse di 500  $\Omega$  o di più.

Succede dunque come se il comportamento in corrente alternata fosse diverso che in corrente continua e cioè che per la corrente alternata si abbia una resistenza diversa.

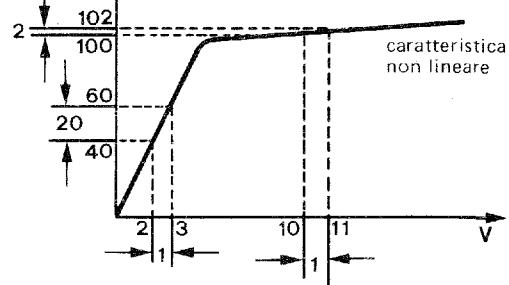
Non solo, ma può succedere anche che questa resistenza "diversa" in alternata cambia se modifico il valore della componente continua della tensione applicata.

Ebbene, tutto questo è dovuto al semplice fatto che

la caratteristica invece di essere fatta così



la troviamo fatta così



Da qui nasce tutto quello che segue

### RESISTENZA PERFETTA IN CORRENTE CONTINUA

Per il concetto stesso di resistenza espresso con la legge di Ohm (10.21), una resistenza perfetta mantiene costante il suo valore, qualunque sia il valore della tensione applicata.

Infatti, la corrente che risulta in circolazione nel circuito, sarà sempre proporzionale alla tensione secondo un **coefficiente di proporzionalità** che si chiama

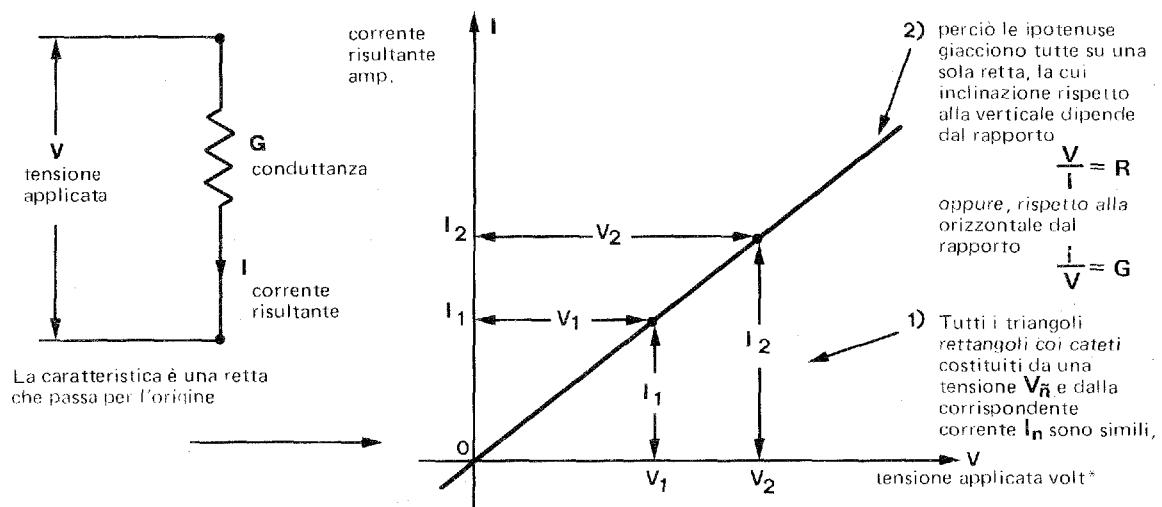
$$\text{conduttanza } G = \frac{1}{R} \quad \text{uguale all'inverso della resistenza (in ohm)}$$

Infatti

$$\text{corrente risultante } I = G V \quad \begin{matrix} \text{tensione applicata (in volt)} \\ \text{conduttanza (in siemens)} \end{matrix}$$

Esaminiamo graficamente e commentiamo la

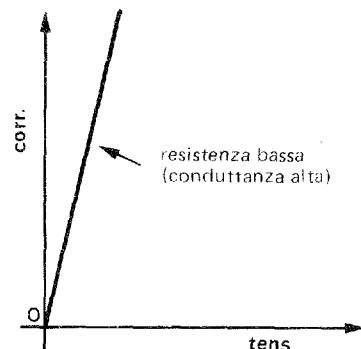
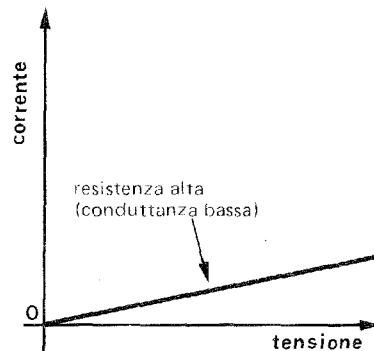
### CARATTERISTICA DELLA RESISTENZA PERFETTA



In conclusione, la retta che rappresenta la caratteristica sarà

più vicina alla orizzontale per i valori alti di resistenza (bassi di conduttanza)

più vicina alla verticale per i valori bassi di resistenza (alti di conduttanza)



N.B. - Abbiamo adottato il concetto di resistenza perfetta quando il dispositivo non è affatto da componenti reattive (cap. 14) né da f.e.m., la sua caratteristica non devia dall'andamento rettilineo ed è sempre passante per l'origine 0 del diagramma.

### RESISTENZA PERFETTA IN CORRENTE ALTERNATA

Gli stessi concetti di resistenza e di conduttanza espressi con la legge Ohm (10.21) sono applicabili anche alle tensioni alternate o comunque variabili.

Infatti, quanto detto nella pagina precedente per i regimi costanti (corrente continua), è valido anche per i regimi variabili (corrente alternata).

Quindi l'espressione

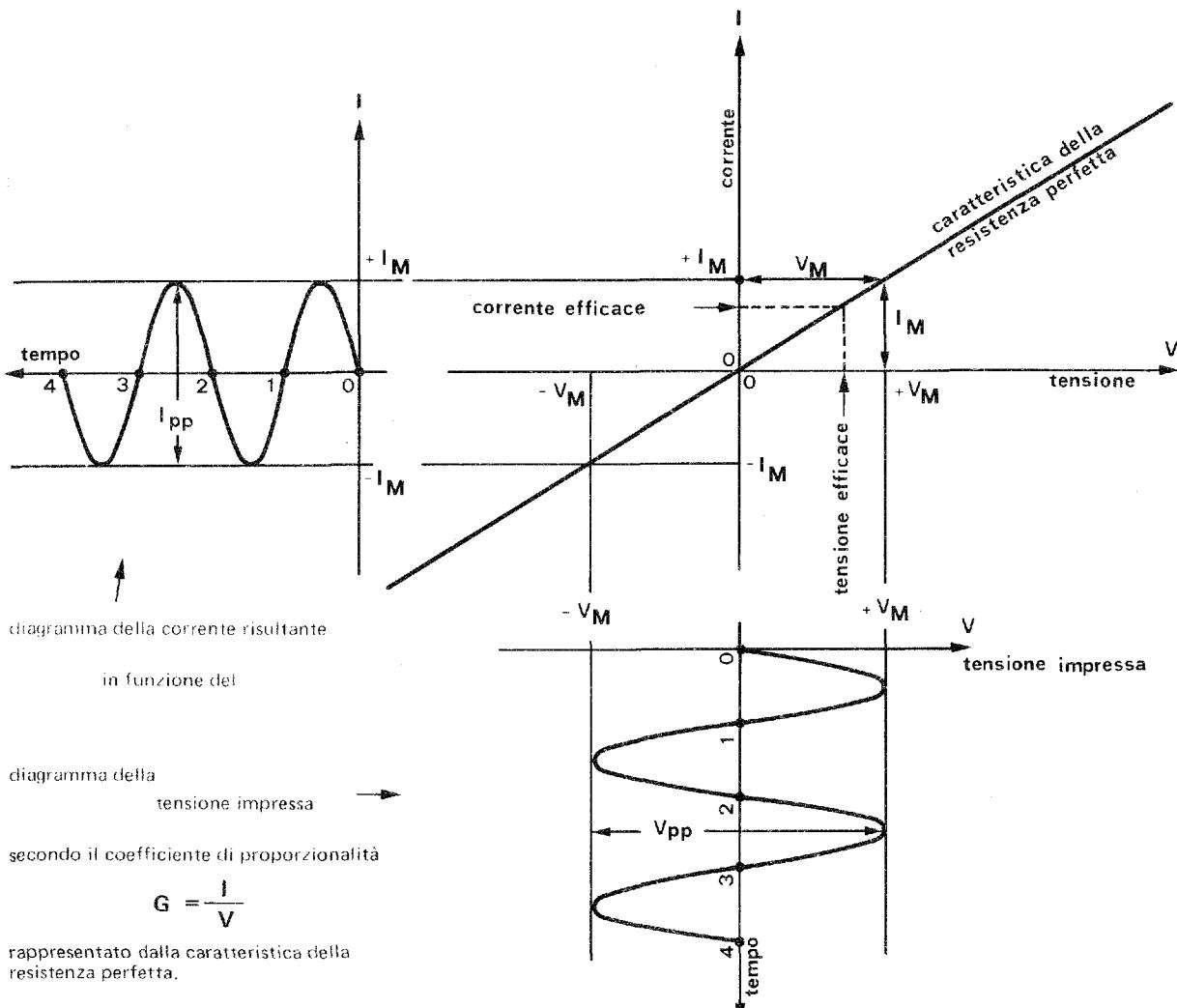
$$I = G V$$

corrente risultante (in ampere)      tensione applicata (in volt)  
 conduttanza (in siemens)

è valida anche quando vogliamo ottenere

- corrente efficace ( $I_{eff}$ ) purché  $V$  sia espressa in valore efficace ( $V_{eff}$ )
- corrente massima ( $I_M$ ) purché  $V$  sia espressa in valore massimo ( $V_M$ )
- corrente picco-picco ( $I_{pp}$ ) purché  $V$  sia espressa in valore picco-picco ( $V_{pp}$ )

Esaminiamo graficamente l'argomento applicando una tensione alternata, ed impariamo a ragionare con i diagrammi multipli (caratteristica  $VI$  e diagrammi temporali) per studiare l'andamento della corrente.



**N.B. -** Insistiamo sul concetto di reversibilità di resistenza e conduttanza.

Non dimentichiamo che la caratteristica della resistenza perfetta è anche caratteristica della conduttanza perfetta.

Tutto dipende dal modo di "guardare" il diagramma a seconda che si consideri l'inclinazione della retta

$$\frac{V}{I} = R \quad (\text{resistenza}) \quad \text{oppure come} \quad \frac{I}{V} = G \quad (\text{conduttanza})$$

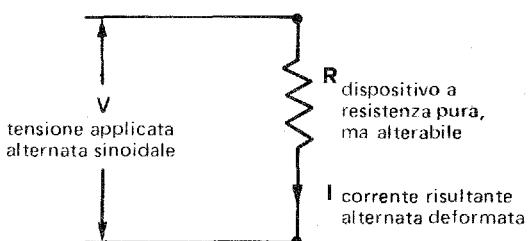
### CARATTERISTICA NON LINEARE IN CORRENTE ALTERNATA

Osserviamo ciò che succede quando si ha a che fare con un dispositivo che presenta una resistenza di tipo alterabile.

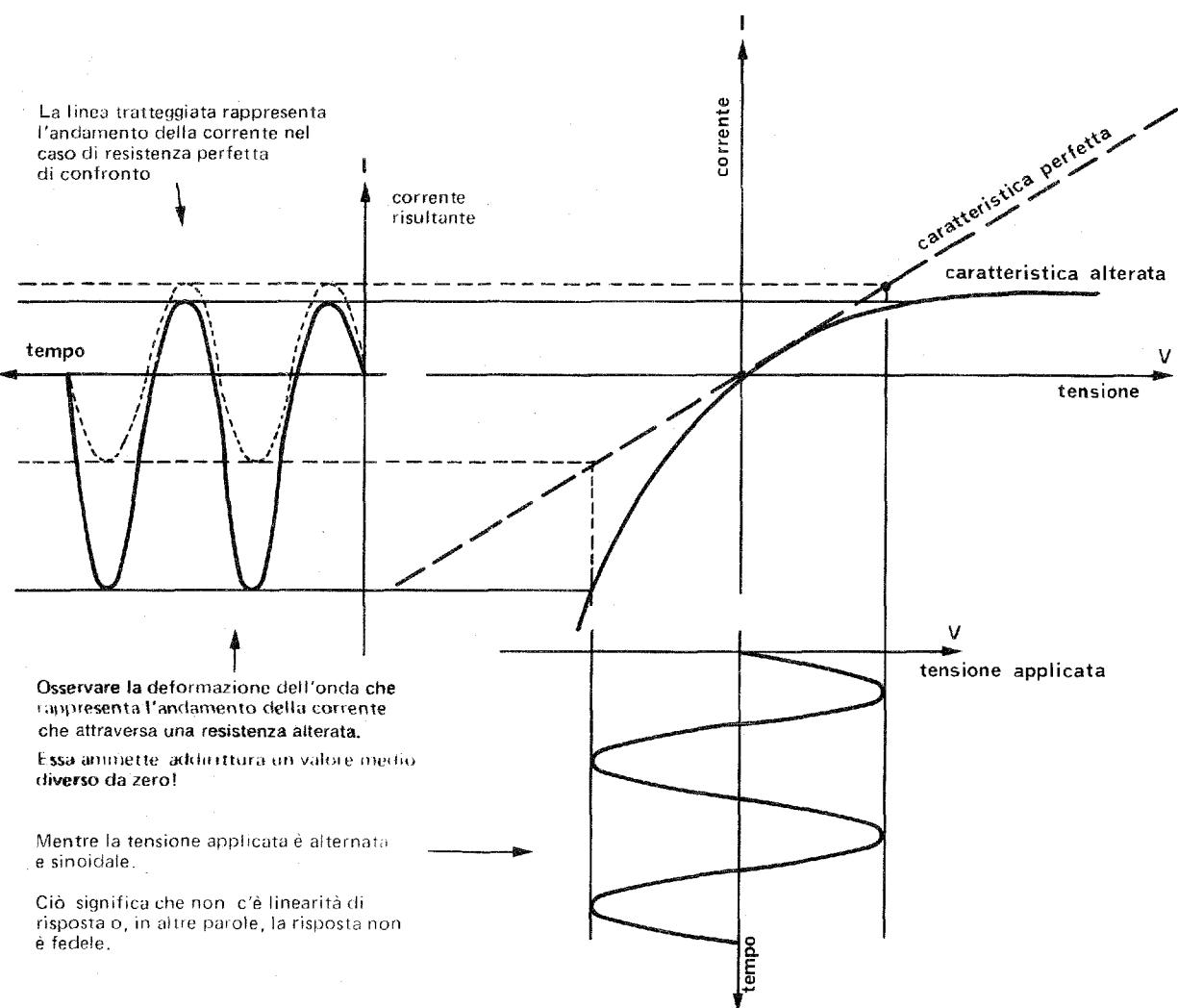
**Avvertenza** - Una resistenza è perfetta quando il dispositivo che la presenta non è affatto da componenti reattive (vedi cap. 14) né da forze elettromotrici e comunque la sua caratteristica deve essere rettilinea e passante per l'origine.

In questo caso l'alterabilità della resistenza in argomento si palesa dal fatto che la sua caratteristica, pur passando per l'origine, non è rettilinea.

Si studia l'andamento della corrente in funzione di una tensione applicata di tipo alterato sinoidale.



La linea tratteggiata rappresenta l'andamento della corrente nel caso di resistenza perfetta di confronto



**Osservazione** - Il fenomeno è reversibile nel senso che, se è una corrente sinoidale ad essere applicata, sarà la tensione ad essere la risultante deformata.

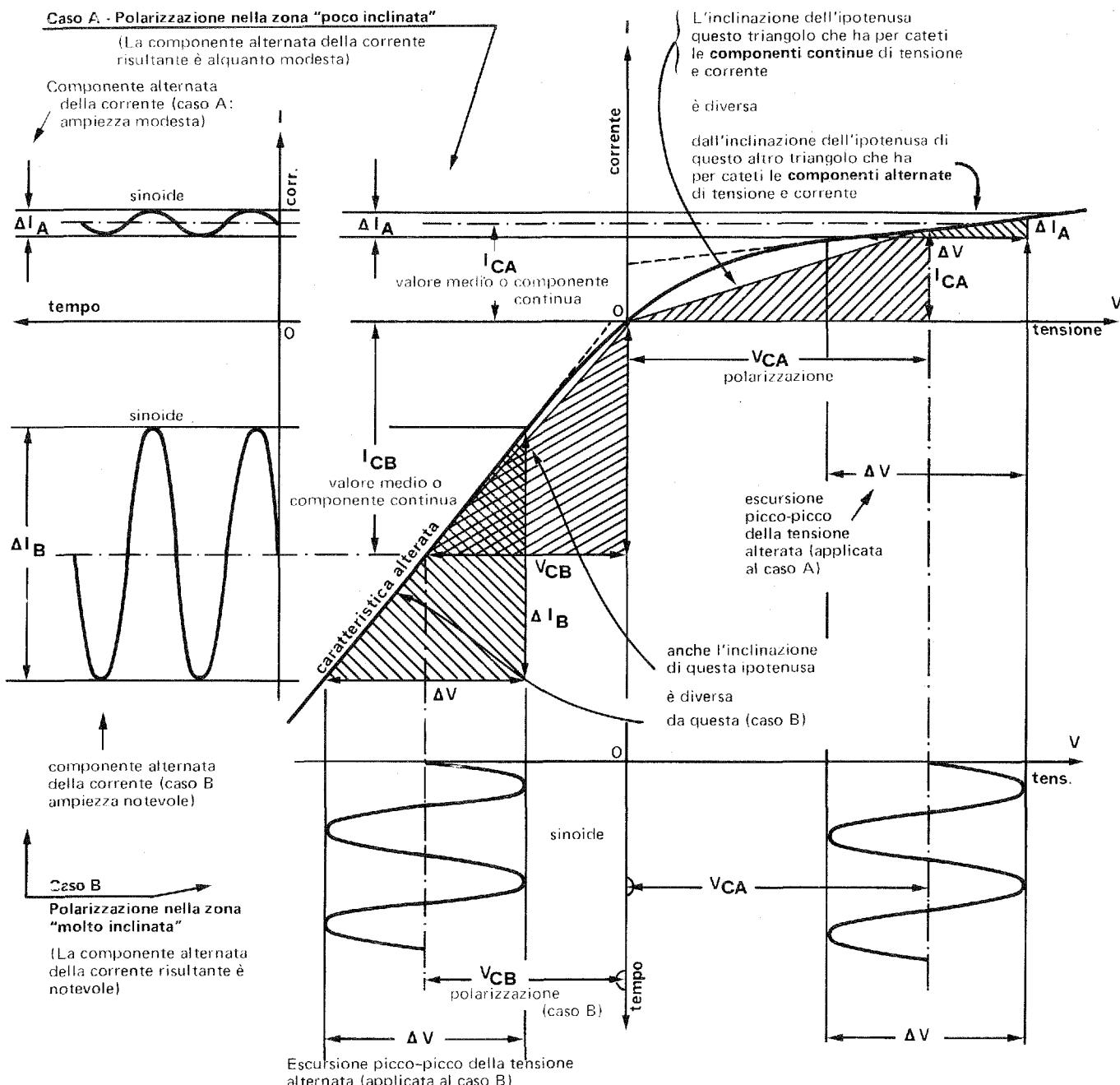
### CARATTERISTICA NON LINEARE A TENSIONE VARIABILE POLARIZZATA

Ecco cosa succede quando si ha a che fare con tensioni alternate polarizzate applicate ai capi di una resistenza alterabile la cui caratteristica presenta tratti rettilinei il cui prolungamento non passa per l'origine.

In questo stesso diagramma si contemplano due casi corrispondenti a:

- uno stesso valore delle componenti alternate delle tensioni applicate
- due diversi valori della tensione di polarizzazione.

E' interessante constatare come una stessa tensione alternata, a seconda di come sia diversamente polarizzata, possa dar luogo a due correnti notevolmente diverse.



**Conclusione** – E' chiaro che in questi tipi di resistenza si può variare la componente alternata della corrente modificando la componente continua della tensione e viceversa.

### CON UNA DATA TENSIONE ALTERNATA SI POSSONO OTTENERE DIVERSE CORRENTI ALTERNATE

Anche in questo caso (vedi 11.71/2) si può modificare il valore della componente alternata della corrente, modificando il valore della componente continua della tensione e viceversa.

Inoltre, quando mancano tratti rettilinei nella caratteristica, non si potrà mai avere una forma di onda della corrente identica a quella della tensione applicata e viceversa.

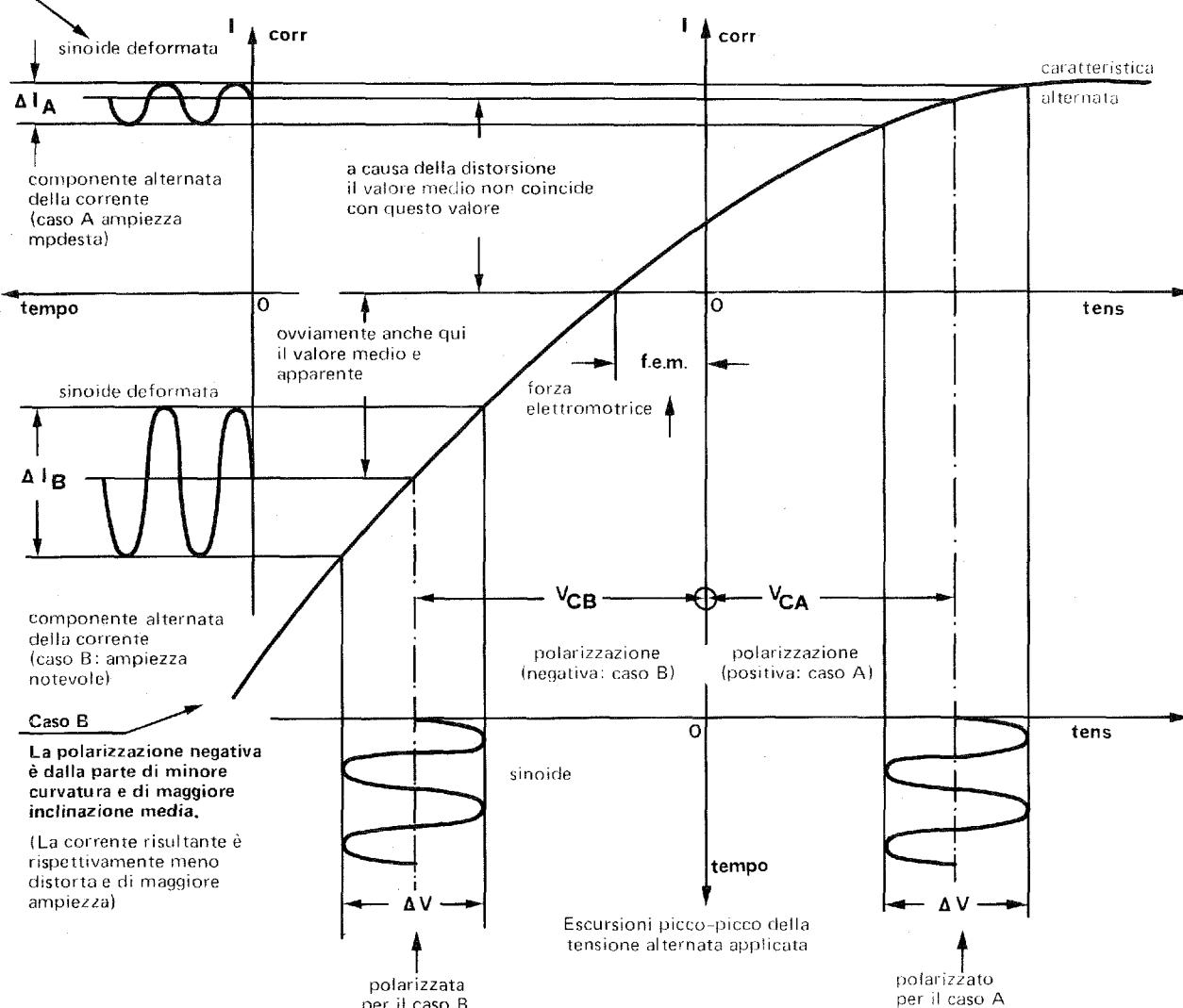
Nel caso più generale poi resta il problema di dare un significato ai seguenti rapporti:

- 1) **componente continua della tensione**  
**componente continua della corrente**
- 2) **componente alternata della tensione**  
**componente alternata della corrente**

Entrambi hanno la dimensione di una resistenza, ma non solo sono diversi fra di loro in ogni punto della caratteristica, ma anche cambiano di valore man mano che il punto si sposta sulla caratteristica.

Esaminiamo la figura che mostra la caratteristica di una resistenza alterata, affetta da forza elettromotrice e interamente curvilinea: perciò non si potrà parlare di inclinazione della ipotenusa, a meno che non si applichino tensioni così piccole da rendere impercettibile la deformazione dovuta alla curvatura della caratteristica.

**Caso A** - La polarizzazione (positiva) è dalla parte di maggior curvatura e di minore inclinazione media.  
 (La corrente risultante è rispettivamente più distorta e di minore ampiezza)



**Conclusione** - E' necessario introdurre un nuovo concetto di resistenza che tenga conto di altri parametri della zona di caratteristica dove si vogliono far avvenire, polarizzandole, le escursioni della componente alternata.

### RESISTENZA STATICHE E RESISTENZA DIFFERENZIALE

Se la caratteristica presenta un tratto rettilineo non passante per l'origine degli assi sul quale facciamo avvenire le oscillazioni polarizzate, il rapporto fra

$$\text{e } \frac{\text{tensioni applicate}}{\text{correnti corrispondenti}} \quad (\text{che ha le dimensioni di una resistenza})$$

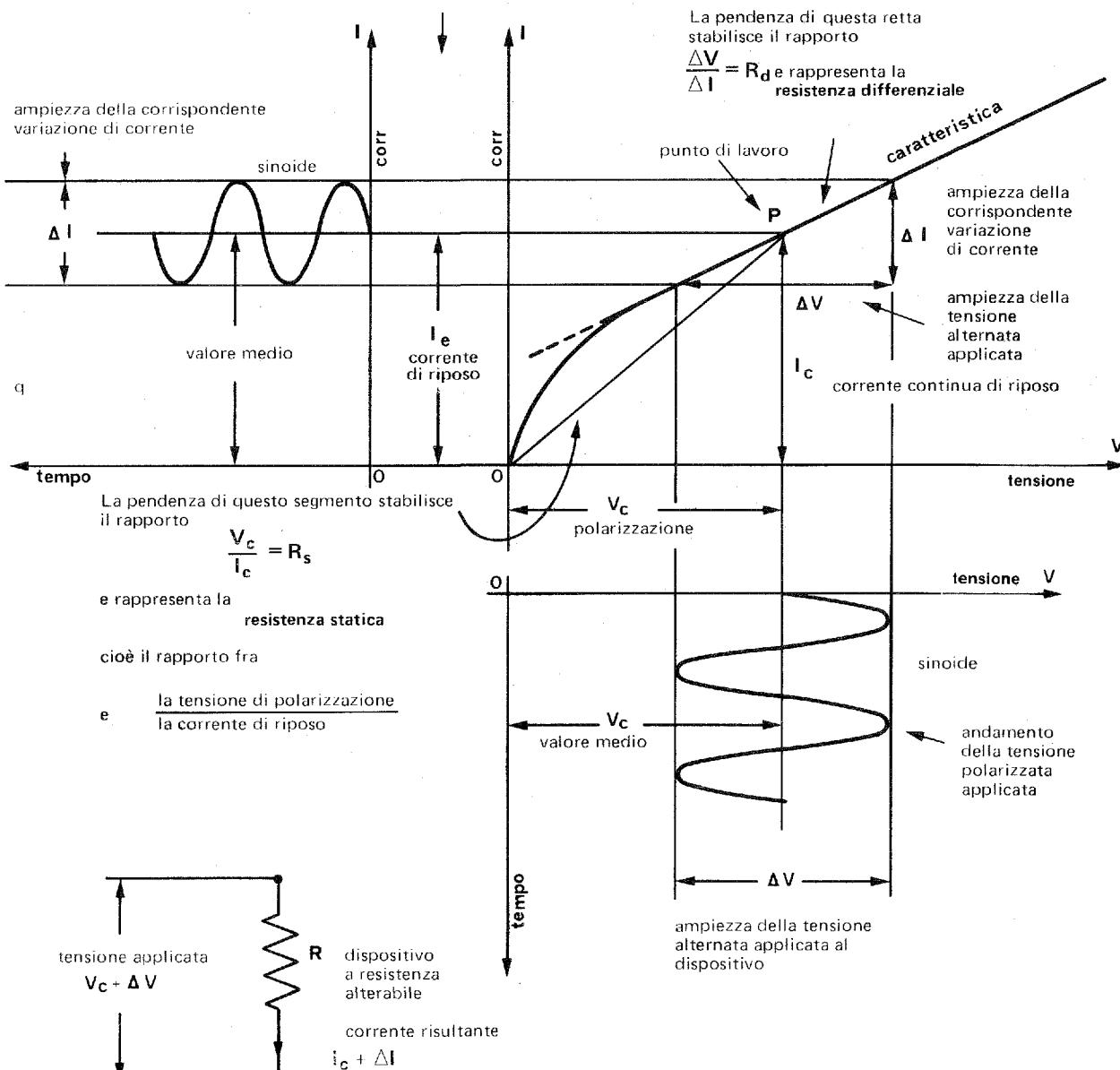
è diverso per uno stesso punto di lavoro a seconda che si tratti di componenti variabili oppure di componenti continue. Definiamo dunque le seguenti grandezze:

$$\text{Resistenza differenziale} \quad R_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad \frac{\text{ampiezza della variazione di tensione applicata}}{\text{ampiezza della variazione di corrente corrispondente}}$$

$$\text{Resistenza statica} \quad R_s = \frac{V_c}{I_c} \quad \frac{\text{valore della tensione costante di polarizzazione}}{\text{valore della corrente continua corrispondente}}$$

Osserviamo le figure con tutti i loro commenti.

La corrente di riposo è la sola componente continua che attraversa il dispositivo quando manca la tensione alternata (è presente la sola tensione di polarizzazione)



Schema di collegamento del dispositivo a resistenza alternabile

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 11 Tensione Corrente Resistenza  
 Paragrafo : 11.7 Resistenza statica e resistenza differenziale  
 Argomento : 11.74 Elementi a caratteristica non lineare. Evidenze e definizioni

### DEFORMAZIONI D'ONDA NEGLI ELEMENTI A CARATTERISTICA CURVILINEA

Attenzione ora a ciò che succede quando la caratteristica della resistenza è interamente curvilinea;

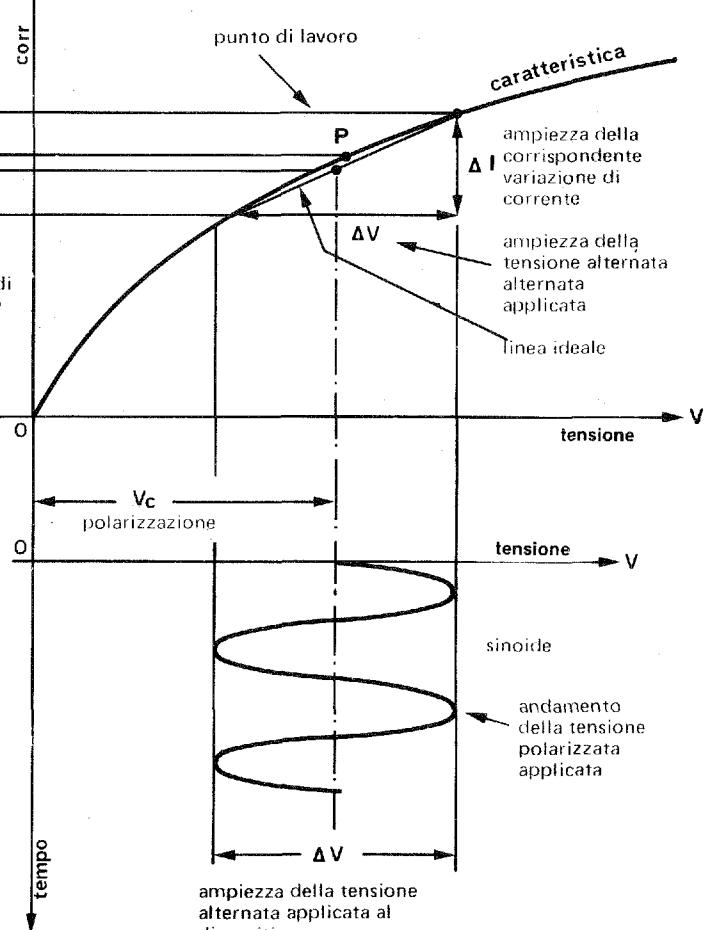
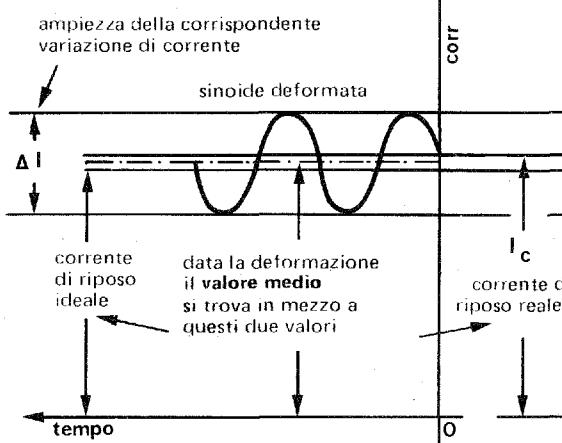
Le oscillazioni di tensione che applichiamo ai suoi capi creano delle oscillazioni di corrente di forma distorta e il valore della corrente di riposo non coincide più con il valore medio.

Osserviamo le figure con tutti i loro commenti e confrontiamole con quelle del foglio 11.72-2

La corrente di riposo reale è la sola componente continua che attraversa il dispositivo quando manca la componente alternata della tensione applicata (è presente la sola tensione di polarizzazione)

Data la curvatura caratteristica, non si può più parlare di "pendenza" sul punto di lavoro, ma di "pendenza" media, cioè di **resistenza differenziale apparente** nell'intorno del punto di lavoro.

$$\text{Essa è data ancora da } \frac{\Delta V}{\Delta I} = R_d$$

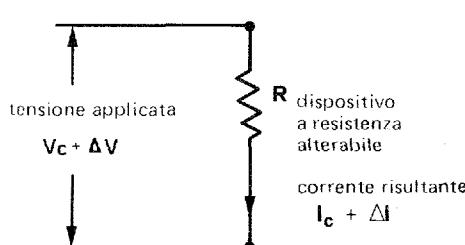


La **resistenza statica** è sempre rappresentata dal rapporto

$$R_s = \frac{V_c}{I_c}$$

cioè fra

e       $\frac{\text{la tensione di polarizzazione}}{\text{la corrente di riposo reale}}$



Schema di collegamento del dispositivo a resistenza alterabile

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 11.74 Pagina 4

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 11	Tensione Corrente Resistenza
Paragrafo : 11.7	Resistenza statica e resistenza differenziale
Argomento : 11.74	Elementi a caratteristica non lineare. Evidenze e definizioni

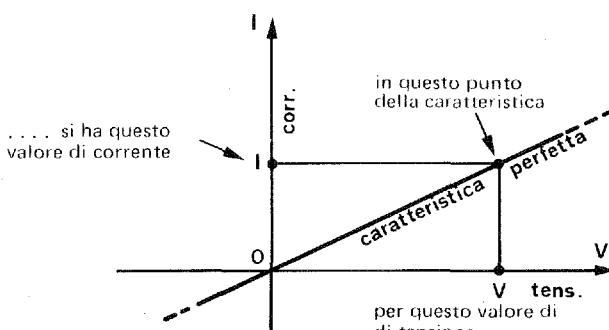
### CONFRONTI CON LA RESISTENZA STATICIA

Il concetto di semplice resistenza prima conosciuto, cioè quello per il quale per ogni valore di tensione corrisponde un valore di corrente, prende ora il nome di resistenza statica non solo per distinguerlo da quello di resistenza dinamica o differenziale, ma anche perché la resistenza statica assume un significato leggermente differente da quello di resistenza perfetta.

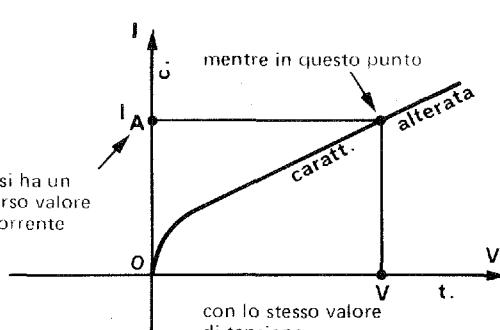
(vedi 11.71-1).

Esaminiamo due caratteristiche aventi la stessa inclinazione.

#### 1) Caratteristica di resistenza perfetta



#### 2) Caratteristica di resistenza alterata

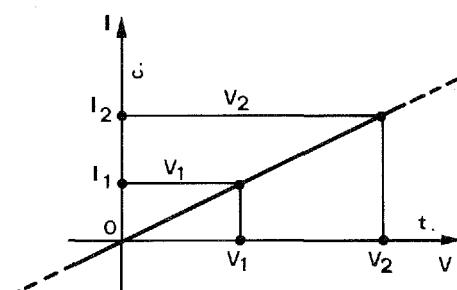


E' evidente che vale anche il ragionamento inverso, cioè che per uno stesso valore di corrente si hanno due diversi valori di tensione nei due casi.

Ripetiamo i diagrammi per dare ulteriori spiegazioni sui concetti di resistenza e ripetiamo che in entrambi i casi il significato di resistenza è legato al rapporto

$$\text{resistenza in ohm} \quad R = \frac{V}{I} \quad \begin{matrix} \text{tensione applicata in volt} \\ \text{diviso} \\ \text{la corrispondente corrente in ampere} \end{matrix}$$

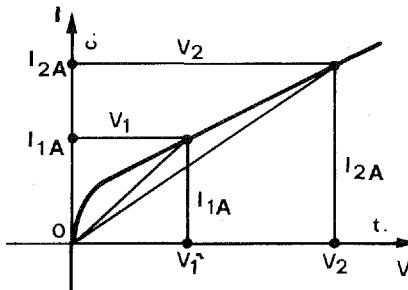
Mentre nel caso di resistenza perfetta



... il valore della resistenza statica è unico ed immutabile per qualsiasi punto della caratteristica

I triangoli rettangoli formati con i rispettivi valori di tensione e di corrente sono simili e le ipotenuse sono allineate

Mentre nel caso di resistenza alterata



... il valore della resistenza statica cambia per ogni punto della caratteristica.

I triangoli rettangoli formati con i rispettivi valori di tensione e di corrente non sono simili e le ipotenuse non sono allineate.

### RESISTENZA DIFFERENZIALE POSITIVA E NEGATIVA

**Segno di un intervallo  $\Delta$  (differenziale finito)**

Con il simbolo  $\Delta$  (delta maiuscola) si intende la differenza fra due valori di una stessa grandezza (si dice anche: intervallo di valori).

Questa differenza, per un intervallo di due valori ( $X_2 - X_1$ ) è

- + ) positiva, se  $X_2$  è maggiore di  $X_1$  ( $X_2 > X_1$ )
- ) negativa, se  $X_2$  è minore di  $X_1$  ( $X_2 < X_1$ ).

**Segno di un rapporto differenziale**

Se due grandezze appartenenti allo stesso fenomeno vengono messe in correlazione, come potrebbero essere tensione ( $V$ ) e corrente ( $I$ ) in un dispositivo, bisogna star bene attenti di assumere i valori corrispondenti quando si vuol determinare un rapporto differenziale.

I valori corrispondenti sono quelli contrassegnati con lo stesso indice;

Nel nostro caso si intenderà per

$$\Delta V \text{ il valore differenziale } V_2 - V_1$$

per

$$\Delta I \text{ il corrispondente valore } I_2 - I_1$$

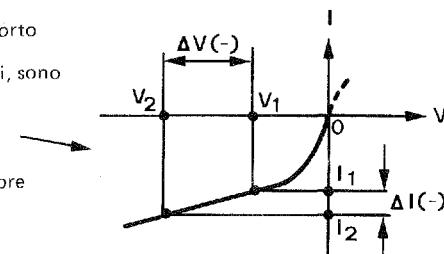
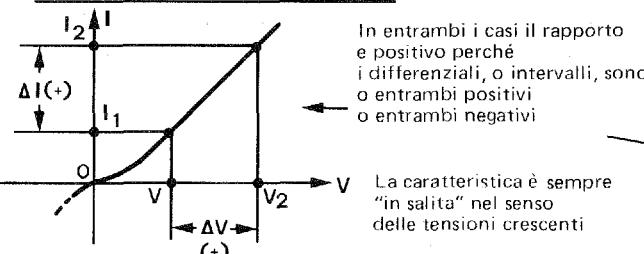
La resistenza differenziale già nota come il rapporto  $R_d = \frac{\Delta V}{\Delta I}$

si può scrivere anche come il rapporto

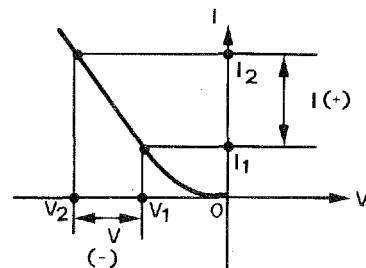
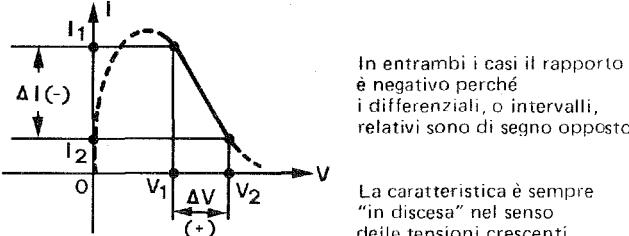
$$R_d = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$$

Vediamo negli esempi che seguono i vari valori e segni che questo rapporto può assumere.

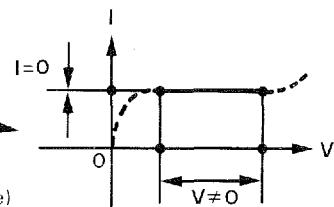
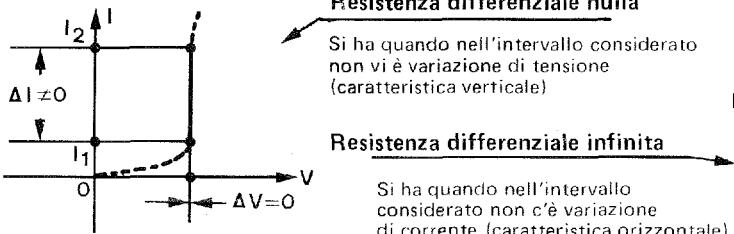
#### + ) Resistenza differenziale positiva



#### - ) Resistenza differenziale negativa



#### lim.) Valori limite



#### Resistenza differenziale nulla

Si ha quando nell'intervallo considerato non vi è variazione di tensione (caratteristica verticale)

#### Resistenza differenziale infinita

Si ha quando nell'intervallo considerato non c'è variazione di corrente (caratteristica orizzontale)

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 11.74

Pagina 6

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 11	Tensione Corrente Resistenza
Paragrafo : 11.7	Resistenza statica e resistenza differenziale
Argomento : 11.74	Elementi a caratteristica non lineare. Evidenze e definizioni.

### ESAME GENERALE DI UNA CARATTERISTICA TENSIONE-CORRENTE

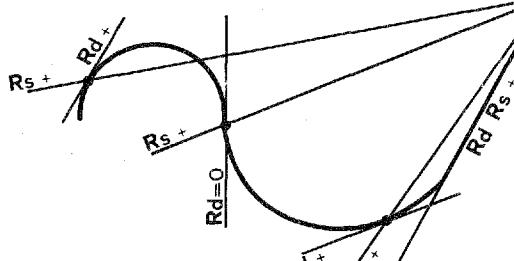
Per riassumere i concetti fin qui espressi esaminiamo due caratteristiche appositamente costruite:

$$R_d = \text{Resistenza differenziale} \quad R_s = \text{Resistenza statica}$$

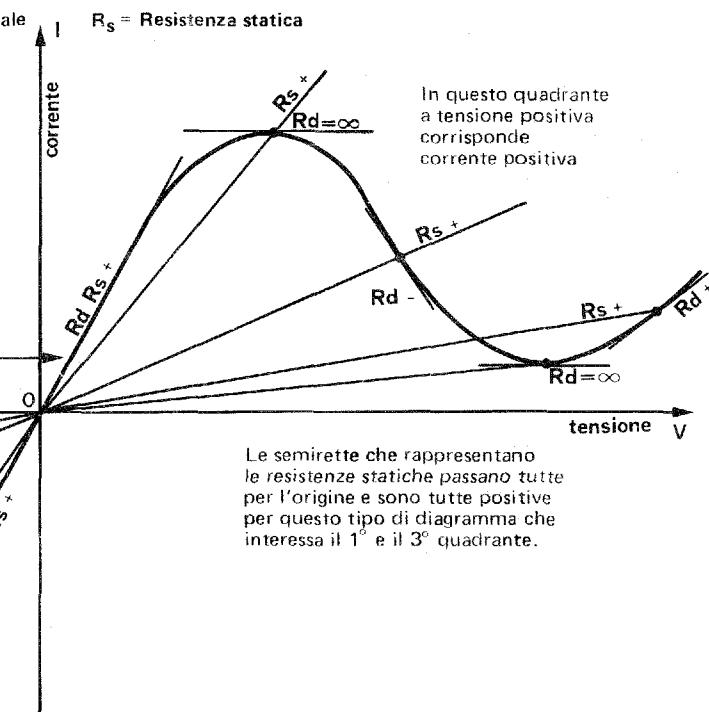
Caso A - Caratteristica di un bipolo passivo



Solo nel tratto rettilineo passante per l'origine la  $R$  statica è uguale alla  $R$  differenziale.



In questo quadrante a tensione negativa corrisponde corrente negativa



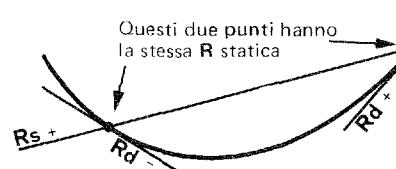
Caso B - Caratteristica di un bipolo attivo

Le semirette che rappresentano le resistenze statiche passano tutte per l'origine.

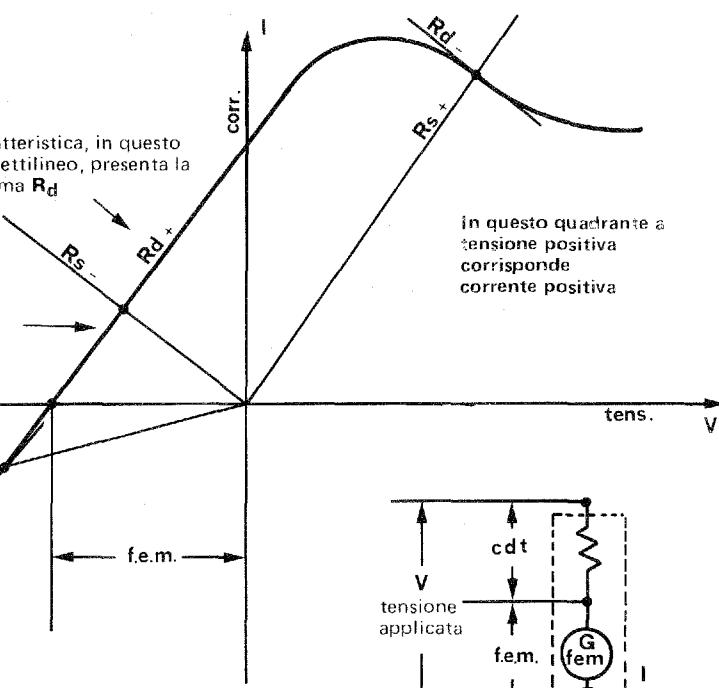
La caratteristica, in questo tratto rettilineo, presenta la medesima  $R_d$

In questo quadrante a tensione negativa corrisponde corrente positiva

I punti che giacciono sulla caratteristica compresa in questo quadrante si riferiscono a tensioni applicate inferiori alla f.e.m.



In questo quadrante a tensione negativa corrisponde corrente negativa



Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	:	12.0	Indice del capitolo
Argomento	:	12.00	Indice dei paragrafi

Codice	12.00	Pagina	1
--------	-------	--------	---

## Capitolo 12

# GRANDEZZE FONDAMENTALI ELETTROMAGNETICHE, MAGNETICHE, ELETTROSTATICHE

### Indice dei paragrafi e degli argomenti

#### par. 12.0 — Generalità

- arg. 12.00 — Indice delle pagine
- " 12.01 — Indice analitico
- " 12.02 — Bibliografia
- " 12.05 — Cenni preliminari - Campi

#### par. 12.1 — Elettromagnetismo, Forza magnetomotrice, Flusso magnetico, Riluttanza

- arg. 12.10 — Indice delle pagine
- " 12.11 — Magneti e flusso
- " 12.12 — Corrente elettrica e magnetismo
- " 12.13 — Forza magnetomotrice
- " 12.14 — Flusso magnetico
- " 12.15 — Legge di Ohm magnetica

#### par. 12.2 — Elettromagnetismo, Induzione elettromagnetica

- arg. 12.20 — Indice delle pagine
- " 12.21 — Definizione del fenomeno
- " 12.22 — Legge di Lenz
- " 12.23 — Applicazioni pratiche della legge di Lenz
- " 12.24 — Il trasformatore come generatore di energia elettrica
- " 12.25 — Induttanza e mutua induzione

#### par. 12.3 — Elettromagnetismo in corrente alternata

- arg. 12.30 — Indice delle pagine
- " 12.31 — Ricapitolazione
- " 12.32 — F.e.m. nel circuito elettromagnetico
- " 12.33 — Caratteristiche del trasformatore

#### par. 12.4 — Azioni elettrodinamiche

- arg. 12.40 — Indice delle pagine
- " 12.41 — Attrazione magnetica
- " 12.42 — Repulsione magnetica
- " 12.43 — Spinta su un conduttore attraversato da corrente

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.00	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.0	Indice del capitolo
		Argomento : 12.00	Indice dei paragrafi

par. 12.5 — Magnetostatica

- arg. 12.50 — Indice delle pagine
- " 12.51 — Magneti permanenti
- " 12.52 — Campi magnetostatici

par. 12.7 — Elettrostatica

- arg. 12.70 — Indice della pagine
- " 12.71 — Carica elettrica e campo elettrostatico
- " 12.72 — Valore relativo del potenziale
- " 12.73 — Flusso elettrostatico e carica elettrica
- " 12.74 — Densità di carica e gradiente di tensione
- " 12.75 — Condensatore e capacità

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	:	12.0	Indice del capitolo
Argomento	:	12.00	Indice del paragrafo

Codice	Pagina
12.00	1

## Paragrafo 12.0

### INDICE

#### Indice degli argomenti e delle pagine

##### arg. 12.01 — Cenni preliminari, Campi

pag. 1 — Panoramica sistematica dei fenomeni che riguardano il presente capitolo.

- Sequenza didattica
- Elettromagnetismo
- Magnetismo
- Elettrostatica
- Conclusione

pag. 2 — Definizioni di

- Campo elettrico
- Campo magnetico
- Campo gravitazionale
- Campo in generale

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.01	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche - Magnetiche - Eletrostatiche
		Paragrafo : 12.0	Generalità

Argomento : 12.01 Indice analitico

12.11-2	ago magnetico	12.11-1	— “
12.13-2	amperspira	12.11-2	-- — (direzione)
12.41	attrazione magnetica	12.14-2	— — unità di misura
12.52-2	autoinduzione	12.24-2	— smagnetizzante
12.13-2	avvolgimento	12.22	forza elettromotrice indotta
12.24-2	— primario	12.31-2	“ “ “ ”
12.24-2	— secondario	12.23	“ “ “ ”
12.4	azioni elettrodinamiche	12.13-1	— magnetomotrice
12.13-2	bobina	12.13-2	— — unità di misura
12.23-6	-- magnetizzante	12.15-1	Hopkinson
12.05-2	campo elettrico	12.74	gradiente di tensione
12.71	“ “	12.25-5	induttori in serie
12.05-2	-- gravitazionale	12.25-6	— in parallelo
12.05-2	— in generale	12.32-2	— in alternata
12.05-2	— magnetico	12.2	induzione elettromagnetica
12.12-1	— “	12.22-1	— magnetica
12.52-2	— — terrestre	12.15-1	legge di Hopkinson
12.24-2	— magnetizzante	12.22-1	— di Lenz
12.52	— magnetostatico	12.15-1	— di Ohm magnetica
12.71	carica elettrica	12.22-1	Lenz
12.71-1	— — negativa	12.11-2	linee di flusso magnetico
12.71-1	— — positiva	12.12-1	“ “ “ ”
12.25-2	coefficiente di autoinduzione	12.24-1	macchine elettriche in generale
12.25-3	-- — mutua induzione	12.51	magneti naturali
12.75	condensatore	12.5	— permanenti
12.75-2	— modifica costante dielettrica	12.01-1	magnetismo
12.75-3	— — distanza armature	12.5	magnetostatica
12.75-4	— — superficie armature	12.14-1	nucleo magnetico
12.31-1	corrente indotta	12.12-2	Oersted (esperimenti di)
12.33-2	— secondaria	12.12-1	permeabilità magnetica
12.24-2	— smagnetizzante	12.15-1	permeanza
12.33	correnti parassite	12.13-1	poli magnetici
12.74-2	costante dielettrica assoluta	12.13-1	polo nord magnetico
12.73-2	“ “ “ ”	12.13-1	polo sud magnetico
13.22-4	costante di tempo RC	12.71-2	potenziale della carica
12.71-1	Coulomb	12.71-2	— di riferimento
12.73-2	densità di carica	12.33	rapporto di trasformazione
12.74	“ “ “ ”	12.23-1	regola di Fleming
12.22-1	— di flusso magnetico	12.23-1	— della mano destra
12.52-1	— “ “ ” ”	12.43-1	— della mano sinistra
12.73-2	dielettricità	12.42	repulsione magnetica
12.11-2	direzione del flusso magnetico	12.72	segno reciproco di cariche elettriche
12.52-1	“ “ “ ” ” ”	12.13-1	solenoide
12.12-4	— segni convenzionali	12.13-2	spire
12.01-1	elettromagnetismo	12.14-1	traferro
12.2	“ ”	12.32-1	trasformatore
12.3	— in corrente alternata	12.24-1	“ ”
12.01-1	elettrostatica	12.33	“ ”
12.7	“ ”	12.33-3	— rapp. di trasf. di corrente
12.25	energia cinetica delle cariche	12.33-1	— — — — tensione
12.71	— elettrostatica	12.14-2	unità di misura del flusso magnetico
12.52-2	flusso disperso	12.13-2	— — — della forza magnetomotrice
12.73	— elettrostatico	12.14-2	weber
12.14-1	— magnetico		

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 12 Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche  
 Paragrafo : 12.0 Generalità  
 Argomento : 12.02 Bibliografia

Codice 12.02 Pagina 1

— LIBRI —

Abbreviazione	Autore	Titolo	Editore
Bottani	E. Bottani R. Sartori	Lezioni sui fondamenti dell'Elettronica	Libreria Editrice Politecnico 1944
Colombo	A. Colombo	Manuale dell'ingegnere	Hoepli 1947
Mondani	F. Mondani	Elementi di elettronica e di elettrotecnica 2 voll.	Trevisini 1966
Giometti	R. Giometti F. Frascari	Elettrotecnica Elettronica Radiotecnica	Calderini 1 vol. 1973 2 vol. 1974
E.S.T.		Enciclopedia della Scienza e della Tecnica	Mondadori 1965

— RIVISTE —

Sigla	Titolo	Editore
TA	Tecniche dell'Automazione	ETAS KOMPASS
Sp	Sperimentare	J.C.E.
S.R.	Selezione Radio TV	J.C.E.
E.O.	Elettronica Oggi	Gruppo Editoriale Jackson

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 12 Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche  
 Paragrafo : 12.0 Generalità  
 Argomento : 12.05 Cenni preliminari - Campi

Codice Pagina  
**12.05** **1**

## PANORAMICA SISTEMATICA DEI FENOMENI CHE RIGUARDANO IL PRESENTE CAPITOLO

### SEQUENZA DIDATTICA

Contrariamente alle abitudini di introdurre la materia di insegnamento secondo i tempi storici relativi alla scoperta dei fenomeni fondamentali sotto i quali gli argomenti vengono inquadrati, abbiamo qui preferito dare la precedenza a quelle grandezze che più frequentemente riguardano l'elettronica.

Questo non significa che gli uni siano più importanti degli altri: sono tutti ugualmente importanti e l'ignoranza di qualche argomento può creare delle gravi lacune sul proseguimento dello studio, soprattutto in questa fase che riguarda la conoscenza delle grandezze fondamentali.

Daremo perciò la sequenza illustrata in questa pagina.

### ELETTROMAGNETISMO

E' la scienza dell'elettrone in movimento.

E' cioè lo studio di quei fenomeni che si producono quando esso si muove. E non basta. Se esso è in fase di accelerazione o di rallentamento, se ne producono anche altri e non meno importanti.

Sono questi fenomeni che governano la vita di oggi.

I motori elettrici, le antenne, i microfoni, la radio, la televisione, gli strumenti più svariati, sfruttano largamente questi fenomeni.

Si può dire che non ci sia campo della tecnologia come dell'artigianato più primordiale che non si avvalga di qualcosa di elettromagnetico, sia esso un trapano a mano o il motore elettrico che muove il tornio primitivo del vasaro.

### MAGNETISMO

Il mistero sulla natura dei magneti pare oggi completamente risolto.

Si è dovuto indagare nell'interno dell'atomo per trovare la soluzione che si associasse al concetto di movimento dell'elettrone al livello della sua rotazione attorno al nucleo.

Non ne faremo cenno in questa trattazione di base perché ci porterebbe lontano dallo scopo che vogliamo raggiungere.

Ne sarà riservato un paragrafo particolare nel capitolo riguardante la fenomenologia.

### ELETTROSTATICA

E' la scienza dell'elettrone come carica elettrica in sè: sia essa ferma o in moto. Il problema della staticità nasce solo dal fatto che, per affrancarne lo studio dai fenomeni elettromagnetici, è indispensabile indagare l'elettrone fermo.

Questa scienza è forse la prima in ordine storico ed i relativi fenomeni propedeutici sono forse anche i più semplici da immaginare.

Essa è partita da un fenomeno associato ad un materiale, l'ambra, che nell'antica Grecia si chiamava "electron" e che, strofinato, attirava peli e frammenti di foglie secche. Ed è questo nome che ha battezzato l'intero ramo della Fisica che si chiama Elettricità.

### CONCLUSIONE

L'arte di far ballare le danze più frenetiche a miliardi di elettroni, facendoli oscillare al ritmo che ci interessa e facendo interagire elettromagnetismo ed elettrostatica, passa con il nome di Elettronica.

## DEFINIZIONI DI CAMPO ELETTRICO, MAGNETICO, GRAVITAZIONALE

Si ricerca una definizione di campo in generale attraverso lo studio di fenomeni in particolare.

### Campo gravitazionale

Il sasso che cade e il moto dei pianeti sono fenomeni ormai tradizionali per spiegare che fra due masse si forma una forza di attrazione.

Un punto qualsiasi dello spazio dove sono presenti più masse, sarà soggetto ad una forza "gravitazionale" che corrisponderà alla risultante vettoriale della interazione delle singole forze.

Le linee che costituiscono il luogo geometrico delle direzioni delle varie risultanti, danno un'idea dell'andamento del campo gravitazionale ed esse stesse si chiamano anche linee del flusso gravitazionale.

Il filo a piombo è lo strumento più semplice, più caratteristico e preciso della direzione della forza di gravitazione.



### Campo magnetico

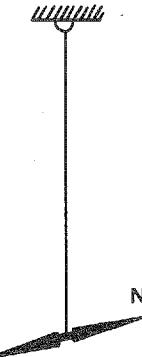
Nello spazio non ci sono solo forze gravitazionali.

Infatti, se lasciamo libero di ruotare in qualsiasi direzione l'ago magnetico di una bussola, esso non indicherà la stessa direzione del filo a piombo, ma in genere un'altra, che da noi qui è abbastanza vicina alla orizzontale.

L'ago magnetico è dunque sensibile ad una forza di natura magnetica.

Se seguiamo la direzione dell'ago traceremo una linea di forza magnetica. In un altro punto dello spazio passerà un'altra linea.

Tutte insieme queste linee danno un'idea precisa dell'andamento del campo magnetico in quella regione di spazio.

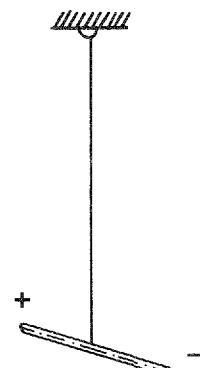


### Campo elettrico

Nello spazio ci sono anche altre forze, come per esempio quella elettrica.

Prendiamo il classico bastoncino di materiale resinoso ed isolante come la plastica, sfreghiamola: esso si caricherà elettricamente.

Sospendiamolo ad un filo sottile, insensibile alla torsione. Il fenomeno qui sarà difficile da realizzare data la modestia delle forze in gioco, comunque ci renderemo conto che nello stesso punto dove abbiamo fatto i due esperimenti precedenti, ci troveremo di fronte ad una terza forza; quella del campo elettrostatico.



### Campo in generale

Quelli descritti sono i campi che più frequentemente lo studioso di elettronica dovrà trattare.

E' evidente che qualsiasi altro fattore che produca una forza, è sede di un campo che prenderà il nome della natura del fenomeno in questione.

Questi campi possono essere in correlazione con quelli fino a qui nominati, o fra di loro, o essere assolutamente indipendenti.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	:	12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomotrice - Flusso - Riluttanza
Argomento	:	12.10	Indice del paragrafo

APPUNTI DI ELETTRONICA	
Codice	Pagina
12.10	1

## Paragrafo 12.1

# ELETTROMAGNETISMO, FORZA MAGNETOMOTRICE, FLUSSO MAGNETICO, RILUTTANZA

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 12.11 — Magneti e flusso

- pag. 1 — Il flusso magnetico non si può interrompere come una corrente elettrica
- “ 2 — Direzione del flusso magnetico

arg. 12.12 — Corrente elettrica e magnetismo

- pag. 1 — Concetti di campo e flussi magnetici
- “ 2 — Esperimenti di Oersted su conduttori percorsi da corrente
- “ 3 — La corrente elettrica genera campo magnetico
- “ 4 — Segni convenzionali per la direzione della corrente elettrica e del conseguente flusso magnetico

arg. 12.13 — Forza magnetomotrice

- pag. 1 — Concetto di forza magnetomotrice  
Poli magnetici
- “ 2 — Intensità e unità di misura

arg. 12.14 — Flusso magnetico

- pag. 1 — Concetto di flusso magnetico
- “ 2 — Unità di misura

arg. 12.15 — Legge di Ohm magnetica

- pag. 1 — Definizione della legge  
Riluttanza - Permeanza
- “ 2 — Considerazioni ed analogie

Sezione :	1	Grandezze fondamentali
Capitolo :	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo :	12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomotrice - Flusso - Riluttanza
Argomento :	12.11	Magneti e flusso

## IL FLUSO MAGNETICO NON SI PUO' INTERROMPERE COME UNA CORRENTE ELETTRICA

Dopo un breve cenno storico si stigmatizza l'imprescindibilità del flusso magnetico dalla forza magnetomotrice.

### **Magneti naturali**

La presenza di campi magnetici permanenti era nota fin dall'antichità attraverso il fenomeno dell'attrazione dei materiali ferrosi da parte di sostanze naturali, che furono chiamate prima "calamite" e poi magneti permanenti.

### **Elettromagneti**

Con l'invenzione della corrente elettrica si scoperse che

#### **una carica elettrica in movimento**

crea fenomeni magnetici del tutto identici a quelli fino allora conosciuti.

Gli studiosi si diedero da fare per dare una struttura organica a tutti i fenomeni inerenti al magnetismo, fosse esso naturale, permanente o creato artificialmente mediante movimento delle cariche (corrente elettrica).

Siamo intorno all'anno 1815 ed i fisici che se ne occuparono maggiormente furono Oersted e Ampere.

### **Esperimenti**

La direzione di questo "*influsso*", poi chiamato "*flusso*", cioè:

*corrente (da fluo, fluere = scorrere) magnetica,*

veniva inseguita da Oersted con lo stesso ago magnetico che fino allora veniva soltanto usato nelle bussole per indicare il Nord.

### **Caratteristica del flusso magnetico**

Si scoperse così che il flusso magnetico esiste sempre attorno ad ogni dipolo magnetico elementare generatore di magnetismo.

In altre parole, il flusso magnetico non si può interrompere come si può fare con una corrente elettrica: esso si chiuderà sempre, anche attraverso il vuoto, attorno al suo dipolo generatore naturale (magnete permanente) o artificiale (corrente elettrica).

### **Il flusso magnetico può soltanto essere deviato**

Quando esiste un generatore di magnetismo in una determinata zona, essendo impossibile interrompere il flusso che si sprigiona,

se non si può

- a) eliminare la sorgente di magnetismo, cioè togliere o allontanare il magnete permanente o arrestare la corrente che la genera,

si potrà

- b) deviare il flusso stesso, cioè fargli fare un altro percorso attraverso sostanze, generalmente ferrose, attraverso le quali il flusso magnetico preferisce passare (schermatura magnetica).

### **Prologo del paragrafo**

Vedremo nelle pagine che seguono, come l'uomo si sia impadronito di questi fenomeni per costruire macchine ed apparecchi che caratterizzano la vita moderna.

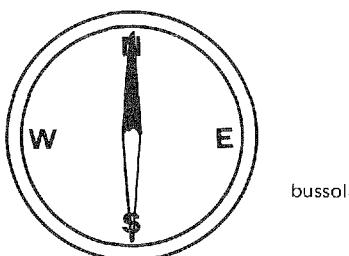
**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice **12.11** Pagina **2**

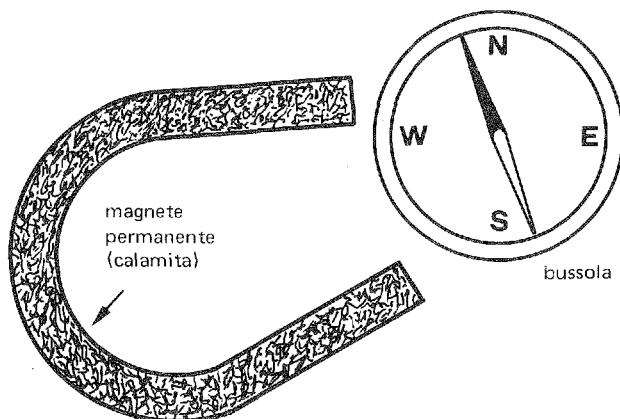
Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomotrice - Flusso - Riluttanza
Argomento : 12.11	Magneti e flusso

### DIREZIONE DEL FLUSSO MAGNETICO

Attraverso fenomeni già noti nel passato si determina la direzione del flusso magnetico.



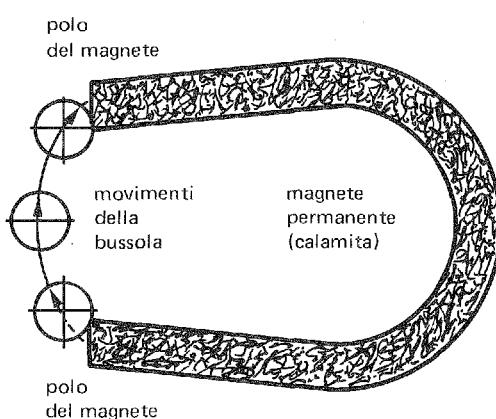
L'ago magnetico di una bussola indica il Nord, perché la Terra è un magnete permanente naturale i cui poli sono abbastanza vicini ai corrispondenti poli geografici. I poli magnetici di nome opposto hanno la facoltà di attrarsi.



Supponiamo ora di avere una bussola abbastanza piccola da poterla muovere facilmente in una zona attorno ai poli di un magnete permanente.

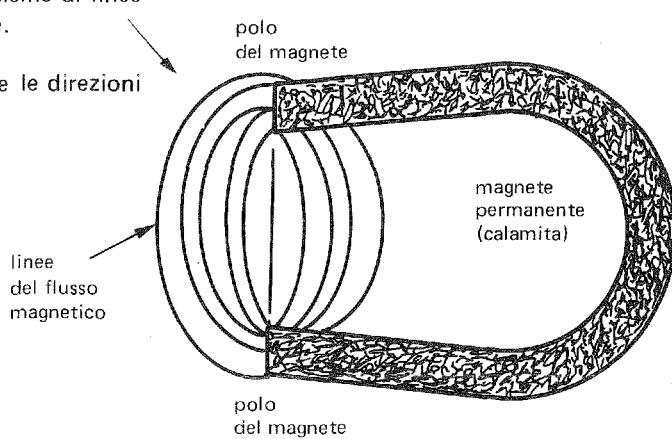
Sistemata la bussola in un punto, effettuiamo dei piccoli movimenti, seguendo la direzione che man mano sarà indicata dall'ago, sia in avanti che indietro.

Supponiamo inoltre che questi movimenti lascino una traccia in corrispondenza dell'asse di rotazione dell'ago, avremo tracciato una linea che va da un polo all'altro del magnete.



Se poi poniamo la bussola in altri punti della zona non appartenenti a linee già tracciate e continuiamo l'esperimento, alla fine avremo tracciato un insieme di linee che vanno da un polo all'altro del magnete.

Abbiamo esplorato il campo magnetico e le direzioni del flusso.



Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomotr. - Flusso magnet. - Ril.
Argomento : 12.12	Corrente elettrica e magnetismo

## CONCETTO DI CAMPO E FLUSSO MAGNETICI

L'elettromagnetismo è il cardine del modo di vivere moderno.

### Individuare e sfruttare il fenomeno

La maggiore difficoltà che si incontra nell'apprendimento dei fenomeni elettromagnetici è principalmente dovuta al fatto che è impossibile concepire un circuito magnetico aperto poiché non esistono in natura sostanze magneticamente isolanti o comunque refrattarie a lasciarsi attraversare dal flusso magnetico.

La stessa aria e perfino il vuoto, come anche i materiali cosiddetti "*non magnetici*", sono buoni conduttori di magnetismo: si dicono infatti magneticamente **permeabili**.

Per questo motivo noi viviamo immersi in una specie di fluido magnetico orientato, dal quale siamo anche attraversati come qualsiasi oggetto.

Questo fluido magnetico è orientato senza essere in movimento, cambia direzione più o meno lentamente, oscilla, vibra anche ad altissime frequenze, ma non c'è nulla di magnetico che si muova.

Ci sono sì le cariche che, per generare il magnetismo, è indispensabile che siano in movimento, ma queste sono elettriche, non magnetiche.

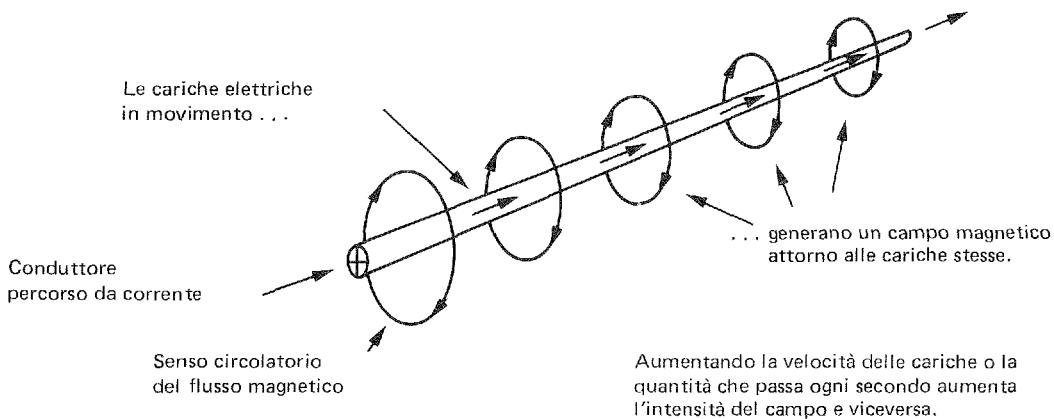
Il magnetismo è uno stato della materia, un modo di essere che obbedisce a certe leggi che l'uomo ha cercato di scoprire per renderle intelligibili alla sua mentalità finita e per sfruttare le proprietà del magnetismo stesso per crearsi un ambiente più confortevole di vita.

Questo fluido orientato lo dobbiamo immaginare in movimento, anche se non lo è, per infiniti canali che costituiscono le "*linee di forza*" di questo flusso.

Ma il "*tracciato*" di questi canali e la direzione stessa di "*percorrenza*" variano da punto a punto e da istante a istante a causa dell'influenza combinata di varie cause naturali e artificiali come qui sotto inquadrare.

Cause	Naturali	Artificiali
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generatori di campo magnetico costante, variabile o alternato a qualsiasi frequenza.</li> <li>- Materiali meglio permeabili al magnetismo che ne deviano il flusso verso di loro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La Terra</li> <li>- Il Sole</li> <li>- Lo Spazio interstellare</li> <li>- Il nucleo centrale della Terra</li> <li>- Giacimenti di ferro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energia elettrica</li> <li>- Radio e Televisione</li> <li>- Energia atomica</li> <li>- Tutti quegli oggetti di ferro che costituiscono il micromondo dove ognuno di noi vive</li> </ul>

All'origine del fenomeno descritto ci sono le cariche elettriche **in movimento**.

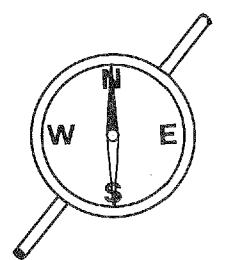


### ESPERIMENTI DI OERSTED SU CONDUTTORI PERCORSI DA CORRENTE

Si esamina ciò che succede ponendo una bussola sopra e sotto un conduttore percorso o no da corrente elettrica.

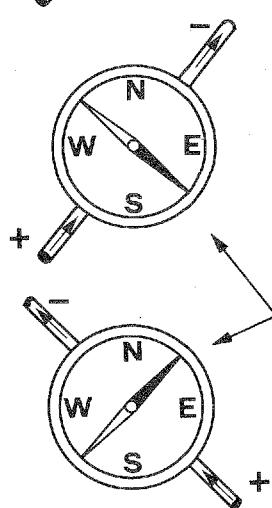
L'esame degli esperimenti viene effettuato parallelamente nelle due seguenti posizioni:

Bussola "sopra" il conduttore



Conduttore non percorso da corrente

L'ago della bussola indica tranquillamente il Nord, in entrambi i casi.



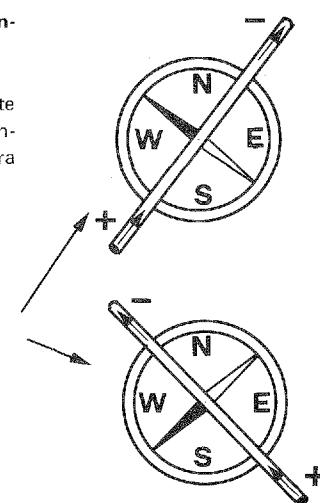
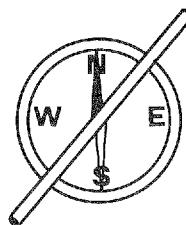
Conduttore percorso da corrente continua nel senso indicato dalle frecce

L'ago della bussola si dispone perpendicolarmente al conduttore e rispetto chi guarda tenendo il mento dalla parte della corrente entrante, la punta nera dell'ago si trova:

in questo caso verso destra

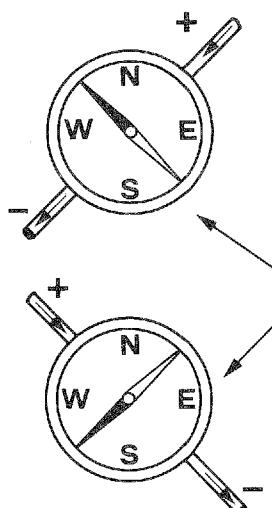
in questo caso verso sinistra

Bussola "sotto" il conduttore



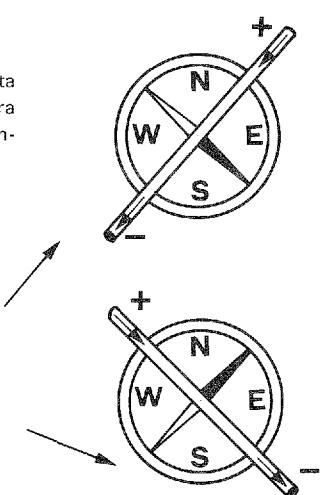
Invertendo il senso della corrente continua

si invertono anche i movimenti dell'ago, ma resta fermo il principio che, rispetto chi guarda la figura tenendo il mento dalla parte della corrente entrante, la punta nera dell'ago si trova:



in questo caso sempre verso destra

in questo caso sempre verso sinistra



**Attenzione:** Quale senso della corrente si è assunto quello convenzionale delle cariche positive, cioè quello secondo il quale la corrente esce dal polo positivo del generatore ed entra nel polo positivo dell'utilizzatore.

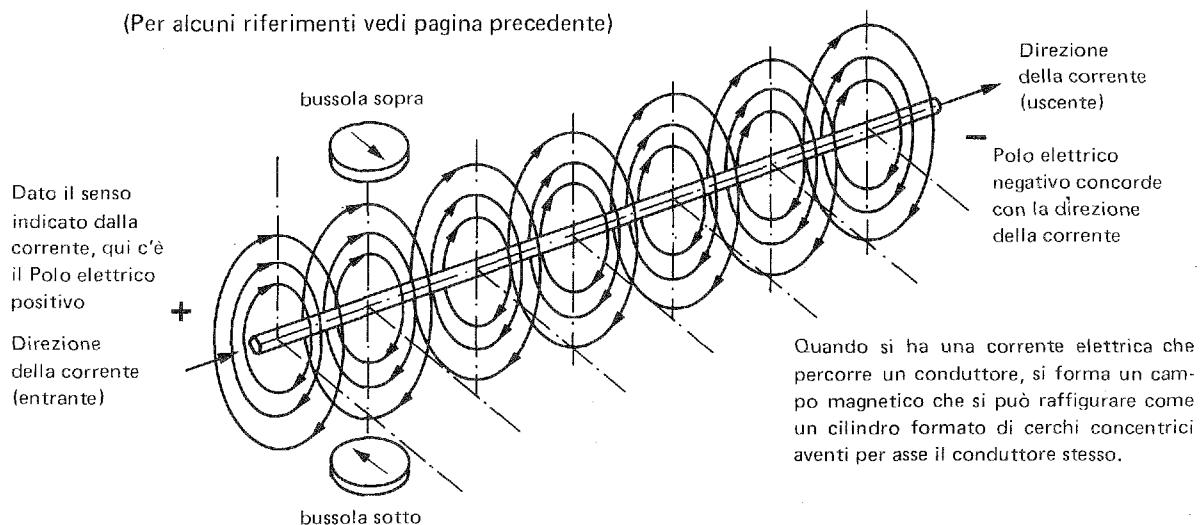
Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 12 Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche  
 Paragrafo : 12.1 Elettromagnet. - Forza magnetomotr. - Flusso - Riluttanza  
 Argomento : 12.12 Corrente elettrica e magnetismo

### LA CORRENTE ELETTRICA GENERA CAMPO MAGNETICO

Si illustra la più importante conclusione dell'esperienza di Oersted e si stabiliscono alcune norme convenzionali universali.

#### Campo e circuito magnetico

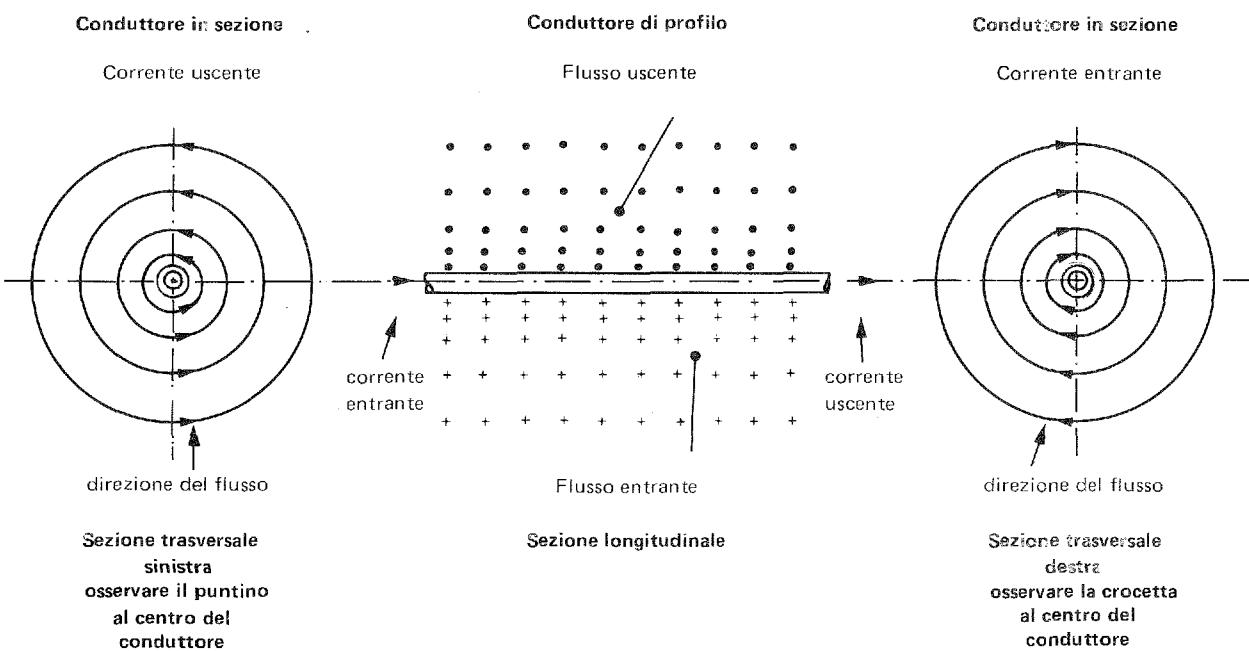
(Per alcuni riferimenti vedi pagina precedente)



La direzione del campo è quella oraria per chi vede la corrente dalla parte entrante del conduttore.

**Simboli convenzionali** - per l'interpretazione proiettiva dei disegni.

Le dizioni "entrante" e "uscente" si riferiscono al piano di vista del presente foglio.



**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice **12.12** Pagina **4**

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.1	Elettromagnetismo - Forza elettromotr. Flusso magn. - Rilutt.
Argomento : 12.12	Corrente elettrica e magnetismo

**SEGNI CONVENZIONALI PER LA DIREZIONE DELLA CORRENTE ELETTRICA  
E DEL CONSEGUENTE FLUSSO MAGNETICO**

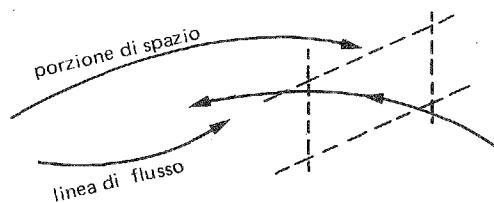
Clarificazione di alcuni concetti per facilitare l'apprendimento degli argomenti che seguono.

Nel dominio dell'elettronica è ben raro che le cariche si muovano da sole o che siano concentrate in un punto.

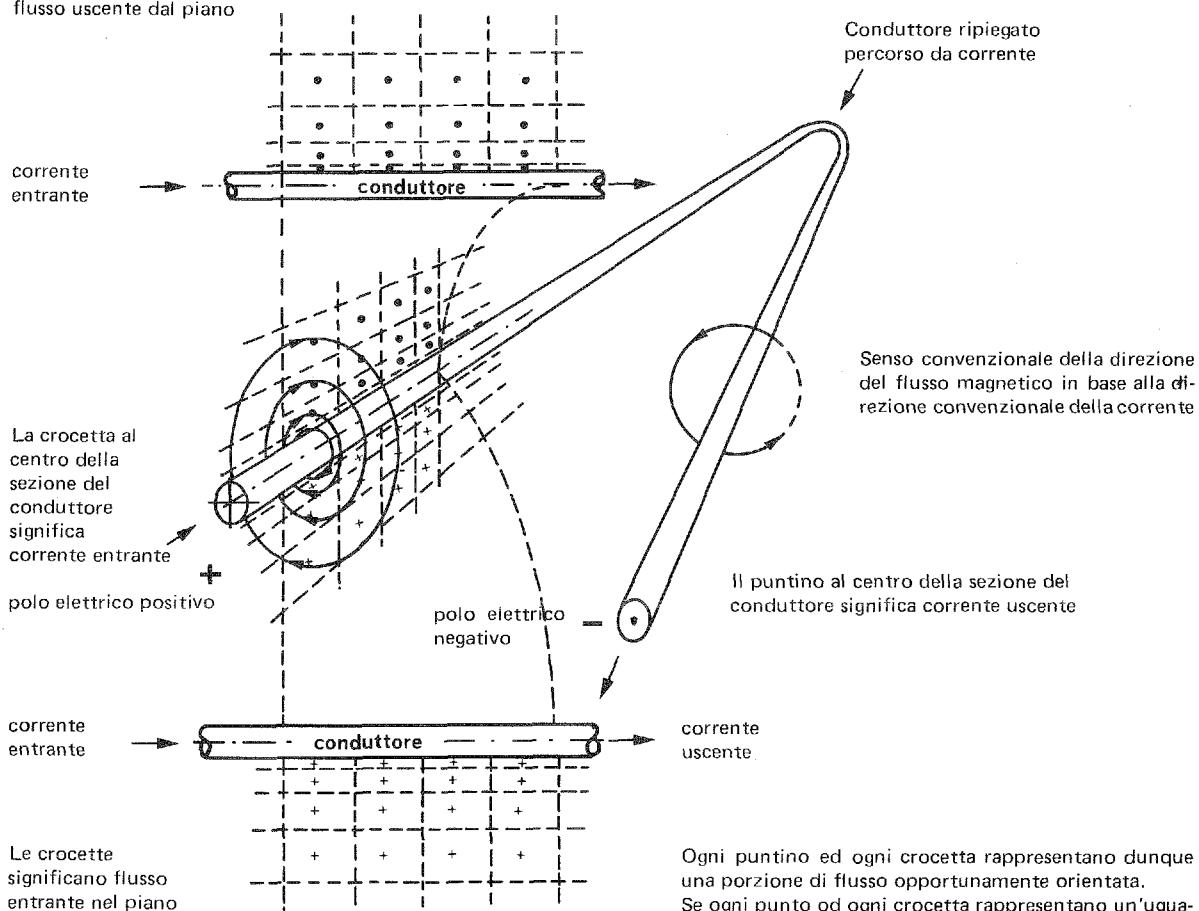
Perciò è inutile andare a cercarsi le linee di flusso perché non esistono, in quanto il campo magnetico è distribuito con continuità nello spazio circostante alle cariche in movimento, anche esse distribuite con continuità nel conduttore.

L'intensità del campo magnetico sarà maggiore nei punti più vicini alla carica elettrica in movimento e andrà diminuendo nei punti man mano più lontani.

Noi poveri mortali dobbiamo pure trovare una rappresentazione simbolica e concentriamo idealmente tutto il flusso magnetico che attraversa una porzione di piano dello spazio circostante perpendicolare alla direzione del flusso



I puntini significano  
flusso uscente dal piano



Ogni puntino ed ogni crocetta rappresentano dunque una porzione di flusso opportunamente orientata. Se ogni punto od ogni crocetta rappresentano un'uguale quantità di flusso, esse verranno segnate diradantesi, allontanandosi dal conduttore poiché anche il flusso stesso diminuisce d'intensità, man mano che si trova più lontano dal conduttore.

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomototr. - Flusso magn. - Rilutt.
Argomento : 12.13	Forza magnetomotrice

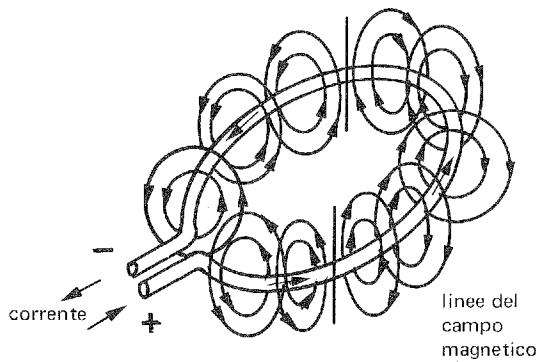
### CONCETTO DI FORZA MAGNETOMOTRICE - POLI MAGNETICI

Se il flusso magnetico è come una "corrente" statica, dovrà ben esistere una sorgente di energia che lo genera, cioè una specie di forza elettromotrice per il magnetismo, cioè una

#### forza magnetomotrice

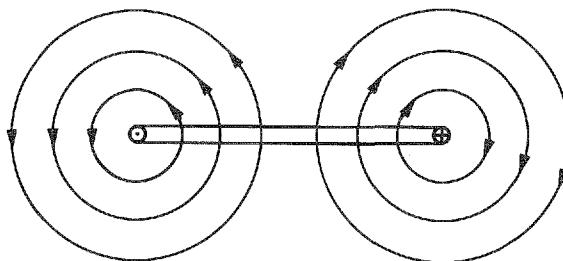
Come per la forza elettromotrice si è stabilita una polarità positiva e negativa, stabiliremo una polarità anche per la forza magnetomotrice.

Facciamo intanto le seguenti osservazioni:

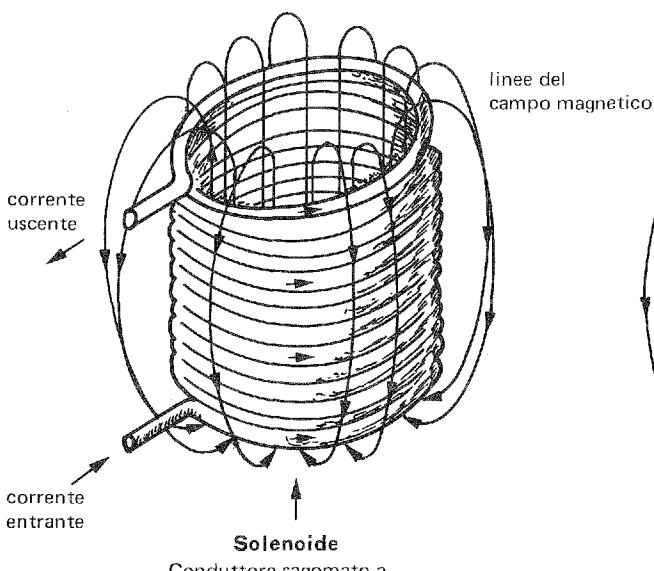


In un conduttore sagomato a forma di spira e attraversato da corrente . . . .

Rappresentazione proiettiva in sezione della figura a lato



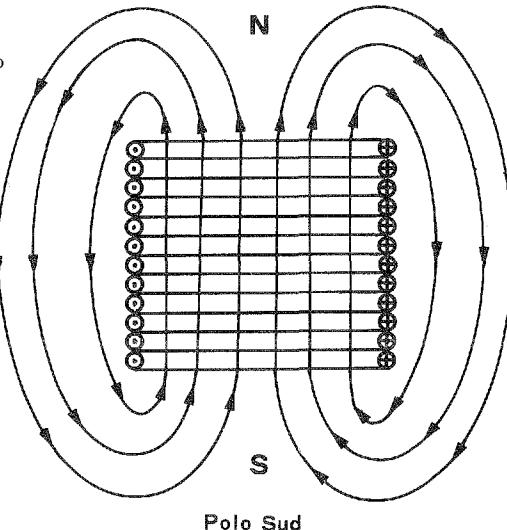
. . . . Il campo magnetico è equiverso nel suo interno e si chiude all'esterno uniformemente tutto intorno (a mantello).



Il campo elettrico in un solenoide ha la stessa direzione di quella posseduta da ogni spira.

Per quanto concerne l'intensità, il contributo di ogni spira è indipendente dalle altre spire e perciò in un solenoide l'intensità del campo è proporzionale al numero di spire oltre che alla corrente.

Polo Nord



Polarità

Chiameremo:

**Polo Nord** - quella parte del solenoide dalla quale escono le linee di flusso

**Polo Sud** - quella parte del solenoide nella quale entrano le linee di flusso

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.13	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomotr. - Flusso magn. - Rilut.
		Argomento : 12.13	Forza magnetomotrice

### INTENSITA' E UNITA' DI MISURA DELLA FORZA MAGNETOMOTRICE

Stabilita la polarità della forza magneto-motrice dobbiamo ora esaminare una relazione semplice che ne stabilisca l'intensità.

Visti gli accenni fatti negli argomenti precedenti, possiamo concludere che è matematicamente assodato e sperimentalmente confermato che l'intensità della forza magneto-motrice è proporzionale a due fattori:

- 1) - il numero delle spire del solenoide
- 2) - l'intensità di corrente che circola nelle spire.

Si è chiamata col nome di **Amperspira (Asp)** l'unità di misura della forza magneto-motrice, (f.m.m.).

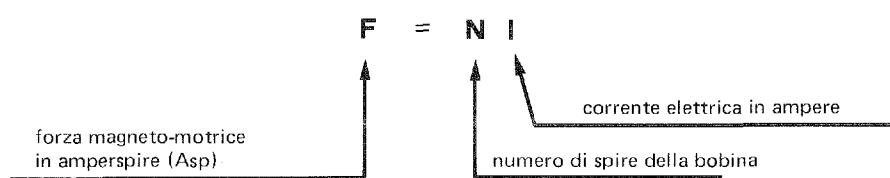
Essa è unitariamente definita come:

*l'unità di forza magneto-motrice dovuta alla corrente di 1 Amp. che circola in un solenoide formato da 1 spira*

Oltre che facendo passare 1 A in 1 spira, la f.m.m. di 1 Asp si crea anche ad esempio

facendo passare	5 mA	in	200 spire
oppure	1 mA	in	1000 spire
oppure	30,3 mA	in	33 spire
oppure	16 mA	in	62,5 spire ecc.

In generale, quindi, il valore della f.m.m. è dato dal prodotto:



Per chiarire le idee è meglio ripetere che:

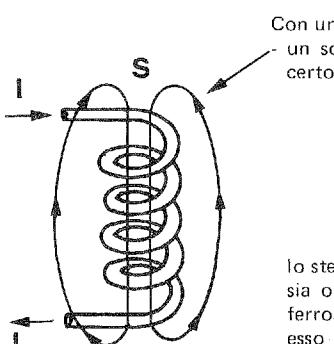
la forza magneto-motrice di un solenoide (o bobina, o avvolgimento) dipende unicamente dal numero di spire e dalla corrente che vi circola.

Essa non dipende né dalla distanza delle spire (passo dell'avvolgimento) che influenza solo una grandezza che si chiama forza magnetica (Amperspire/metro), né dal diametro delle spire né dal materiale su cui è avvolto il solenoide, che influenzano unicamente una grandezza che si chiama flusso e che verrà trattata negli argomenti che seguono.

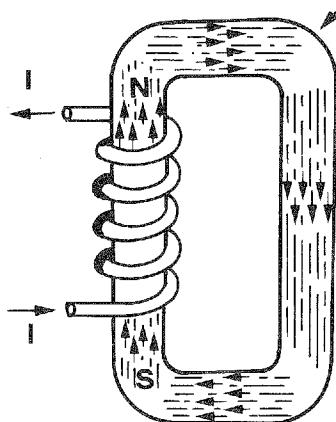
### CONCETTO DI FLUSSO MAGNETICO

Un circuito magnetico "aperto", cioè che esista una f.m.m. senza che da questa si generi una specie di "corrente" magnetica, non è immaginabile, perchè non esistono materiali "isolanti" al magnetismo: la stessa aria ed anche il vuoto chiudono su di sè la f.m.m. generata da un solenoide nel quale circola la corrente elettrica.

Questa permeabilità al magnetismo crea quella specie di corrente magnetica che si chiama **flusso magnetico**.

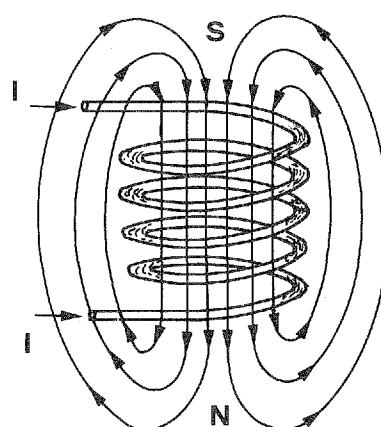


Con una data f.m.m.  
un solenoide come questo determina un certo flusso



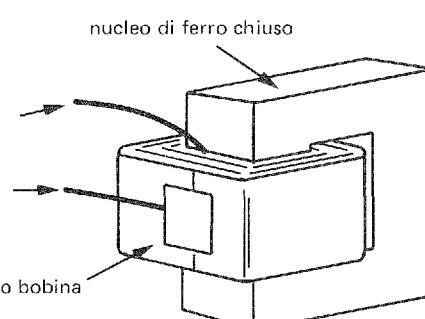
un solenoide che abbracci un diametro maggiore crea un flusso magnetico maggiore

lo stesso solenoide che era avvolto in aria, sia ora avvolto su un anello di materiale ferroso:  
esso sarà attraversato da un flusso magnetico maggiore



Il materiale che costituisce il circuito magnetico e su cui è avvolto il solenoide si chiama  
**nucleo**

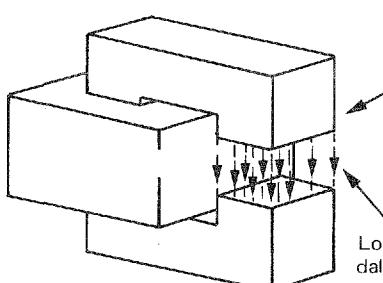
Esso può avere varie forme, a seconda dell'uso che se ne vuol fare.



conduttore iniziale  
dell'avvolgimento

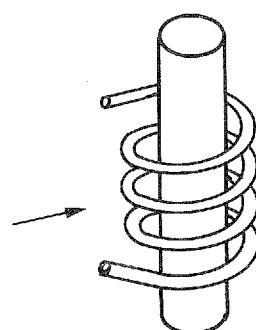
conduttore finale

avvolgimento o bobina



Nucleo di ferro aperto **non** significa circuito magnetico aperto perchè il flusso si chiude ugualmente attraverso l'interruzione

Lo spazio di aria attraversato dal flusso si chiama **traferro**



L'introduzione di un bastoncino di materiale ferroso fa aumentare il flusso che attraversa un solenoide avvolto in aria. Il flusso magnetico aumenterebbe ulteriormente se il bastoncino fosse chiuso su se stesso

<b>APPUNTI DI ELETTRONICA</b>		<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Codice</b>	<b>Pagina</b>	<b>Capitolo</b>	: 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
12.14	2	<b>Paragrafo</b>	: 12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomotr. - Flusso magn. - Rilut.
		<b>Argomento</b>	: 12.14	Flusso magnetico

## UNITA' DI MISURA DEL FLUSSO MAGNETICO

Non è facile definire l'unità di misura di flusso magnetico.

Dobbiamo ricorrere a concetti che verranno illustrati più avanti.

E' stato facile definire l'unità di misura per la corrente elettrica partendo dal concetto di carica elettrica che si muove in un conduttore.

Nel flusso magnetico (simbolo  $\Phi$ ), invece, malgrado i tentativi, sempre utili, di analogia con la corrente elettrica, non c'è niente che si muove.

Pertanto i concetti di quantità di magnetismo e di flusso magnetico si identificano.

Si potrebbe prendere un campione di materiale ferromagnetico di determinata lunghezza e di determinata sezione, chiuso ad anello su se stesso e concatenato con un solenoide.

Creata col solenoide la f.m.m. di 1 Asp si potrebbe definire come unitario il flusso che si genera in questo circuito magnetico.

Le difficoltà sorgono quando si devono paragonare, per misurarli, flussi incogniti con questo campione unitario.

Il modo più comodo, in quanto meno difficoltoso, è quello di misurare l'importante effetto di induzione elettromagnetica: quello della generazione di forze elettromotorie a causa di variazione di flusso magnetico.

Se ho modo di far diminuire fino a zero il flusso di cui voglio misurare l'intensità, si genera una forza elettromotrice ai capi di un conduttore concatenato con quel campo magnetico.

Pertanto la definizione dell'unità di misura di flusso magnetico che si chiama

**weber (simbolo Wb)**

è la seguente:

**Un weber corrisponde a quella quantità di flusso magnetico che, attraversando un circuito elettrico costituito da una sola spira, genera in esso una f.e.m. di 1 volt, quando quel flusso stesso si riduce a zero uniformemente in un secondo.**

In altre parole, se, riducendo a zero in 1 sec., un determinato flusso magnetico che attraversa un circuito formato da una sola spira, e se così facendo, in questo circuito si genera una f.e.m. di 1 volt, è segno che quel flusso era di 1 Wb.

Ovviamente, se, riducendo a zero, sempre in 1 sec., un altro flusso che generi invece una f.e.m. ad esempio di 4,5 V, è segno che quel flusso era di 4,5 Wb.

Se poi quei 4,5 volt vengono ottenuti annullando il flusso in 2 sec., è segno che quel flusso era di 9 Wb.

Infine, se quei 4,5 volt vengono ottenuti attraverso una bobina di 3 spire, annullando il flusso ancora in 2 sec., è segno che quel flusso era di 3 Wb.

Lasciamo tutto all'intuito del lettore, rimandando all'induzione elettromagnetica l'approfondimento di questo problema. (v. par. 12.2).

### DEFINIZIONE DELLA LEGGE DI OHM MAGNETICA - RILUTTANZA - PERMEANZA

Si definisce la relazione che intercorre tra forza magneto-motrice e flusso magnetico.

Negli argomenti precedenti si è visto quanto le caratteristiche fisiche e dimensionali del circuito magnetico influiscano quantitativamente sul flusso per una data forza magneto-motrice.

Inoltre, in un dato circuito magnetico si può modificare il flusso, modificando la f.m.m. stessa nel senso che il flusso è direttamente proporzionale ad essa.

Indipendentemente da come esso sia fatto, si può stabilire in un certo circuito magnetico quale rapporto si crea tra f.m.m. e flusso.

Questo rapporto si chiama

**riluttanza** (simbolo  $\mathcal{R}$ )

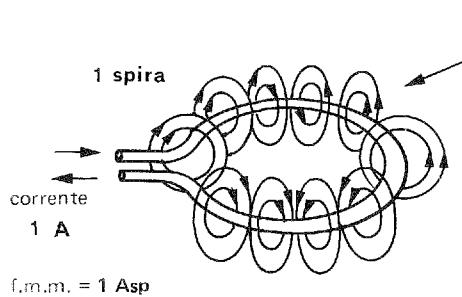
La sua unità di misura non ha un nome particolare.

La **riluttanza** si definisce in questo modo:

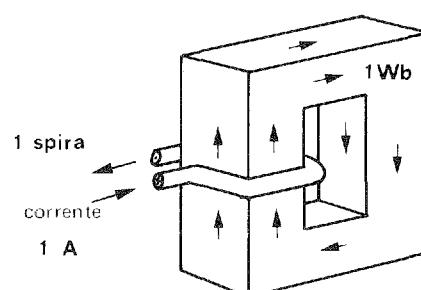
$$\mathcal{R} = \frac{\text{f.m.m. in amperspire (Asp)}}{\text{flusso in weber (Wb)}} = \frac{F}{\Phi}$$

Questa legge è stata scoperta da Hopkinson e, come si vede, è in perfetta analogia con la legge di Ohm, tanto è vero che è chiamata più comunemente legge di Ohm magnetica.

Essa dice che in un circuito magnetico sottoposto alla f.m.m. di 1 Asp, se si stabilisce un flusso di 1 Wb esso possiede la riluttanza di 1 Asp/Wb.



In queste condizioni questo circuito magnetico ha la riluttanza di **1 Asp/Wb**



Anche un circuito magnetico nelle stesse condizioni può possedere la riluttanza di

$$1 \frac{\text{Asp}}{\text{Wb}}$$

L'inverso della riluttanza si chiama

**permeanza** (simbolo  $\Lambda$ )

e si definisce in questo modo:

$$\Lambda = \frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{\Phi}{F}$$

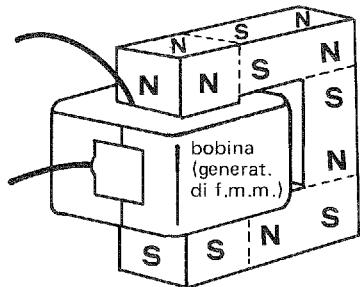
# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.15	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.1	Elettromagnetismo - Forza magnetomotr. - Flusso magn. - Rilut.

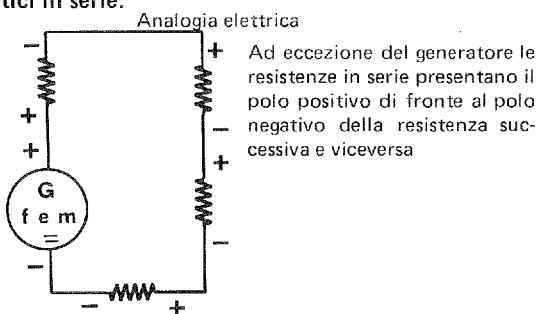
Argomento : 12.15 Legge di Ohm magnetica

## CONSIDERAZIONI ED ANALOGIE

Un circuito magnetico è composto di infiniti elementi magnetici in serie.

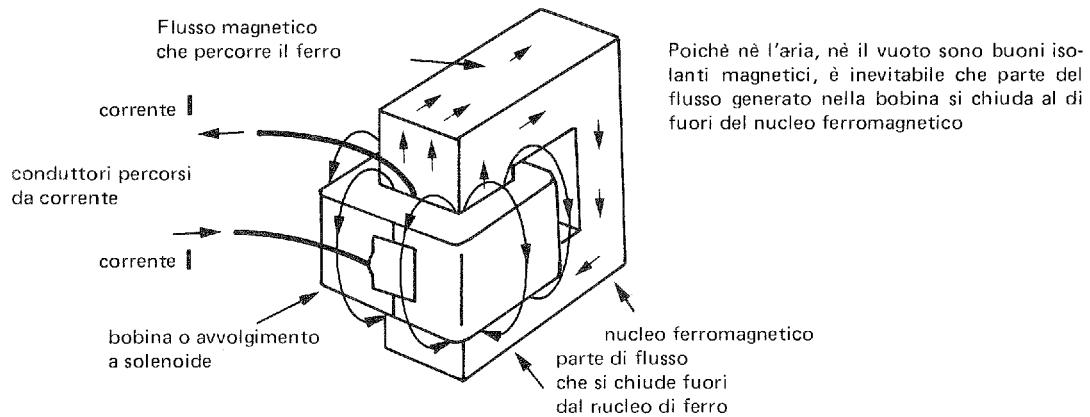


In qualunque parte del circuito magnetico, e anche all'interno della bobina, di fronte ad un polo nord si forma un polo sud e viceversa.



Circuito elettrico scomposto in un numero discreto di resistenze in serie.

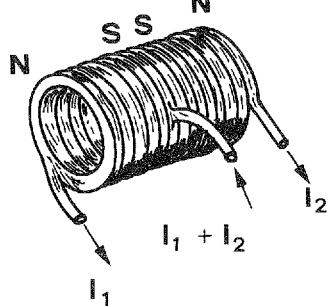
## Flusso disperso in un circuito ferromagnetico



## Disposizioni circuitali e f.m.m. risultanti

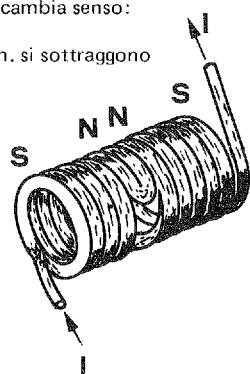
Un'unica spirale con presa intermedia:

le f.m.m. si sottraggono



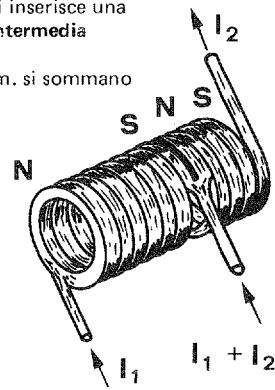
Dopo alcune spire la bobina cambia senso:

le f.m.m. si sottraggono



Laddove la bobina cambia senso si inserisce una presa intermedia

le f.m.m. si sommano



Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	:	12.2	Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica
Argomento	:	12.20	Indice del paragrafo

Codice	Pagina
12.20	1

## Paragrafo 12.2

# ELETTROMAGNETISMO, INDUZIONE ELETTRONICA

### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 12.21 – Definizione del fenomeno

- pag. 1 – Le variazioni di flusso generano f.e.m. nei conduttori che lo attraversano
- “ 2 – Variazione di flusso prodotta col movimento di un conduttore
- “ 3 – Variazione di flusso prodotta modificando la f.m.m.
- “ 4 – Variazione di flusso prodotta modificando la riluttanza

arg. 12.22 – Legge di Lenz

- pag. 1 – Valore della f.e.m. indotta in generale
- “ 2 – Valore della f.e.m. indotta in un conduttore in movimento

arg. 12.23 – Applicazioni pratiche della legge di Lenz

- pag. 1 – Regola mnemonica della mano destra
- “ 2 – Conduttore in movimento in posizione non perpendicolare al flusso
- “ 3 – Movimento rotatorio di un conduttore attorno ad un asse perpendicolare alla direzione del flusso
- “ 4 – Valore della f.e.m. indotta in un campo a f.m.m. variabile
- “ 5 – F.e.m. indotta in un solenoide a più spire
- “ 6 – Valore della f.e.m. indotta in un solenoide con riluttanza variabile

arg. 12.24 – Il trasformatore come generatore di energia elettrica

- pag. 1 – Macchine elettriche in generale
- “ 2 – Corrente smagnetizzante prodotta dal secondario quando è collegato ad un carico

arg. 12.25 – Induttanza e Mutua induzione

- pag. 1 – Premessa
- “ 2 – Definizione di induttanza o autoinduzione
- “ 3 – Coefficiente di mutua induzione
- “ 4 – Confronto fra i coefficienti di auto e mutua induzione
- “ 5 – Induttanza risultante da più induttori in serie

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.2	Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica
Argomento : 12.21	Definizione del fenomeno

### LE VARIAZIONI DI FLUSSO GENERANO FORZE ELETTROMOTRICI NEI CONDUTTORI CHE LO ATTRAVERSANO

Incominciamo ad avere un'idea dei fenomeni di induzione elettromagnetica.

Abbiamo visto nei precedenti paragrafi che, se una carica elettrica si muove (cioè si è in presenza di corrente elettrica), si genera un campo magnetico circolare attorno alla carica stessa.

Se la carica si muove di moto uniforme (corrente continua di valore costante), il campo magnetico resta costante nella sua intensità.

Se la carica si muove di moto vario o addirittura inverte il suo moto (corrente variabile unidirezionale e corrente alternata), si ottiene un campo magnetico di intensità variabile o che addirittura inverte la sua direzione e la sua polarità.

In questo paragrafo esamineremo come:

- la variazione di flusso magnetico (campi magnetici variabili in generale)
- il movimento di un conduttore in un campo magnetico qualsiasi

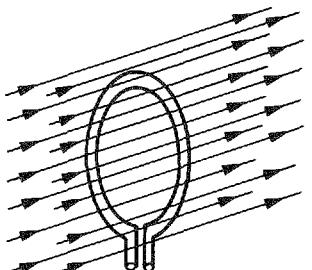
generano una forza elettromotrice nel conduttore stesso.

Meditiamo un po' su questo affascinante fenomeno della natura di cui l'uomo si è impadronito per comunicare a grandi distanze e per manipolare i fattori dell'energia.

I fenomeni elettromagnetici sono così concatenati:

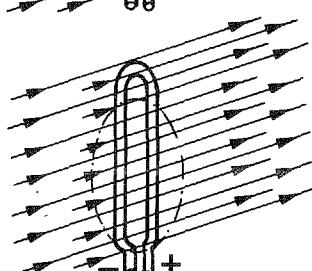
- 1) La f.e.m. alternata si chiude su un circuito e genera corrente alternata
- 2) La corrente alternata genera un campo magnetico alternato
- 3) Il campo magnetico alternato genera una f.e.m. alternata
- 1) Si ricomincia daccapo.

#### Illustrazione del fenomeno della induzione elettromagnetica



Spira di materiale conduttore immersa in un campo magnetico costante.

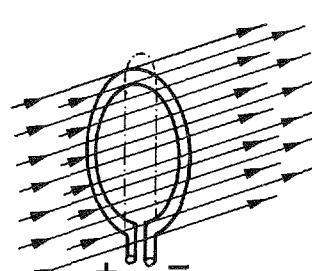
La direzione del flusso magnetico attraversa perpendicolarmente il piano della spira.  
La superficie della spira abbraccia una certa quantità di flusso.



Stessa spira schiacciata in modo che la sua superficie diminuisca.

**Durante** la deformazione, cioè **durante** la variazione di superficie della spira si ha una variazione di flusso (cioè si abbraccia sempre meno flusso).

A causa della **variazione di flusso** (in diminuzione) **si genera una forza elettromotrice** ai capi della spira.



Stessa spira riportata alle condizioni iniziali in modo che la sua superficie aumenti.

**Durante** la variazione di superficie della spira (questa volta in aumento) si ha una variazione di flusso (cioè si abbraccia sempre più flusso).

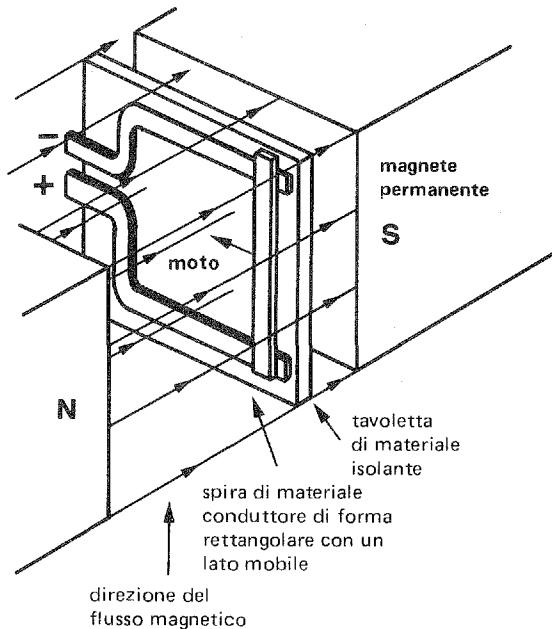
A causa della **variazione di flusso** (in aumento) **si genera una forza elettromotrice** di segno contrario alla precedente ai capi della spira.

Un altro modo di ottenere una f.e.m. senza deformare la spira è quello di far ruotare la spira attorno al suo asse di simmetria.

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.2	Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica
Argomento : 12.21	Definizione del fenomeno

### VARIAZIONE DI FLUSSO PRODOTTA COL MOVIMENTO DI UN CONDUTTORE

Si dimostra come il movimento di un conduttore immerso in un campo magnetico assomigli alla deformazione di una spira e quindi sia soggetto allo stesso fenomeno che corrisponde alla variazione del flusso abbracciato dalla spira stessa.

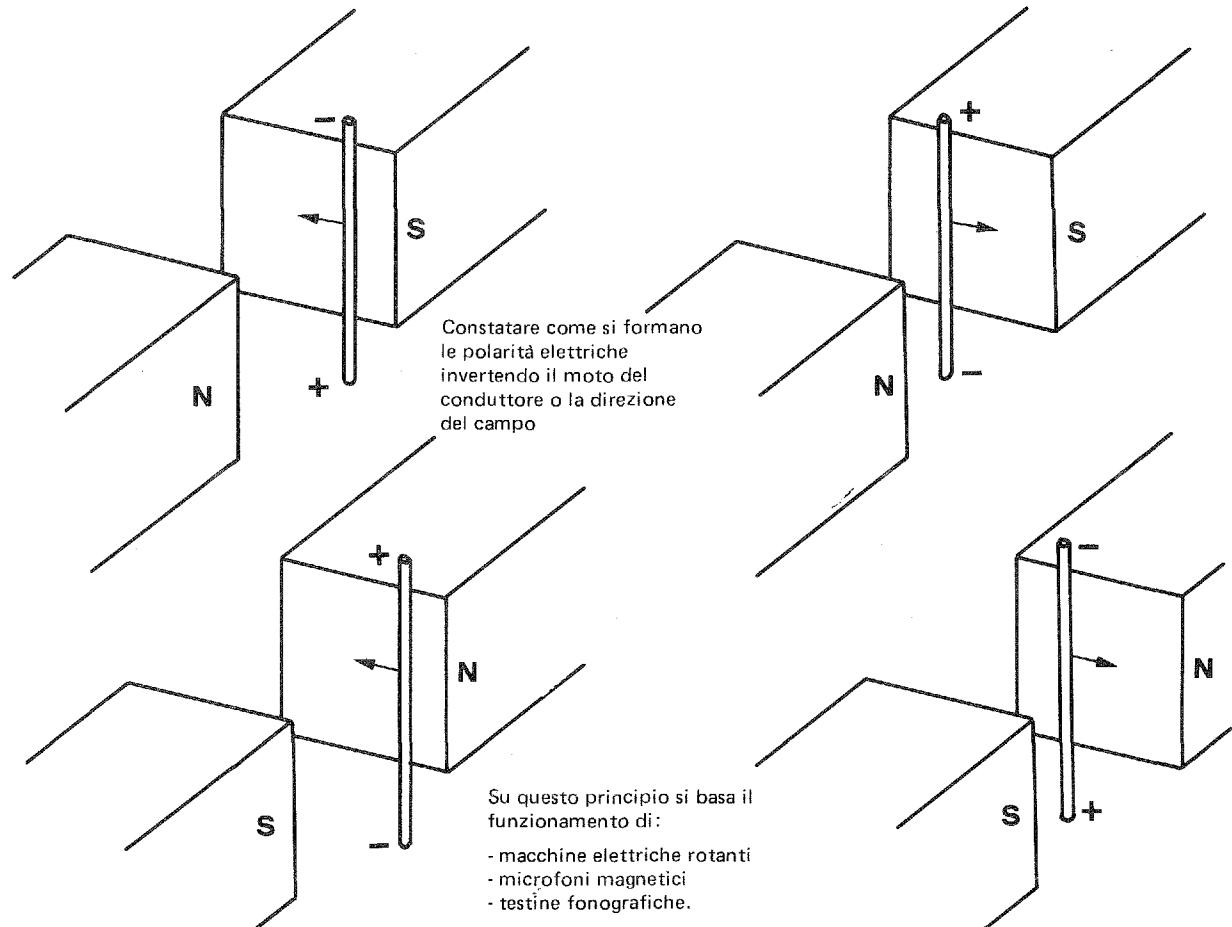


Su una tavoletta di materiale isolante si costruisca una spira di materiale conduttore di forma rettangolare con un lato mobile.

Si immerga tutto in un campo magnetico la cui direzione sia perpendicolare alla superficie della spira.

Data la direzione del campo magnetico indicata in figura, muovendo il conduttore mobile nella direzione pure indicata, si forma ai capi della spira una forza elettromotrice di cui è indicata in figura la polarità.

E' chiaro che tutta la messa in scena della spira rettangolare è solo un pretesto dimostrativo: infatti il fenomeno si verifica anche con il solo conduttore in movimento.  
(v. figure qui sotto)



### VARIAZIONE DI FLUSSO PRODOTTA MODIFICANDO LA F.M.M.

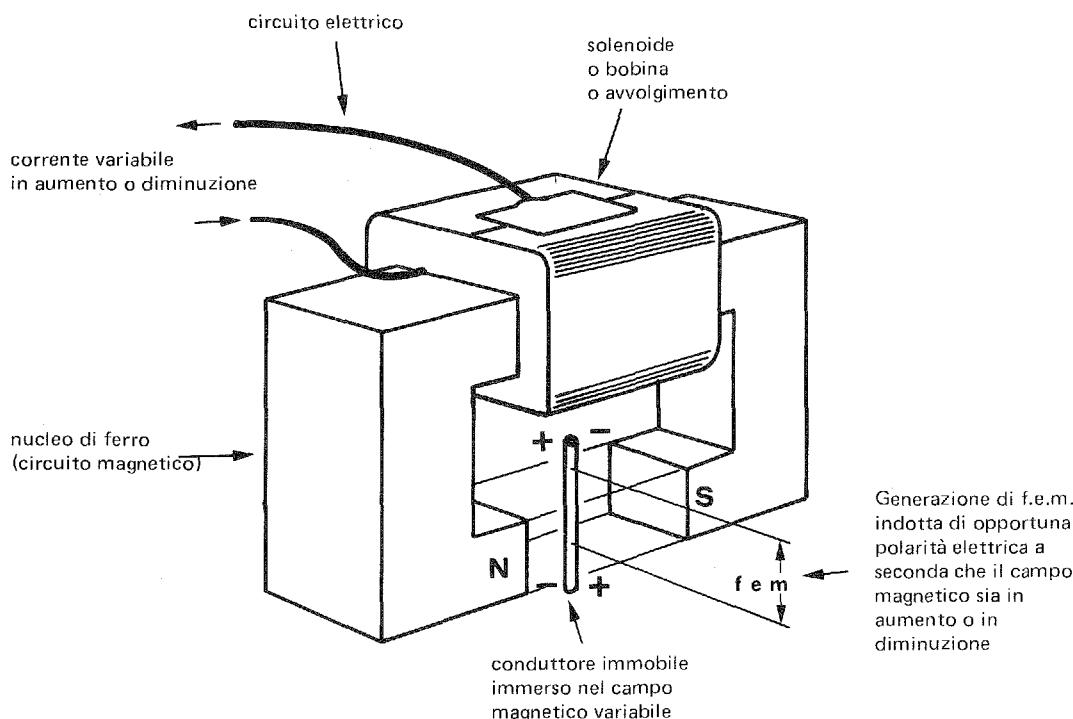
Un secondo modo di generare forze elettromotrici indotte è quello di far variare il flusso magnetico facendo variare la forza magneto-motrice nel circuito magnetico.

Abbiamo visto al paragrafo precedente che la f.m.m. dipende direttamente dal numero di spire del solenoide (bobina) o dalla intensità di corrente che lo percorre.

Per far variare la f.m.m. è sufficiente perciò far variare l'uno e l'altro dei due fattori.

E' intuitivo che il modo più scomodo sarebbe quello di far variare il numero delle spire!

E' più facile modificare la forza magneto-motrice facendo percorrere l'avvolgimento da una corrente variabile.



**Attenzione** - La f.e.m. ai capi del conduttore si produce solo quando ci sia **variazione di flusso**, che, in questo caso, è ottenuta mediante **variazione di forza magneto-motrice** nel circuito magnetico e perciò, in ultima analisi, mediante **variazione di corrente** (che si chiama corrente magnetizzante).

La presenza di flusso costante cioè di f.m.m. costante ed, in ultima analisi, ancora **corrente costante** (corrente continua e costante).

#### NON PRODUCE F.E.M.

ai capi del conduttore immobile ed immerso nel campo magnetico.

Su questo principio si basa il funzionamento di:

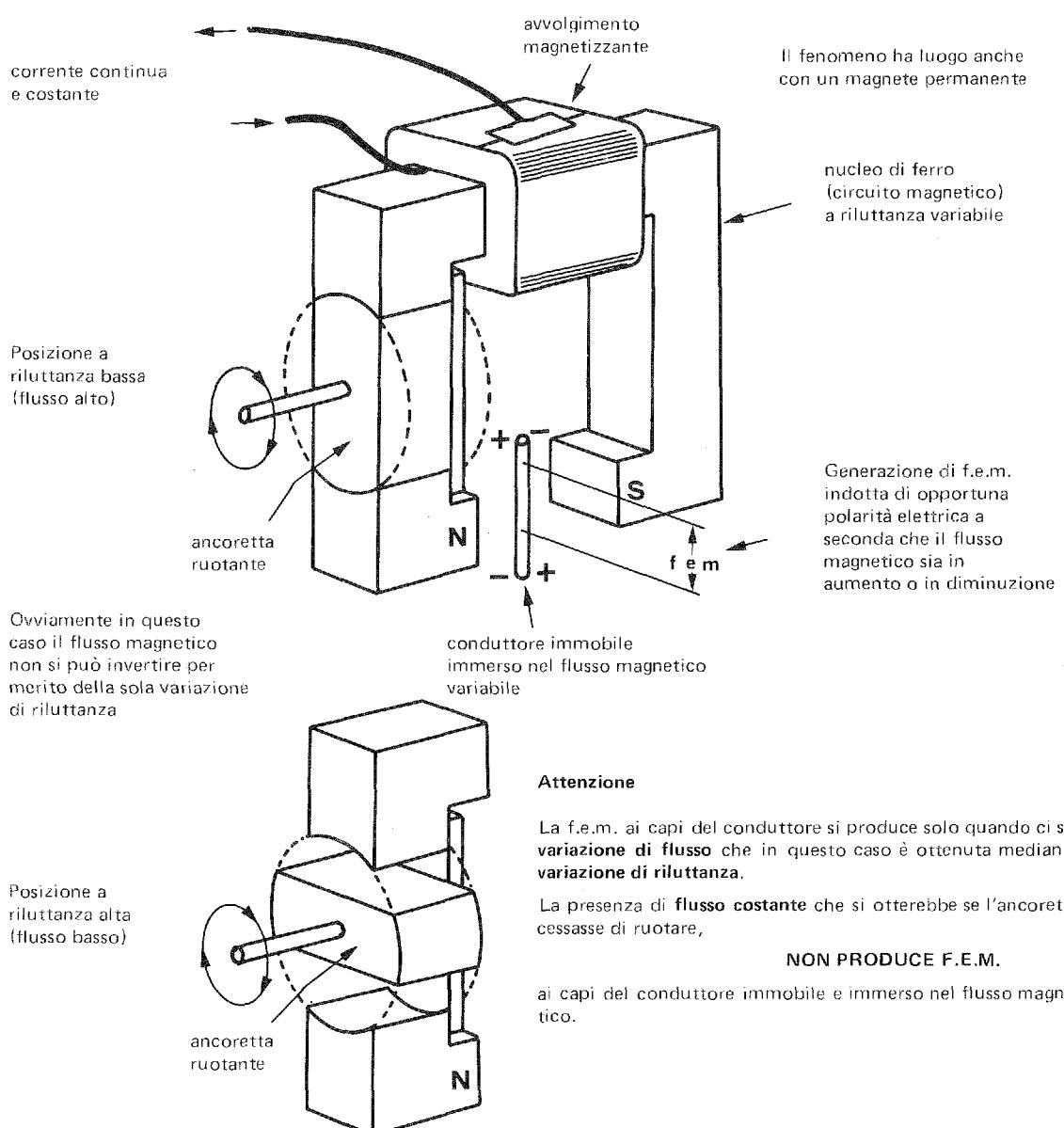
- macchine elettriche statiche (trasformatori)
- induttanze
- ecc.

### VARIAZIONE DI FLUSSO PRODOTTA MODIFICANDO LA RILUTTANZA

Un terzo modo di generare forze elettromotrici indotte è quello di far variare il flusso magnetico facendo varia-re la riluttanza nel circuito magnetico.

Abbiamo visto al paragrafo precedente che il flusso magnetico dipende dalla riluttanza del circuito per una da-ta f.m.m..

Esamineremo in questo caso come si possa far variare la riluttanza di un circuito magnetico per ottenere una f.e.m. indotta ai capi di un conduttore immobile che si trovi immerso in questo campo magnetico.



Su questo principio si basa il funzionamento di:

- macchine elettriche speciali (generatori di tensioni di riferimento per strumenti speciali come tachime-tri, torsiometri, ecc.)
- microfoni elettromagnetici

Sezione :	1	Grandezze fondamentali
Capitolo :	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo :	12.2	Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica
Argomento :	12.22	Legge di Lenz

### VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN GENERALE

Si enuncia e si commenta la relazione che lega il valore della f.e.m. indotta con il valore della variazione del flusso.

Negli argomenti immediatamente precedenti abbiamo esaminato qualitativamente in quanti modi si può creare una variazione di flusso per ottenere una f.e.m. indotta ai capi di un conduttore che si trovi immerso in quel flusso magnetico.

Riassumiamoli:

- 1) Flusso costante; conduttore in movimento in modo da attraversarlo.
- 2) Flusso variabile a mezzo di variazione di f.m.m.; conduttore immobile.
- 3) Flusso variabile a mezzo di variazione di riluttanza; conduttore immobile.

Vediamo ora quantitativamente qual'è la relazione che lega il valore della variazione di flusso magnetico con il valore della f.e.m. indotta ai capi del conduttore.

La legge sperimentata da Lenz è molto semplice ed è la seguente:

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

forza elettromotrice  
indotta (in volt)

(negativa quando il flusso aumenta)

variazione di flusso (in Wb)  
diviso  
intervallo di tempo (in sec.)  
in cui si verifica la variazione

La grandezza  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  si definisce come  
**rapidità di variazione** del flusso magnetico  
in Wb/sec.

Si osservi dunque quanto non la sola variazione di flusso influisca sul valore della f.e.m. indotta, ma la **rapidità** con la quale la variazione avviene.

Dunque il fenomeno è anche legato inversamente al tempo.

Il segno meno serve solo a mettere d'accordo il fenomeno con la direzione convenzionale della f.e.m..

Nei calcoli pratici esso non ha molta importanza e lo si trascura, ma non bisogna dimenticare che c'è, se non si vogliono avere delusioni nei calcoli teorici.

Negli argomenti che seguono si adatterà l'espressione universale di Lenz ai vari fenomeni riassunti all'inizio di questa pagina e illustrati negli argomenti precedenti.

**Attenzione** - Cominceremo a sentire parlare di **induzione magnetica** che altro non è che una densità di flusso magnetico e che si misura in  $\text{Wb}/\text{m}^2$  (weber al metro quadrato).

Per determinarla è semplice

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

induzione magnetica  
(in  $\text{Wb}/\text{m}^2$ )

flusso magnetico (in Wb)  
diviso  
superficie (in  $\text{m}^2$ )  
attraversata da quel flusso

Attenzione a non confondere l'induzione elettromagnetica che è il fenomeno di cui ci stiamo occupando con l'induzione magnetica che è una grandezza specifica di flusso magnetico.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

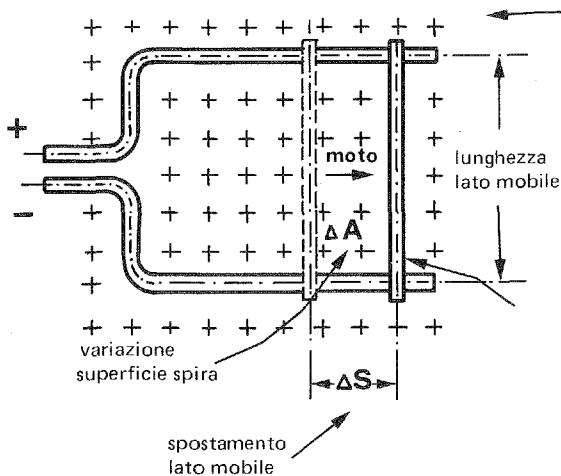
Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.22	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.2	Elettromagnetismo: Induzione magnetica

Argomento : 12.22 Legge di Lenz

**VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN UN CONDUTTORE IN MOVIMENTO**

Si adatta l'espressione universale di Lenz esprimendo la variazione  $\Delta\Phi$  del flusso magnetico in funzione del movimento di un conduttore che lo tagli perpendicolarmente.

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



Una spira di materiale conduttore abbia le seguenti caratteristiche:

- a) forma rettangolare con un lato mobile
- b) attraversata da flusso magnetico entrante nella pagina del foglio e di densità (induzione magnetica) uniforme  $B$  in  $\text{Wb/m}^2$ .

La spira abbraccia più flusso nella misura in cui il lato di lunghezza  $l$ , spostandosi nella direzione della freccia, aumenta la superficie di spira attraversata dal flusso stesso.

La variazione di superficie della spira è: ( $\text{in m}^2$ )

$$\Delta A = l \Delta S \quad \begin{matrix} \leftarrow \\ \text{spostamento lato mobile in m.} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \uparrow \\ \text{lunghezza lato mobile in metri} \end{matrix}$$

Poiché la densità di flusso (induzione magnetica)  $B$  (in  $\text{Wb/m}^2$ ) è uniforme, avremo:

variazione di flusso (in  $\text{Wb}$ )

$$\Delta \Phi = B \cdot \Delta A = B \cdot l \Delta S$$

induzione magnetica (in  $\text{Wb/m}^2$ )

variazione di superficie della spira (in  $\text{m}^2$ )

Vediamo ora come si trasforma l'espressione di Lenz

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{B l \Delta S}{\Delta t}$$

questo rapporto (circondato da punteggiatura)  
ha le dimensioni di una **velocità  $v$**  (in  $\text{m/sec.}$ )

E finalmente l'espressione di Lenz per un conduttore in movimento in un campo magnetico:

forza elettromotrice  
indotta (in volt)

$$E = B l v$$

velocità (in  $\text{m/sec.}$ ) di spostamento del  
conduttore perpendicolarmente alla  
direzione del flusso

densità di flusso  
(induzione magnetica)  
(in  $\text{Wb/m}^2$ )

lunghezza (in metri) della parte di conduttore  
realmente attraversata dal flusso e intercettata  
dalla spira.

**Interessante** - La polarità elettrica della f.e.m. è tale che, chiudendo la spira su un carico, si genera una corrente che crea a sua volta un campo magnetico che si oppone a quello principale con una forza (reazione) tale, da creare, col movimento del conduttore, la stessa energia che si accumula o si dissipa nel carico a seconda della sua natura.

Non poteva essere diversamente: anche qui il principio di conservazione dell'energia deve farsi rispettare.

### REGOLA MNEMONICA DELLA MANO DESTRA

Sarebbe difficile tenere a mente il meccanismo che governa la formazione della polarità della f.e.m. indotta in un conduttore in movimento che taglia le linee del flusso, se non si ricorresse alla seguente regola mnemonica.

**Regola di Fleming o della mano destra per la determinazione della direzione della f.e.m. indotta** (ricordare: destra ha la stessa iniziale D come dinamo cioè generatore).

e data la  
direzione del  
flusso magnetico

risulta la  
direzione della  
f.e.m. e dell'eventuale corrente

Data la  
direzione del  
movimento  
del conduttore

Le direzioni delle seguenti tre grandi:  
ezze:

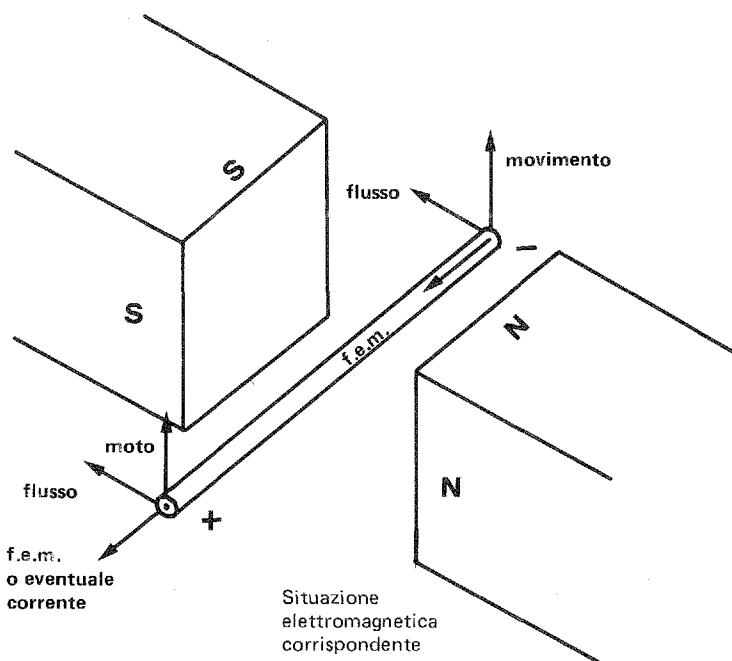
- 1) movimento del conduttore
- 2) flusso magnetico
- 3) polarità della f.e.m. (e direzione della eventuale corrente)

sono perpendicolari fra loro.

Le dita della mano destra siano disposte secondo tre direzioni perpendicolari.

Ogni dito indicherà la direzione di una grandezza come segue:

pollice = movimento  
indice = flusso  
medio = f.e.m.



Altra regola mnemonica:

- sequenza delle dita  
pollice - indice - medio
- sequenza corrispondente delle grandi:  
ezze  
meccanica - magnetica - elettrica
- impostate queste due come dati  
si ha questa come risultato



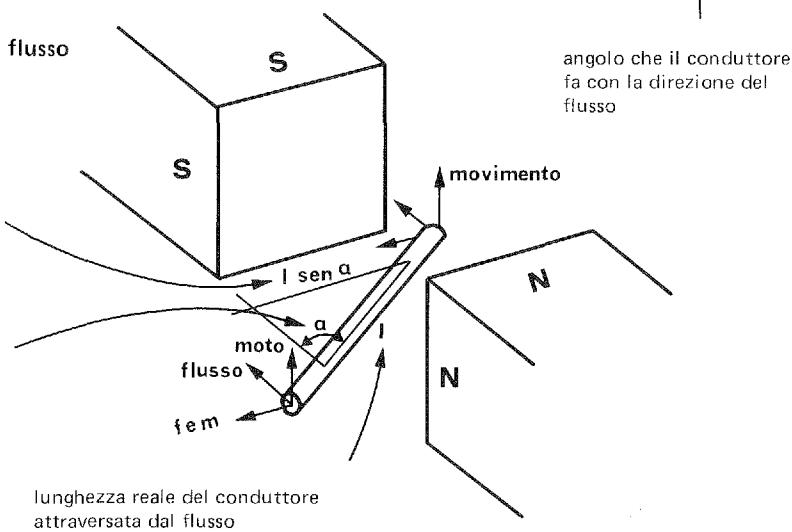
### CONDUTTORE IN MOVIMENTO IN POSIZIONE NON PERPENDICOLARE AL FLUSSO

La f.e.m. indotta corrisponde sempre al valore della componente perpendicolare al flusso della direzione del conduttore o di quella del suo movimento quando sia l'una che l'altra formano con la direzione del flusso angoli diversi da  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad.).

#### 1) Conduttore non perpendicolare al flusso movimento perpendicolare

Componente della lunghezza del conduttore perpendicolare alla direzione del flusso (è quella che realmente genera la f.e.m.)

angolo che il conduttore fa con la direzione del flusso



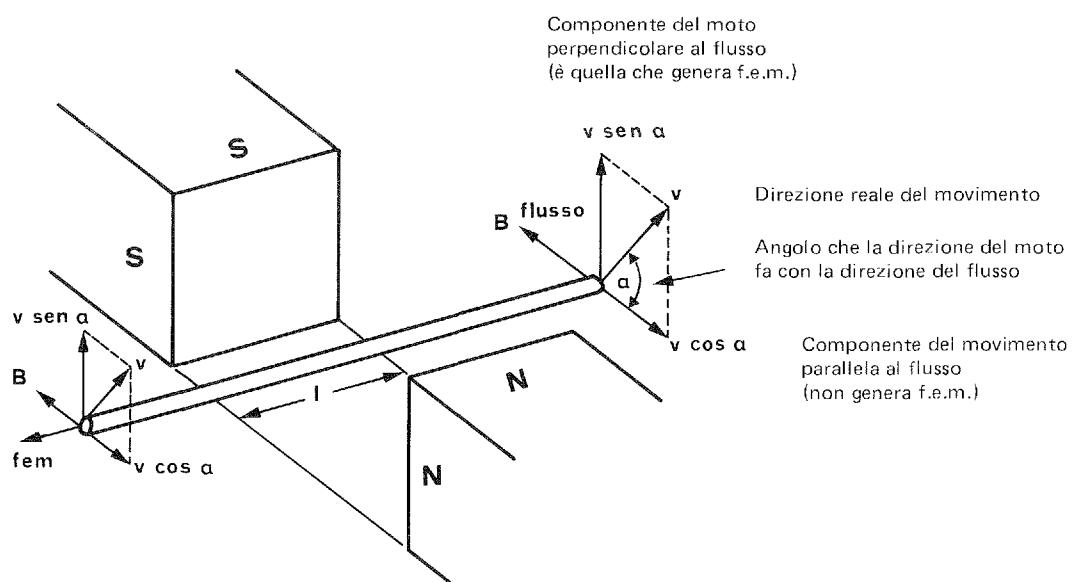
#### 2) Movimento del conduttore non perpendicolare al flusso conduttore in posizione perpendicolare

$$f.e.m. \text{ indotta (in volt)} \quad E = B I v \sin \alpha \quad \text{angolo che la direzione del movimento del conduttore fa con quella del flusso}$$

densità di flusso o induzione magnetica (in  $\text{Wb/m}^2$ )

velocità reale del movimento (in  $\text{m/sec.}$ )

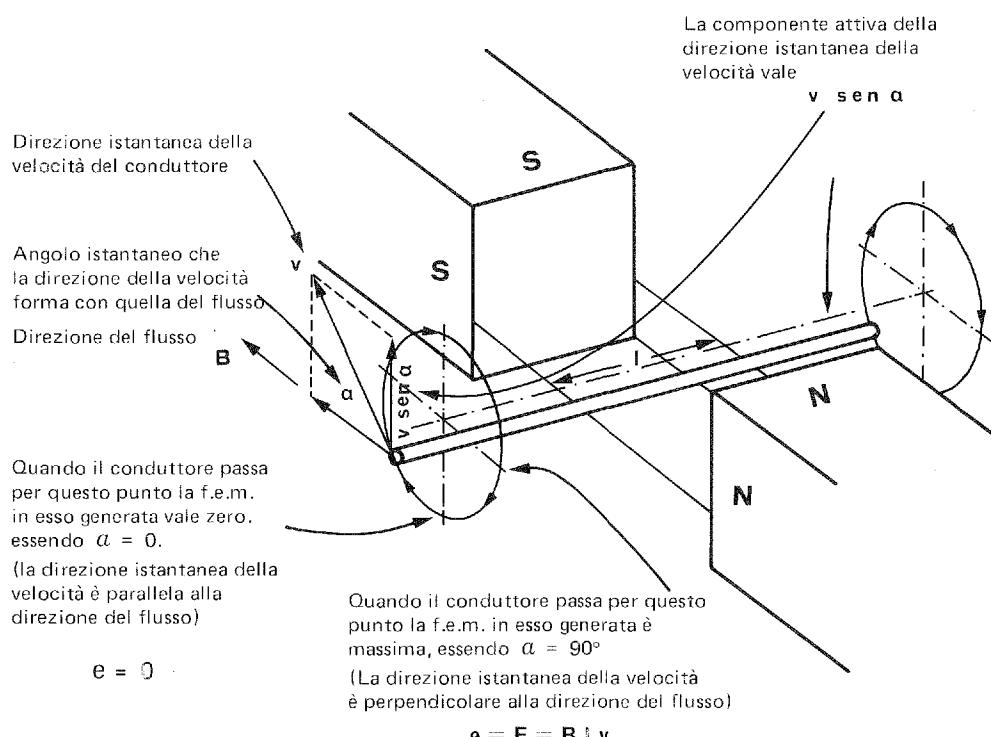
lunghezza di conduttore comunque attraversata dal flusso (in metri)



### MOVIMENTO ROTATORIO DI UN CONDUTTORE ATTORNO AD UN ASSE PERPENDICOLARE ALLA DIREZIONE DEL FLUSSO

La f.e.m. indotta corrisponde sempre al valore della componente perpendicolare alla direzione del flusso.

Nel movimento rotatorio questo valore cambia continuamente secondo una semplice legge trigonometrica sinusoidale.



Se chiamiamo  $E = B \cdot l \cdot v$  la f.e.m. massima, cioè quella che si ottiene quando  $\alpha = 90^\circ$ , cioè quella che si ha istantaneamente quando il conduttore taglia perpendicolarmente la direzione del flusso, in un punto qualsiasi della circonferenza descritta da un'estremità del conduttore avremo

$$\text{f.e.m. istantanea} \rightarrow e = E \cdot \sin \alpha \leftarrow \text{misura istantanea (in gradi o radianti) dell'arco descritto dal movimento del conduttore a partire dal punto di massima f.e.m.}$$

valore massimo della f.e.m. (in volt)

Se vogliamo legare l'angolo  $\alpha$  alla velocità angolare o pulsazione (in rad/sec.) del movimento circolare, essendo  $\alpha = \omega \cdot t$  scriveremo:

$$\text{f.e.m. istantanea} \rightarrow e = E \cdot \sin \alpha \leftarrow \text{intervallo di tempo (in sec.) preso in considerazione a partire dal punto di massima f.e.m.}$$

valore massimo della f.e.m. (in volt)

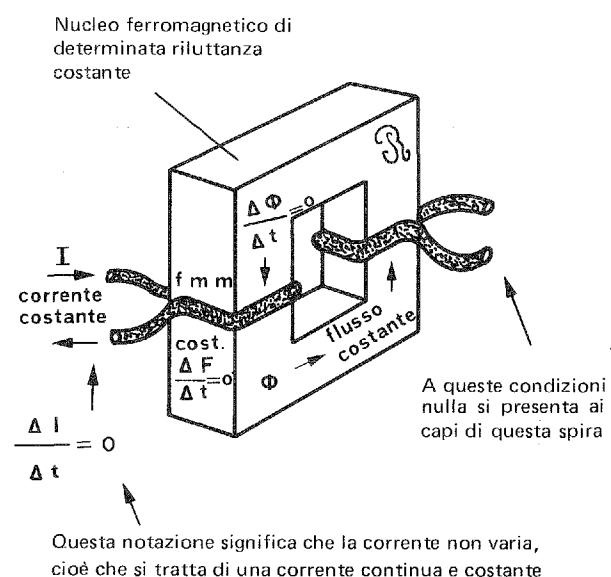
velocità angolare del moto (rad/sec)



### VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN UN CAMPO A F.M.M. VARIABILE

Dopo un esame sull'inattività di un campo magnetico stazionario, cioè senza variazioni di f.m.m., si passa allo studio degli interessanti fenomeni di f.e.m. indotta che si ottengono facendo variare la f.m.m.

#### A) Flusso costante, generato da f.m.m. costante, non induce alcuna f.e.m.



Se in una **spira** di materiale conduttore avvolta attorno ad un circuito ferromagnetico (nucleo) faccio passare una corrente continua e costante  $I$  nel circuito magnetico si genera una f.m.m.

$$\text{f.m.m. (in Asp)} \rightarrow F = I \leftarrow \text{corrente (in Amp.)}$$

A causa di questa f.m.m. nel nucleo si genera un flus-

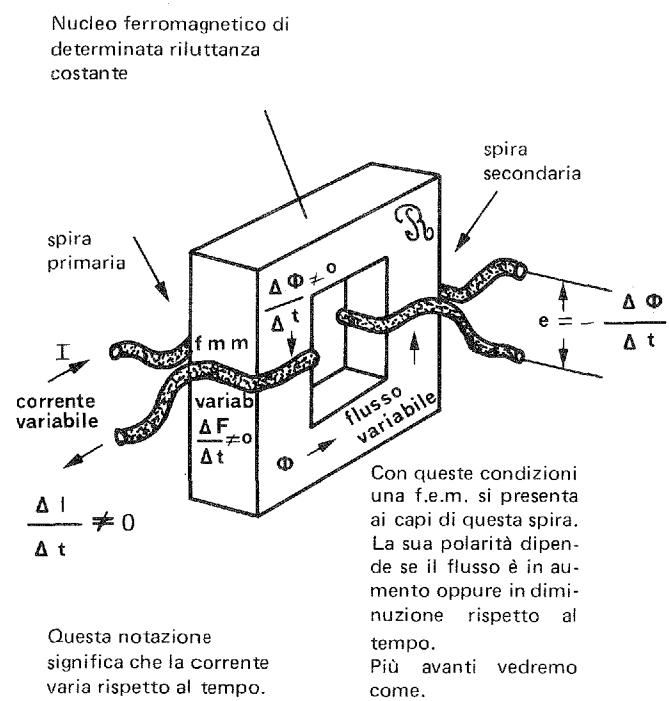
$$\text{flusso (in Wb)} \rightarrow \Phi = \frac{F}{\mu_0} \leftarrow \text{f.m.m. (in Asp.)}$$

riluttanza (in Asp/Wb)

Questo flusso resta costante (non varia), perché:

- 1) costante è la riluttanza nella quale esso circola
- 2) costante è la f.m.m. che lo genera, poiché
- 3) costante è la corrente che genera la f.m.m.

#### B) Flusso variabile, generato da f.m.m. variabile, induce una f.e.m.



Se la corrente che circola nella spira, che chiameremo **primaria**, è variabile secondo un andamento di cui conosciamo le **variazioni**  $\Delta I/\Delta t$  rispetto al tempo, ai capi della spira **secondaria** si genera una **f.e.m.** proporzionale all'entità delle variazioni.

Essendo fissa la riluttanza  $\mu_0$  del circuito magnetico, il flusso dipenderà unicamente dall'andamento della f.m.m. e quindi dalla corrente  $I$  che la genera.

La stessa f.e.m. si genera **anche** ai capi della spira primaria, poiché anch'essa abbraccia lo stesso **flusso variabile**, che attraversa la spira secondaria.

Chiameremo le espressioni

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{rapidità di variazione della corrente (Amp/sec.)}$$

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{rapidità di variazione del flusso (Wb/sec.)}$$

### F.E.M. INDOTTA IN UN SOLENOIDE A PIU' SPIRE

Dimostreremo che le f.e.m. induttrici (magnetizzanti) e indotte stanno fra loro come le loro stesse spire.

#### A) Avvolgimento primario di una spira, secondario di più spire

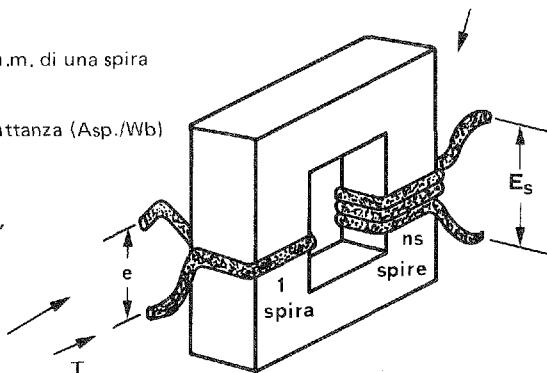
Flusso magnetico (in Wb)

$$\Phi = \frac{I}{R}$$

f.m.m. di una spira  
riluttanza (Asp./Wb)

La corrente  $I$  è variabile, perciò (vedi argomento precedente) ai capi della spira si autoinduce una f.e.m.

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$



Anche in ogni spira del secondario si induce una f.e.m.

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Perciò ai capi di tutte le  $n_s$  spire del secondario si avrà una f.e.m.  $E_s = n_s e$  cioè:

$$E_s = - n_s \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

#### B) Avvolgimento primario di $n_p$ spire,

secondario di  $n_s$  spire

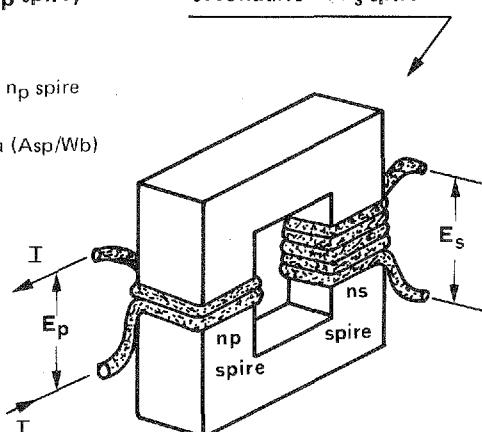
Flusso magnetico (in Wb)

$$\Phi = \frac{n_p I}{R}$$

f.m.m. di  $n_p$  spire  
riluttanza (Asp./Wb)

La corrente  $I$  è variabile, perciò ai capi delle spire primarie si autoinduce una f.e.m. totale

$$E_p = - n_p \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$



Per gli stessi motivi la f.e.m. totale che si induce al secondario è:

$$E_s = - n_s \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

#### C) Studio della relazione che lega i valori delle forze elettromotrici primaria e secondaria col relativo numero di spire.

E' sufficiente fare il rapporto fra le due f.e.m. precedentemente calcolate

$$\begin{aligned} \text{f.e.m. primaria} &\longrightarrow E_p = -n_p \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \\ \text{f.e.m. secondaria} &\longrightarrow E_s = -n_s \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \end{aligned}$$

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{-n_p}{-n_s} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Semplificando si ottiene:

$$\frac{\text{f.e.m. primaria}}{\text{f.e.m. secondaria}} = \frac{E_p}{E_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

numero di spire primarie  
diviso  
numero di spire secondarie

La f.e.m. primaria si chiama anche **forza contro-elettromotrice** (f.c.e.m.) perché si oppone alla f.e.m. variabile  $\Delta \Phi / \Delta t$  proveniente dal generatore che provoca le variazioni di corrente  $\Delta I / \Delta t$  e quindi le variazioni di flusso  $\Delta \Phi / \Delta t$ .



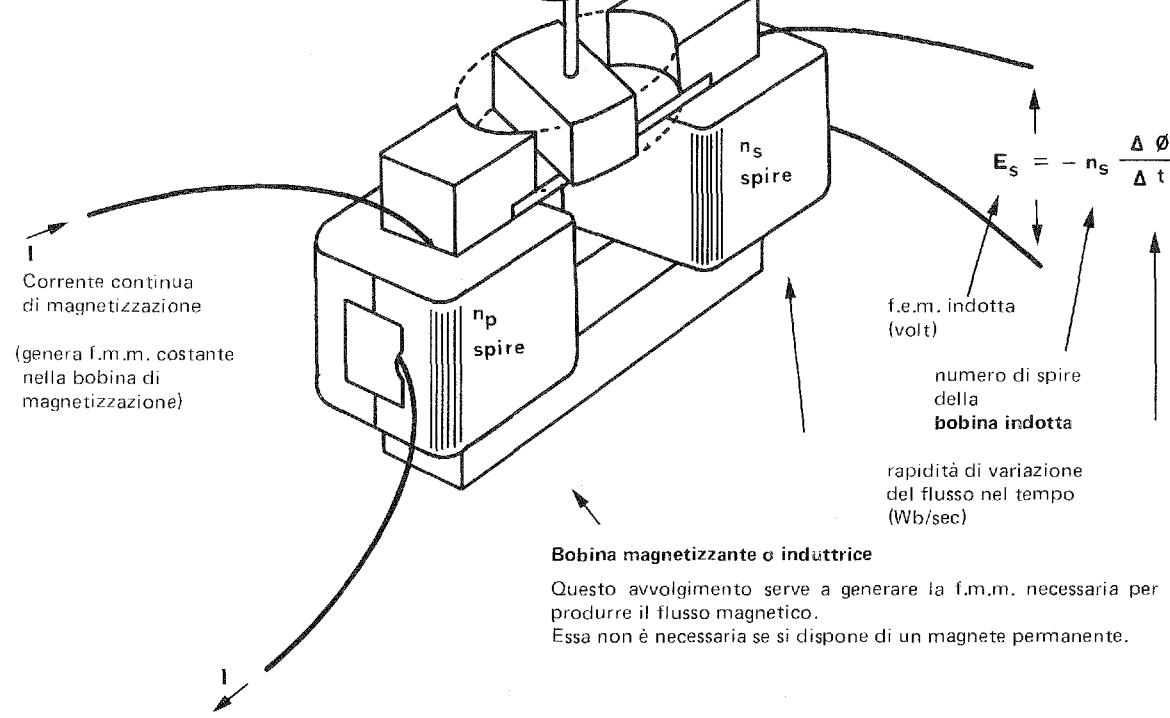
### VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN UN SOLENOIDE CON RILUTTANZA VARIABILE

Le regole precedentemente esposte valgono comunque venga fatto variare il flusso.  
Qui la f.e.m. indotta si ottiene facendo variare la riluttanza del circuito magnetico.

Le variazioni di flusso magnetico  
dipendono dalle variazioni di riluttanza

E' un flusso che aumenta e diminuisce,  
ma non si inverte mai.

In questo caso la variazione di riluttanza è ciclica  
ed è ottenuta facendo ruotare una parte opportunamente sezionata del circuito magnetico



**Attenzione** - Anche ai capi della bobina magnetizzante si produce una

$$\text{f.e.m. primaria} \quad \longrightarrow \quad E_p = - n_p \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \begin{matrix} \text{rapidità di variazione} \\ \text{del flusso (in Wb/sec)} \end{matrix}$$

(in volt)

numero di spire della bobina induttrice

Questa forza elettromotrice indotta può assumere notevoli valori che dipendono, come si vede, dal numero di spire (che deve essere alto per raggiungere la f.m.m. necessaria con una corrente modesta) e dalla rapidità di variazione del flusso.

Poiché il circuito induttore è chiuso sul generatore di corrente di magnetizzazione, la presenza di questa forza elettromotrice indotta può chiudersi sul generatore stesso e creare notevoli inconvenienti, se non si prendono opportune precauzioni (filtri selettivi ecc.).

L'uso del magnete permanente, rende la costruzione più semplice ed evita anche questi inconvenienti.

Su questo principio si basa il funzionamento di:

- macchine elettriche speciali (generatori di tensioni di riferimento per strumenti speciali come tachimetri, torsiometri, ecc.).
- microfoni, ecc.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	:	12.2	Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica
Argomento	:	12.24	Il trasformatore come generatore di energia elettrica

Codice **12,24** Pagina **1**

## MACCHINE ELETTRICHE IN GENERALE

I fenomeni descritti in questo paragrafo 12.2 fino all'argomento precedente (12.23) sono quelli che vengono sfruttati per il funzionamento delle macchine generatrici di energia elettrica (la dinamo, l'alternatore, ecc.).

Ricordiamo sempre che la parola "generare" in natura non può che significare soltanto "trasformare" un tipo di energia esistente in un altro tipo: quella elettrica nel nostro caso.

Per trasformare energia trasmessa alla macchina elettrica in modo meccanico a mezzo della rotazione di un albero è indispensabile usare uno dei due seguenti modi che prevedono movimento per produrre f.e.m. indotta.

Il primo prevede il movimento relativo di un conduttore attraverso un campo magnetico precostituito: è il modo più pratico ed efficace (v. 12.23 pagg. 1, 2, 3) per produrre energia elettrica. Ad esso si ispirano la maggioranza delle macchine elettriche.

Il secondo sfrutta la variazione di riluttanza (v. 12.23-6) ed è usato prevalentemente nel campo della strumentazione particolare per l'effettuazione di speciali misure, e nell'elettronica.

Il modo che non sfrutta alcun movimento, ma che produce f.e.m. mediante un flusso variabile generato da una corrente pure variabile come potrebbe essere una corrente alternata, è largamente usato anche in elettronica e le "macchine" elettriche che lo sfruttano si chiamano **trasformatori**.

La forza elettromotrice, presente ai morsetti di tutte le macchine elettriche citate, è fonte di energia elettrica a tutti gli effetti.

La corrente che si produce se collegiamo i morsetti ad un carico produce magnetismo nella macchina ed è questo magnetismo che sovrintende ad un gioco di effetti tali da richiamare altrettanta energia dal motore o da fonte elettrica come nel trasformatore.

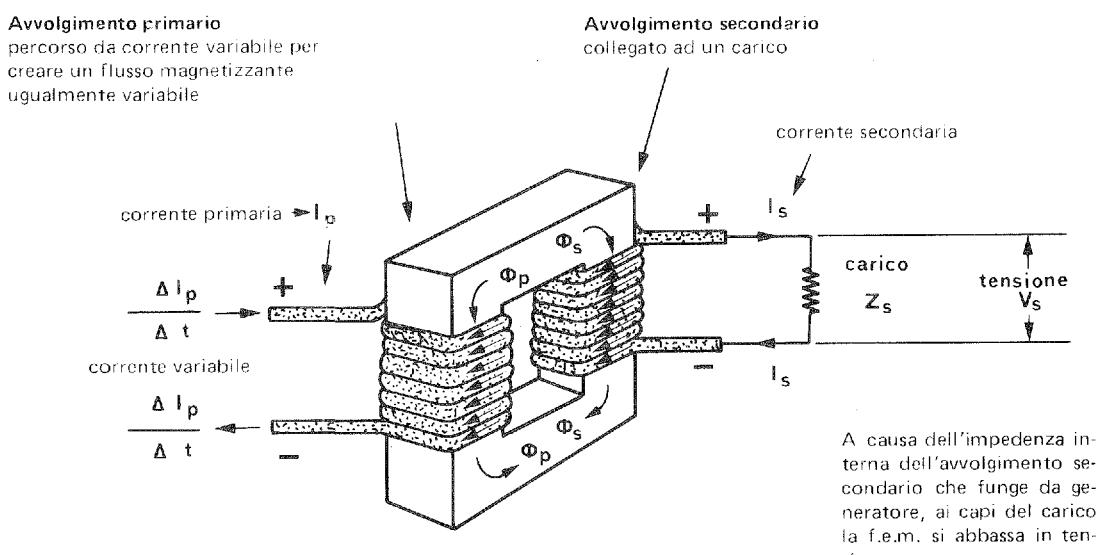
Questa corrente produce una reazione meccanica nelle macchine rotanti o una smagnetizzazione nei trasformatori così da costringere il motore o il trasformatore stesso a ripristinare le condizioni elettriche imposte dalla sua struttura, richiamando dalla fonte l'energia necessaria.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
12.24	2	Capitolo : 12 Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.2 Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica
		Argomento : 12.24 Il trasformatore come generatore di energia elettrica

**CORRENTE SMAGNETIZZANTE PRODOTTA DAL SECONDARIO QUANDO  
E' COLLEGATO AD UN CARICO**

Quando l'avvolgimento secondario è collegato ad un carico anch'esso è sede di f.m.m. a causa della corrente che si produce: vediamo cosa succede.



- 1) La presenza del carico provoca una corrente

$$I_s = \frac{V}{Z_s} \quad (\text{legge di Ohm})$$

Questa corrente, data la sua direzione inequivocabile (vedi argomenti precedenti), provoca nel circuito magnetico una f.m.m. e quindi un flusso di **direzione opposta** a quello magnetizzante.

Questo flusso è detto

**smagnetizzante**

e la sua intensità dipende dalla corrente secondaria che a sua volta dipende dal valore del carico oltre che, come sappiamo, dalla f.e.m. indotta e quindi dal rapporto spire e dalla rapidità di variazione della corrente primaria.

- 2) La presenza di un **campo smagnetizzante**, diminuisce il flusso che attraversa il circuito magnetico.

La corrente primaria aumenta per riportare il sistema in una nuova posizione di equilibrio per ripristinare il flusso diminuito, richiamando energia dal generatore.

Ed anche il principio di conservazione dell'energia è salvo ancora una volta, come diversamente non poteva essere.

Cioè, l'energia che serve ad alimentare il carico non può che essere presa da chi ce l'ha: il generatore.

Sezione	: 1	Grandezze fondamentali
Capitolo	: 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	: 12.2	Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica
Argomento	: 12.25	Induttanza e Mutua induzione

Codice **12.25** Pagina **1**

## PREMESSA

Il magnetismo prodotto da una corrente elettrica materializza l'energia cinetica di movimento delle cariche accumulate nel circuito magnetico.

Questa energia tende a conservarsi nel corpo di questo dispositivo costituito da spire attraversate da corrente e da flusso magnetico da essa prodotto.

Questa energia non può essere distrutta istantaneamente, semplicemente interrompendo la corrente, tanto è vero che fra i contatti dell'interruttore si forma inevitabilmente una scintilla: segno sensibile di quella energia accumulata che deve trasformarsi in luce e calore per potersi annullare.

Luce e calore di queste scintille sono tali, quando l'energia accumulata è notevole, da creare inconvenienti se non si adattassero opportune misure di protezione.

Il dispositivo di cui stiamo parlando si chiama induttore, e induttanza è la grandezza ad esso relativa, che mette in relazione l'energia accumulabile sottoforma magnetica e quella elettrica.

Vedremo in altre parti della trattazione che questa facoltà dell'energia elettrica di accumularsi sottoforma cinetica e quindi magnetica esiste dappertutto in qualsiasi circuito, nelle linee di trasmissione, negli elementi stessi del circuito.

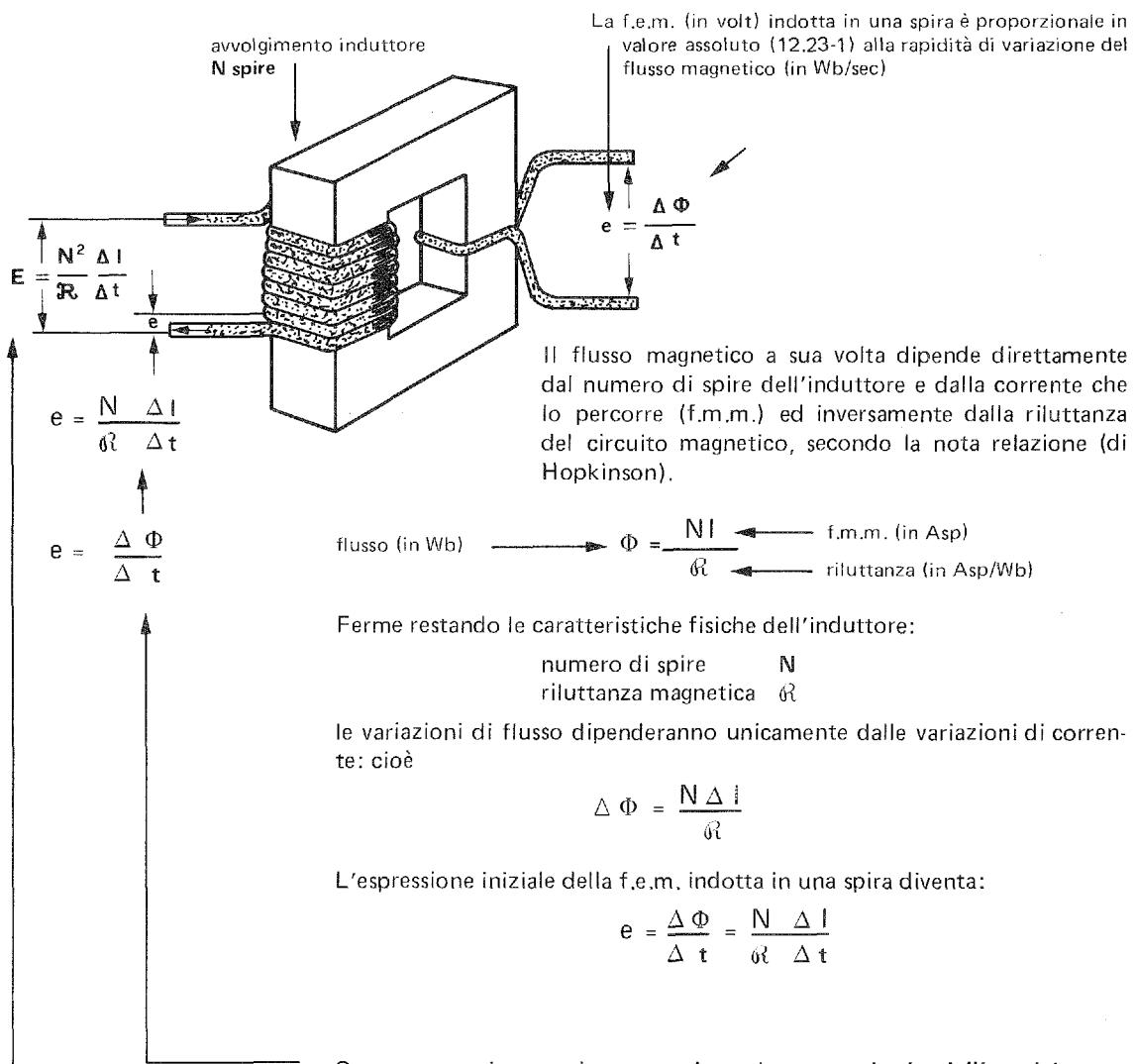
Il parametro induttanza, tanto prezioso dove ci serve, diventa indesiderabile in altri punti del circuito al punto che in particolari condizioni ce ne dobbiamo difendere e dobbiamo studiare accorgimenti per minimizzarlo.



### DEFINIZIONE DI INDUTTANZA O AUTOINDUZIONE

Si indaga in che misura la f.e.m. autoindotta al primario (induttore) dipende dalle caratteristiche fisiche del circuito elettromagnetico: numero di spire  $N$  e riluttanza  $\mathfrak{R}$ .

Si contempla il caso di un circuito elettromagnetico costituito da un unico avvolgimento induttore che funge anche da indotto



Questa espressione ovviamente vale anche per ogni spira dell'avvolgimento induttore, poiché abbraccia lo stesso flusso, perciò:

la f.e.m. autoindotta (in volt) ai capi dell'intero avvolgimento induttore sarà proporzionale al relativo

$$E = Ne = \frac{\text{numero di spire}}{\mathfrak{R}} \frac{N \Delta I}{\Delta t} = \frac{N^2 \Delta I}{\mathfrak{R} \Delta t}$$

Come si vede, il rapporto  $\frac{N^2}{\mathfrak{R}}$  dipende unicamente dalle caratteristiche fisiche dell'induttore.

Esso si chiama coefficiente di autoinduzione o induttanza e si scrive

$$\text{induttanza } \longrightarrow L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad \begin{matrix} \text{numero di spire (al quadrato) dell'avvolgimento} \\ \text{(unità di misura: henry)} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{riluttanza del circuito magnetico (in Asp/Wb)} \end{matrix}$$



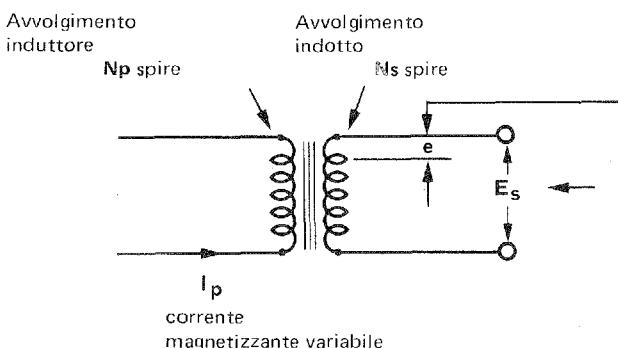
### COEFFICIENTE DI MUTUA INDUZIONE

Si indaga in che misura la f.e.m. indotta al secondario (indotto) dipende dalle caratteristiche fisiche del circuito elettromagnetico: numero di spire primarie  $N_p$ , numero di spire secondarie  $N_s$ , riluttanza  $\mu_l$ .

Incominciamo intanto ad usare i simboli grafici e così facciamo più rapidamente i disegni.

Si contempla il reciproco funzionamento di un circuito elettromagnetico costituito da due avvolgimenti accoppiati: uno che funge da induttore, l'altro da indotto e viceversa.

#### A) Primario induttore, secondario indotto



Per lo stesso ragionamento fatto alla pagina precedente,

$$\text{f.e.m. indotta in una spira a causa della corrente magnetizzante nel primario} \quad e = \frac{N_p}{\mu_l} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

f.e.m. indotta in tutto il secondario

$$E_s = N_s e = N_s \frac{N_p}{\mu_l} \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{N_p N_s}{\mu_l} \frac{\Delta I_p}{\Delta t}$$

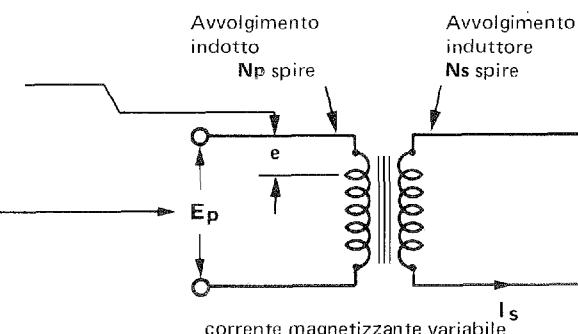
#### B) Primario indotto, secondario induttore

Per lo stesso ragionamento fatto alla pagina precedente,

$$\text{f.e.m. indotta in una spira a causa della corrente magnetizzante nel secondario} \quad e = \frac{N_s}{\mu_l} \frac{\Delta I_s}{\Delta t}$$

f.e.m. indotta in tutto il primario

$$E_p = N_p e = N_p \frac{N_s}{\mu_l} = \frac{N_p N_s}{\mu_l} \frac{\Delta I_s}{\Delta t}$$



#### C) Conclusioni

Il fenomeno è assolutamente reversibile: la f.e.m. che si ottiene ai capi di un avvolgimento, inserendo una corrente variabile nell'altro, è identica a quella che si otterrebbe nell'altro, inserendo la medesima corrente nel primo. Esse valgono

$$E_s = \frac{N_p N_s}{\mu_l} \frac{\Delta I_p}{\Delta t} \quad E_p = \frac{N_p N_s}{\mu_l} \frac{\Delta I_s}{\Delta t}$$

Come si vede, la grandezza  $\frac{N_p N_s}{\mu_l}$  dipende unicamente dalle caratteristiche fisiche.

Essa si chiama **coefficiente di mutua-induzione** e si scrive

coefficiente di mutua-induzione (unità di misura: henry)  $\longrightarrow M = \frac{N_p N_s}{\mu_l} \longleftarrow$  prodotto dei numeri di spire primarie e secondarie  
riluttanza del circuito magnetico (Asp/Wb)



### CONFRONTO FRA I COEFFICIENTI DI AUTO E MUTUA INDUZIONE

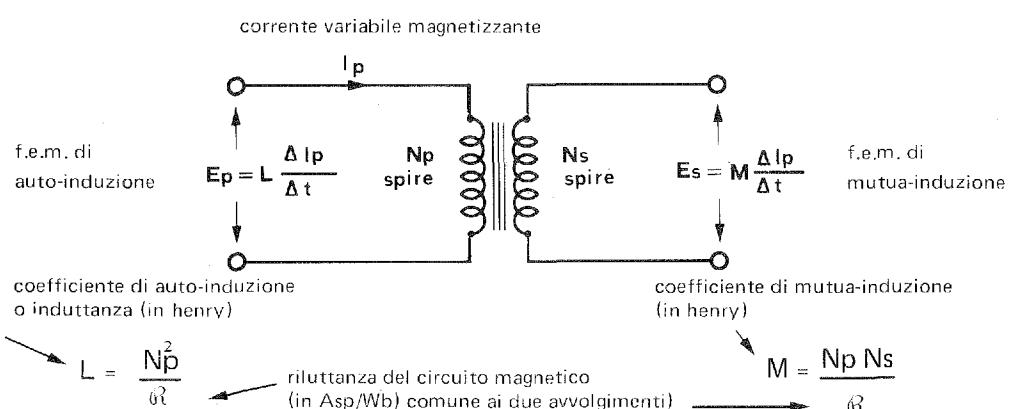
Si riprendono in considerazione comparativamente i fenomeni che avvengono nei circuiti elettromagnetici concatenati con due avvolgimenti (trasformatori).

**Riassumiamo:** il **coefficiente di mutua-induzione** riguarda la relazione fra la corrente variabile introdotta in un avvolgimento e la f.e.m. prodotta nell'altro; mentre

il **coefficiente di auto-induzione o induttanza** riguarda la relazione fra la corrente variabile introdotta in un avvolgimento e la f.e.m. prodotta nello stesso.

**Nota:** E' evidente che in un trasformatore in cui i due avvolgimenti hanno lo stesso numero di spire (rapporto spire = 1) i coefficienti di auto e mutua induzione si identificano (sono uguali).

**A)** In un circuito con due avvolgimenti, dove uno è percorso da corrente variabile e l'altro è aperto, avvengono i seguenti fenomeni

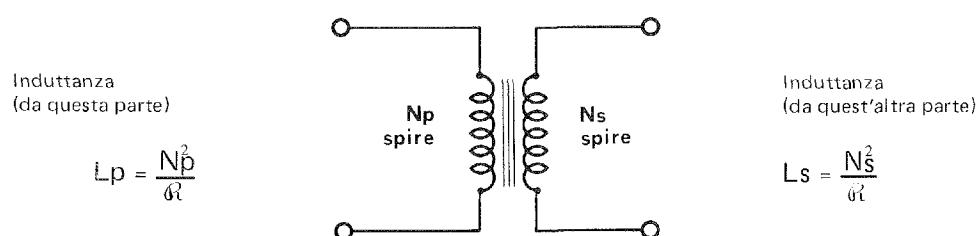


#### Memo

L'autoinduzione o induttanza la troviamo dalla parte dell'avvolgimento induttore (cioè quello percorso dalla corrente variabile magnetizzante).

La mutua induzione la troviamo dalla parte dell'avvolgimento indotto (cioè l'altro, quello aperto).

**B)** Un trasformatore può fungere da induttanza, usando uno solo dei due avvolgimenti e mantenendo l'altro aperto



Per sapere in che rapporto stanno i due valori

basta fare il rapporto fra le induttanze

$$\frac{L_p}{L_s} = \frac{N_p^2}{N_s^2}$$

e possiamo concludere che esse stanno fra loro come il quadrato del rapporto spire

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 12 Elettromagnetiche, Magnetiche, Elettrostatiche  
 Paragrafo : 12.2 Elettromagnetismo: Induzione elettromagnetica  
 Argomento : 12.25 Induttanza e Mutua induzione

### INDUTTANZA RISULTANTE DA PIU' INDUCTORI IN SERIE

Si esamina come si distribuiscono le f.e.m. indotte e si calcola il valore complessivo dell'induttanza.

#### Il collegamento in serie

è quello qui illustrato: l'estremità di un induttore viene collegata con una del successivo in modo da formare una catena con le due estremità libere

A) La f.e.m. risultante  $E = E_1 + E_2 + E_3$

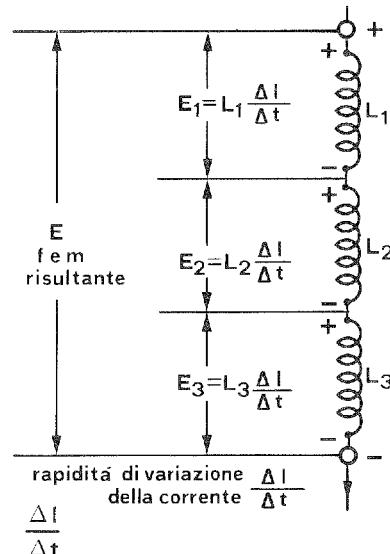
è uguale alla somma delle f.e.m. dei singoli componenti.

B) L'induttanza risultante

è quella che si riscontra ai capi del circuito serie.

Per un dato valore  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  di rapidità di variazione della corrente,

ai capi degli induttori e globalmente ai capi del circuito serie, si manifestano rispettivamente le seguenti f.e.m. indotte:



$$E_1 = L_1 \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad E_2 = L_2 \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad E_3 = L_3 \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Cerchiamo ora di calcolare il valore della induttanza complessiva  $L$  in funzione delle induttanze dei singoli induttori componenti.

Si parte dal concetto che la f.e.m. complessiva è somma delle f.e.m. dei singoli induttori; cioè

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = E_1 + E_2 + E_3 = L_1 \frac{\Delta I}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta I}{\Delta t} + L_3 \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Semplificando le espressioni differenziali si ottiene e si conclude

L'induttanza risultante di più induttori in serie è uguale ...

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

... alla somma delle singole induttanze componenti

#### C) Induttanza di induttori serie concatenati col medesimo circuito magnetico

Significa mettere in serie gli avvolgimenti appartenenti ad uno stesso nucleo magnetico.  
 Per il calcolo si parte dalla ormai nota relazione della induttanza (vedi 12.27-2).

$$\text{induttanza (in henry)} \rightarrow L = \frac{N^2}{\mu} \quad \begin{array}{l} \text{numero di spire} \\ \text{dell'avvolgimento} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{rilettanza del circuito} \\ \text{magnetico (in Asp/Wb)} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Nel nostro caso, come numero dispi-} \\ \text{re, prenderemo la somma algebrica} \\ \text{delle spire di ogni avvolgimento} \end{array}$$

cioè l'espressione si modificherà così

$$\text{Induttanza (in henry)} \rightarrow L = \frac{(N_1 + N_2 + N_3)^2}{\mu} \quad \begin{array}{l} \text{somma algebrica del numero di spire} \\ \text{di ogni avvolgimento} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{rilettanza del circuito magnetico} \end{array}$$

**Avvertenza:** A proposito della somma algebrica, bisogna star bene attenti alla polarità istantanea dei singoli avvolgimenti che, come è noto, può dipendere:

- a) dall'inversione di collegamento dei terminali di un avvolgimento
- b) dall'inversione del senso di rotazione di un avvolgimento rispetto agli altri.



### INDUTTANZA RISULTANTE DA PIU' INDUCTORI IN PARALLELO

Si esamina come si distribuiscono le correnti induttrici e si calcola il valore complessivo dell'induttanza.

#### Il collegamento in parallelo

è quello illustrato qui: le estremità di una parte vengono collegate fra di loro e così quelle dall'altra parte.

#### A) La f.e.m. risultante $E = E_1 + E_2 + E_3$

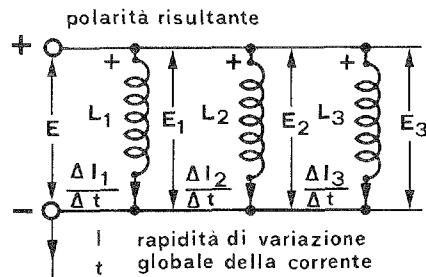
è uguale alla f.e.m. indotta ai capi di ciascuno dei componenti.

Le f.e.m. singole devono essere uguali fra di loro per definizione di collegamento parallelo.

#### B) L'induttanza risultante

è quella che si riscontra ai capi del circuito parallelo.

Per un dato valore  $E$  di forza elettromotrice indotta, si ha una distribuzione di rapidità di variazione di corrente in ciascun induttore dipendente dal valore dell'induttanza secondo la solita legge di Lenz (valori singoli e valore globale).



$$E = L_1 \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad E_2 = L_2 \frac{\Delta I_2}{\Delta t} \quad E_3 = L_3 \frac{\Delta I_3}{\Delta t} \quad E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Cerchiamo ora di calcolare il valore della induttanza complessiva  $L$  in funzione dell'induttanza dei singoli induttori componenti.

Si parte dal concetto che le singole f.e.m. indotte e quella complessiva sono uguali e si risolvono le relazioni precedenti rispetto alle variazioni  $\Delta I$  delle correnti tenendo presente che:

$$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 \quad \left. \begin{array}{l} \Delta I_1 = E \frac{\Delta t}{L_1} \\ \Delta I_2 = E \frac{\Delta t}{L_2} \\ \Delta I_3 = E \frac{\Delta t}{L_3} \end{array} \right\}$$

-----

$$\text{totale} \quad \Delta I = E \frac{\Delta t}{L} \quad \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right)$$

separando i termini

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} \frac{1}{E} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

$$\text{poiché} \quad L = E \frac{\Delta t}{\Delta I} \quad \text{è} \quad \frac{\Delta I}{\Delta t} \frac{1}{E} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

facendo l'inverso si può concludere che

L'induttanza risultante di più induttori in parallelo è uguale...

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}}$$

.. all'inverso della somma degli inversi delle singole induttanze.

#### C) Induttanza di induttori parallelo concatenati col medesimo circuito magnetio

Significa mettere in parallelo gli avvolgimenti appartenenti ad uno stesso nucleo magnetico.

La relazione è ancora questa stessa appena citata con l'avvertenza di tener conto del segno algebrico di ciascun termine in funzione delle eventuali inversioni di collegamento o di senso di rotazione del relativo avvolgimento.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	:	12.3	Elettromagnetismo in corrente alterlata
Argomento	:	12.30	Indice del paragrafo

Codice	Pagina
12.30	1

## **Paragrafo 12.3**

# **ELETTROMAGNETISMO IN CORRENTE ALTERNATA**

### **Indice degli argomenti e delle pagine**

**arg. 12.31 — Ricapitolazione**

- pag. 1 — Correnti indotte
- “ 2 — Forze elettromotrici indotte

**arg. 12.32 — F.e.m. nel circuito elettromagnetico**

- pag. 1 — Il trasformatore e le f.e.m. alternate in esso presenti
- “ 2 — L'induttore e la f.e.m. alternata in esso presente

**arg. 12.33 — Caratteristiche del trasformatore**

- pag. 1 — Rapporto di trasformazione di tensione di un trasformatore
- “ 2 — Effetti prodotti dalla corrente secondaria
- “ 3 — Rapporto di trasformazione di corrente di un trasformatore
- “ 4 — Correnti parassite

Sezione	: 1	Grandezze fondamentali
Capitolo	: 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	: 12.3	Elettromagnetismo in corrente alternata
Argomento	: 12.31	Ricapitolazione

## CORRENTI INDOTTE

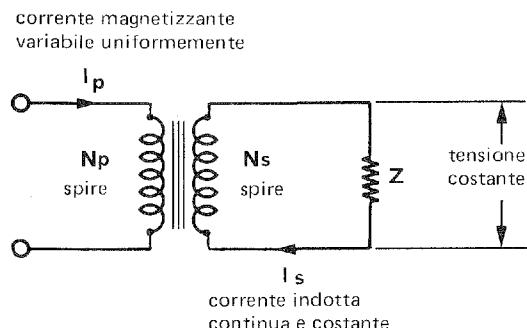
Si riprende l'argomento 12.25 e si cita un caso particolare.

Abbiamo visto che (ad avvolgimento induttore attraversato da corrente variabile) se si collega un carico all'avvolgimento indotto esso diviene sede di corrente che, nell'avvolgimento stesso, crea una f.m.m. opposta a quella creata dall'induttore.

Esaminando separatamente questo fenomeno da quello creato dall'induttore, diremo che l'indotto caricato crea una forza contro-elettromotrice sull'induttore che dipende, come al solito, dalle seguenti grandezze

$$\text{f.c.e.m. al primario (in volt)} \rightarrow E_1 = M \frac{\Delta I_s}{\Delta t} \quad \begin{matrix} \text{rapidità di variazione della corrente indotta (Amp/sec)} \\ \uparrow \\ \text{coefficiente di mutua induzione} \\ \downarrow \\ (\text{in henry}) \rightarrow M = \frac{N_p N_s}{\emptyset} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{numero spire primarie e secondarie} \\ \uparrow \\ \text{riluttanza (in Asp/Wb)} \end{matrix}$$

## A) F.c.e.m. in caso di corrente continua indotta



E' ormai noto che, per avere una corrente continua nel carico, è indispensabile avere una tensione costante ai capi dell'avvolgimento indotto  $N_s$ , e che per avere una tensione costante è sufficiente fare variare uniformemente la corrente magnetizzante nell'induttore.

La corrente continua che attraversa anche l'indotto, non crea alcuna f.c.e.m. sull'induttore, c'è da chiedersi da che parte provenga l'energia che inequivocabilmente alimenta il carico.

Nessun dubbio che essa provenga, sottoforma di corrente continua che si somma a quella variabile, dal generatore che alimenta l'induttore.

Infatti, la corrente smagnetizzante dell'indotto, provocherà una corrente continua nell'induttore che riportisterà la magnetizzazione perduta nel circuito magnetico.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.31	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.3	Elettromagnetismo in corrente alternata
		Argomento : 12.31	Ricapitolazione

### FORZE ELETTROMOTRICI INDOTTE

Si riprende l'argomento 12.25 e lo si adatta a particolari forme di variazioni di corrente.  
Si esaminano i risultati per avere delle idee chiare sui fenomeni.

L'espressione, in valore assoluto, della f.e.m. auto-indotta in un circuito elettromagnetico

dice che:

questa **forza elettromotrice** (in volt) **auto-indotta**, nel caso più generale, non è una costante, ma varia...

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

... e varia a seconda delle mutazioni di **rapidità di variazione della corrente** (rispetto al tempo) ed inoltre il valore della rapidità...

... deve essere moltiplicato per questo parametro fisso che si chiama **induttanza** e che dipende in questo modo dalle caratteristiche elettromagnetiche:

induttanza (in henry)

$$L = \frac{N^2}{R}$$

→ numero di spire (al quadrato)  
→ riluttanza (in Asp/Wb)

Abbiamo già visto che solo se la rapidità di variazione è la stessa in ogni istante (variazione uniforme), la f.e.m. auto-indotta **E** è costante e di valore proporzionale alla rapidità stessa (cioè, in gergo: mentre la corrente varia uniformemente, la tensione è continua); la polarità sarà relativamente negativa se la corrente cresce, positiva se la corrente decresce.

Ma se la rapidità di variazione della corrente non si mantiene costante, anche la tensione indotta varierà in funzione di questa rapidità.

Una corrente costante (in gergo: una corrente continua che non cambi di valore) invece non crea alcuna f.e.m. indotta (a causa del fatto che non si producono variazioni di corrente).

Quella piccola tensione che si dovesse riscontrare ai capi dell'avvolgimento è unicamente dovuta alla caduta di tensione della componente resistiva dell'avvolgimento stesso.

**Attenzione** - L'andamento della tensione indotta è generalmente diverso da quello della corrente: esso infatti (e lo ripeteremo fino alla noia) dipende non dai valori assoluti della corrente, ma unicamente dalla rapidità delle sue variazioni.

Meditiamo sui due casi particolari appena accennati:

- A) corrente: crescente uniformemente; → tensione: costante
- B) corrente: costante; → tensione: zero

**Esempio** - Una corrente da un miliardo di ampere ed una da pochi millampere, se non variano, non creano alcuna f.e.m. ai capi di un induttore; se entrambe variano allo stesso modo, creano la stessa f.e.m. indotta nello stesso induttore.

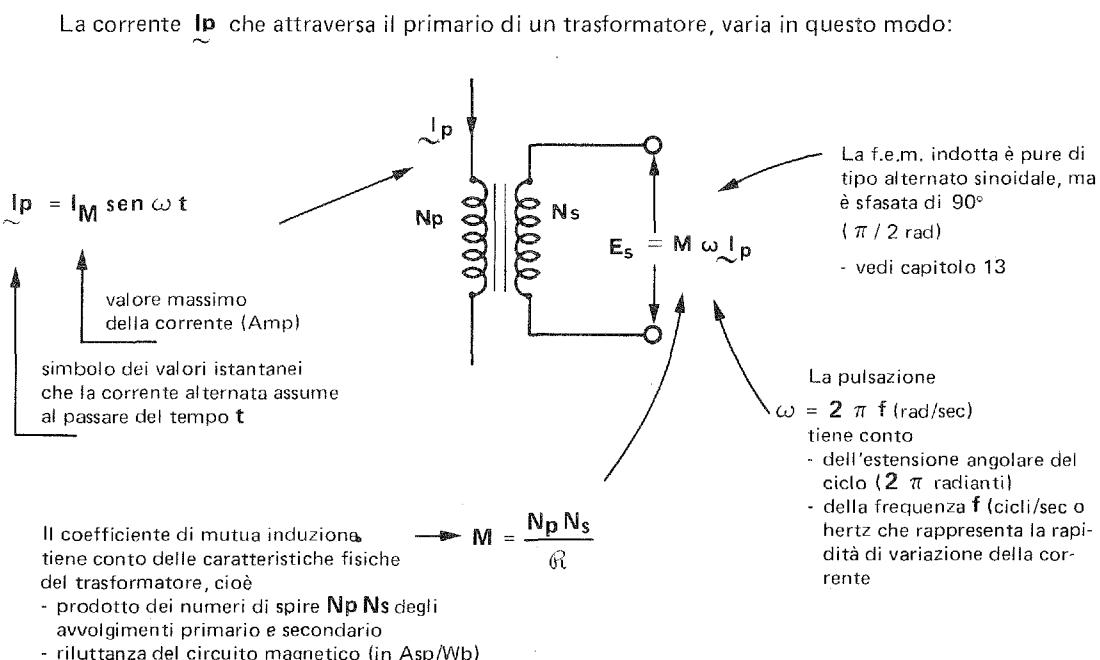
Infine, se la più piccola varia più rapidamente della grande, creerà una f.e.m. maggiore dell'altra.



### IL TRASFORMATORE E LE F.E.M. ALTERNATE IN ESSO PRESENTI

Si riprendono gli argomenti trattati in 12.28-1 e si adattano gli stessi concetti a correnti variabili sinusoidalmente.

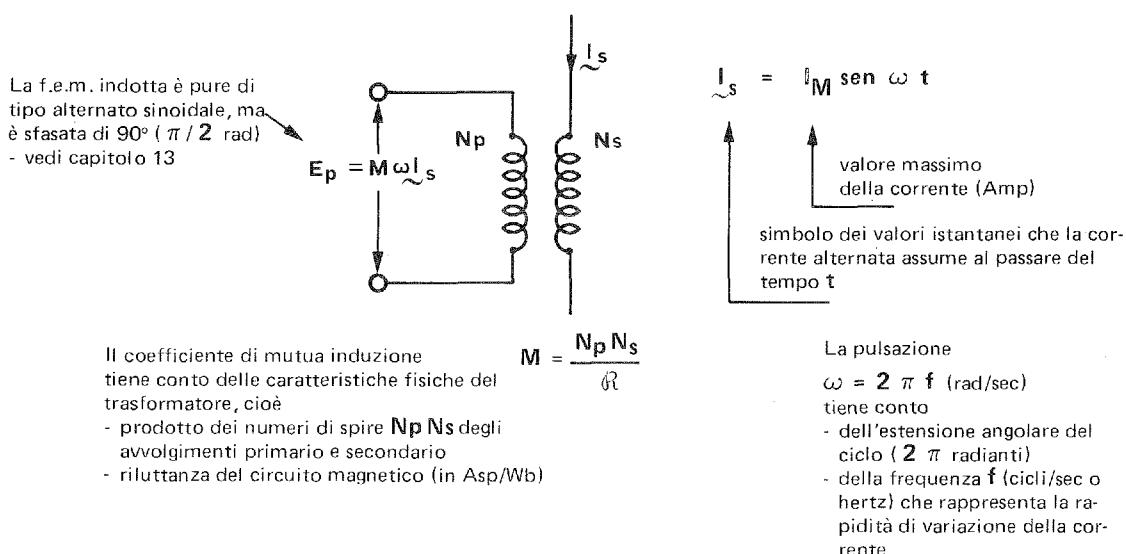
#### A) Primario induttore, secondario indotto



**Nota:** Il fenomeno è reversibile: la stessa corrente inserita nel secondario genera al primario la stessa f.e.m. (vedi caso B).

#### B) Primario indotto, secondario induttore

La corrente  $\tilde{I}_s$  che attraversa il secondario di un trasformatore, varia in questo modo:



**Nota:** Il fenomeno è reversibile: la stessa corrente inserita nel primario genera nel secondario la stessa f.e.m. (vedi caso A).

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12,3	Elettromagnetismo in corrente alternata
Argomento : 12,32	F.e.m. in un circuito magnetico



### L'INDUTTORE E LA F.E.M. ALTERNATA IN ESSO PRESENTE

Si riprendono gli argomenti in 12,25-4 e si adattano gli stessi concetti a correnti variabili sinusoidalmente.

La corrente  $\tilde{I}$  che attraversa l'avvolgimento di un induttore, varia in questo modo:

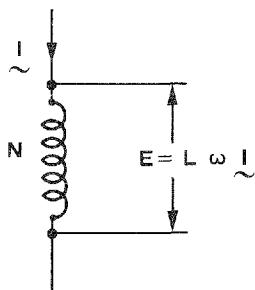
$$\tilde{I} = I_M \sin \omega t$$

valore massimo della corrente (Amp)

simbolo dei valori istantanei che la corrente alternata assume al passare del tempo  $t$

Il coefficiente di auto-induzione (induttanza) tiene conto delle caratteristiche fisiche dell'induttore, cioè

- numero di spire  $N$  (al quadrato) dell'avvolgimento
- riluttanza del circuito magnetico (in Asp/Wb)



La f.e.m. indotta è pure di tipo alternato sinusoidale, ma è sfasata di  $90^\circ$  ( $\pi/2$  rad)  
- vedi capitolo 13

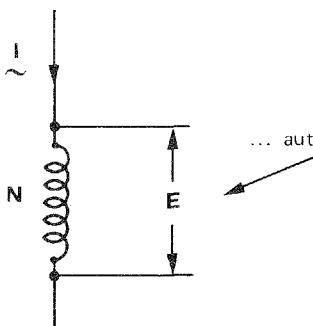
La pulsazione  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec) tiene conto

- dell'estensione angolare del ciclo ( $2\pi$  radianti)
- della frequenza  $f$  (cicli/sec o hertz) che rappresenta la rapidità di variazione della corrente

Illustriamo ora il "meccanismo" elettromagnetico in corrente alternata che sovrintende alla formazione di f.e.m. auto-indotta, pure alternata.

Sappiamo che una corrente alternata ...

... applicata all'avvolgimento dell'induttore di  $N$  spire ...



Questa f.e.m. è creata dal flusso alternato presente nel circuito magnetico dell'induttore.

valori istantanei del flusso che varia in questo modo

$$\tilde{\Phi} = \Phi_M \sin \omega t$$

valore massimo del flusso (Wb)

$$\Phi_M = \frac{NIM}{R}$$

$$\tilde{\Phi} = \frac{N \tilde{I}}{R}$$

valori istantanei della f.m.m. alternata

La f.e.m. autoindotta

$$E = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = N \frac{N \Delta I}{R \Delta t} = \frac{N^2}{R} E_M \cos \omega t$$

$$\frac{N^2}{R} = L \text{ induttanza (henry)}$$

(vedi capitolo 13)

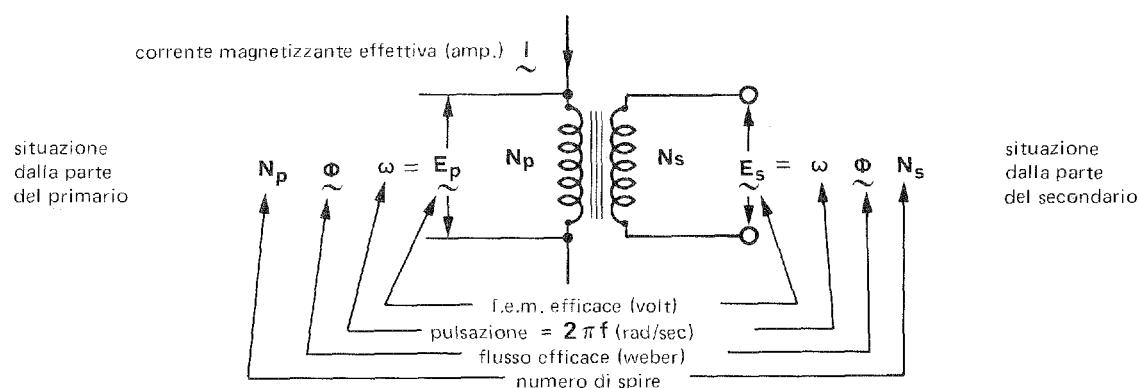
Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.3	Elettromagnetismo: in corrente alternata
Argomento : 12.33	Caratteristiche del trasformatore

## RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE DI TENSIONE DI UN TRASFORMATORE

E' logico che anche in corrente alternata si debbano raggiungere le stesse conclusioni tratte in 12.23-5: le f.e.m. ai capi di due avvolgimenti concatenati con lo stesso flusso, stanno fra loro come il corrispondente rapporto spire.

Diremo più generalmente che qualsiasi avvolgimento-concatenato con un flusso alternato, è sede di una f.e.m. indotta proporzionale al numero di spire dell'avvolgimento stesso.

Nel caso che andiamo ad esaminare, uno degli avvolgimenti è quello che genera il flusso alternato e si chiama avvolgimento magnetizzante o primario.



Ripetiamo che entrambi gli avvolgimenti sono concatenati al medesimo.

$$\Phi = \frac{N_p I}{R}$$

flusso alternato in valore efficace (weber)

riultanza del circuito magnetico (Asp/Wb)

numero di spire dell'avvolgimento magnetizzante o induttore o primario

valore efficace della corrente magnetizzante (amp)

Torniamo alle forze elettromotrici primaria e secondaria e facciamone il rapporto con le espressioni sopra riportate e semplifichiamo:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p \Phi \omega}{N_s \Phi \omega} = \frac{N_p}{N_s}$$

Da questa espressione possiamo concludere che le f.e.m. indotte stanno fra loro come il corrispondente rapporto spire.

Il rapporto si dirà in salita quando le spire dell'avvolgimento indotto (secondario) sono maggiori di quello induttore (primario); viceversa si dirà in discesa.

## Valore della corrente magnetizzante

Il primario si presenta ai capi del generatore con la sua (12.28-2)

$$L = \frac{N_p^2}{R}$$

che, a causa delle variazioni alternate, si trasforma in (vedi capitolo 13)...

$$X_L = \omega L$$

Per la legge di Ohm la corrente magnetizzante (amp)

$$I = \frac{V}{X_L}$$

reattanza dell'induttore (ohm) - vedi capitolo 13

tensione efficace del generatore (volt)

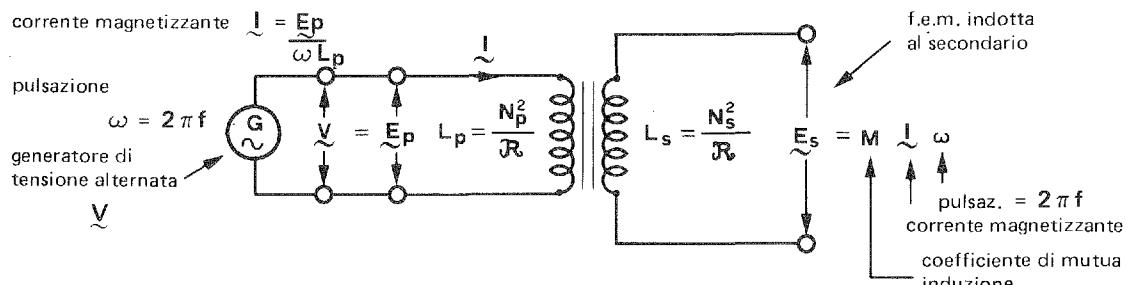


### **EFFETTI PRODOTTI DALLA CORRENTE SECONDARIA**

Esaminiamo in che modo si richiama energia dal generatore attraverso il primario per far fronte ad un criterio applicato.

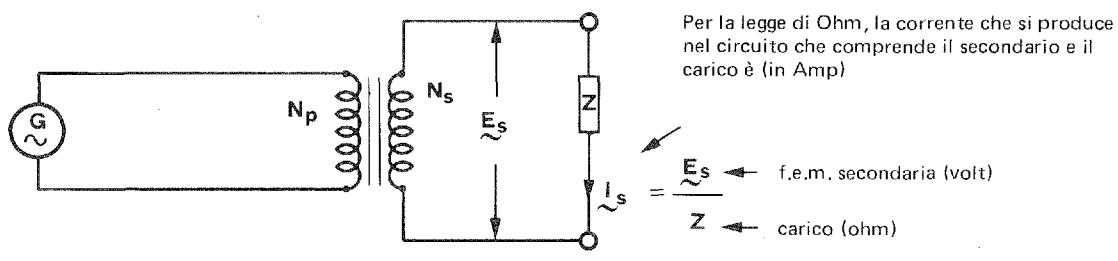
#### **Secondario aperto**

Riassumiamo quanto abbiamo visto alla pagina precedente.



#### **Secondario che alimenta un carico**

Per semplificare il problema, il carico collegato ai capi del secondario deve avere un valore  $Z$  (ohm) molto alto rispetto ai valori propri di induzione e di resistenza del trasformatore (impedenza: vedi capitolo 13) in modo che la corrente sia trascurabilmente poco influenzata da questi.



Questa corrente (in Amp), che attraversa l'avvolgimento secondario produce (12.24-2) un flusso smagnetizzante (in Wb) per la legge di Hopkinson

$$\Phi_s = \frac{I_s N_s}{R_t}$$

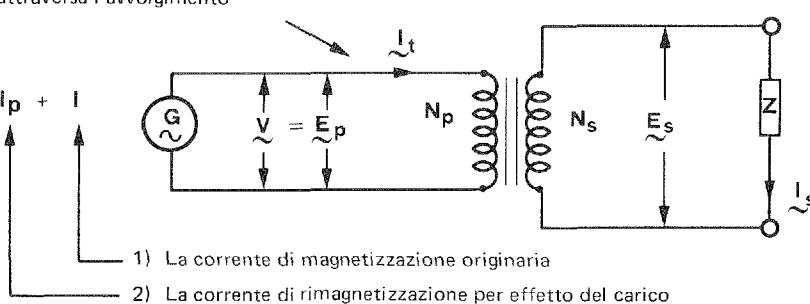
il prodotto  $I_s N_s$  corrisponde alla f.m.m. alternata efficace smagnetizzante (Asp)

rilettanza del circuito magnetico

La smagnetizzazione, così provocata nel circuito magnetico, obbliga il richiamo di ulteriore corrente dal generatore per ripristinare la magnetizzazione perduta.

La corrente che attraversa l'avvolgimento primario

ora è la somma di due componenti vettoriali



Attenzione : Questa somma di correnti si deve intendere vettoriale,

### RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE DI CORRENTE DI UN TRASFORMATORE

Dimostreremo che la corrente è maggiore nell'avvolgimento a minor numero di spire e viceversa.

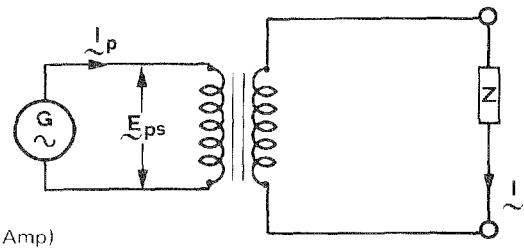
La corrente alternata, necessaria ad alimentare il carico collegato all'avvolgimento secondario, produce (vedi 12.33-2) un flusso magnetico alternato di direzione opposta a quello magnetizzante pure alternato.

Consideriamo per semplicità di ragionamento i soli effetti prodotti dal flusso smagnetizzante creato dal secondario chiuso su un carico.

Il flusso smagnetizzante produce (vedi 12.32-1) una forza contro-elettromotrice alternata efficace (in volt)

$$E_{ps} = M I_s \omega$$

pulsazione =  $2\pi f$   
corrente secondaria (Amp)  
coefficiente di mutua induzione



Supponiamo, come è vero, che l'impedenza propria del generatore sia trascurabile. La corrente che si genera nel circuito primario chiuso sul generatore è data (legge di Ohm)

$$I_p = \frac{E_{ps}}{\omega L_p}$$

forza contro-elettromotrice primaria efficace (volt) diviso  
reattanza del primario (ohm) - vedi cap. 13  
induttanza (henry) del primario  
pulsazione  $2\pi f$        $f$  = frequenza (in c/s o hertz)

Sviluppiamo questa espressione con quanto già conosciamo (vedi. 12.27-2 e 12.28-1)

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{E_{ps}}{\omega L_p} = \frac{M I_s \omega}{\omega L_p} = \frac{M}{\omega L_p} I_s = \frac{N_p N_s}{\omega l} I_s \\ &\quad \text{M} = \frac{N_p N_s}{\omega l} \\ &\quad L_p = \frac{N_p^2}{\omega l} \end{aligned}$$

ordiniamo in modo omogeneo i due membri dell'espressione

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

e concludiamo che le correnti (alternate) primaria e secondaria stanno fra loro come l'inverso del rapporto spire dei relativi avvolgimenti.

#### Raccomandazione

La magnetizzazione di un trasformatore con tensione continua crea valori molto alti di corrente magnetizzante, poiché viene a mancare la f.e.m. autoindotta (non producendosi variazioni di corrente). Essendo basso il valore della resistenza propria dell'avvolgimento, la corrente raggiunge valori tali da distruggerlo o da distruggere il generatore, se questi non è opportunamente protetto dai corti circuiti.

## CORRENTI PARASSITE

L'induzione elettromagnetica si verifica anche in qualsiasi materiale conduttore che sia attraversato dal flusso alternato, come il ferro del circuito magnetico. Inconvenienti e rimedi.

### Correnti indotte nel nucleo di ferro (correnti parassite)

Anche il nucleo di ferro, in quanto è materiale conduttore, è sede di f.e.m. indotte che generano correnti elettriche che circolano ad anello chiuso attraverso la massa conduttrice del materiale stesso.

Queste correnti richiamano energia dal generatore attraverso l'avvolgimento primario, ma non svolgono altro ruolo che scaldare inutilmente e dannosamente il nucleo ferroso.

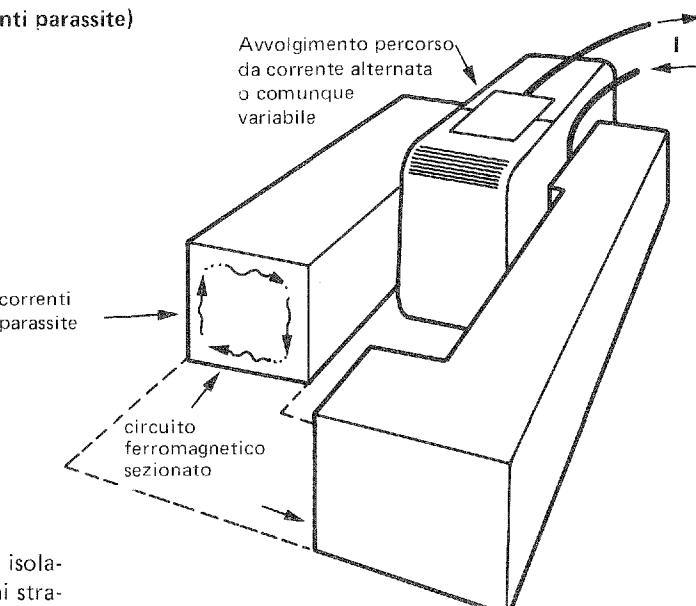
### Rimedi

#### A) Laminare il nucleo

Il nucleo è costituito di lamine di ferro isolate fra loro con vernice o con sottilissimi strati di carta incollata.

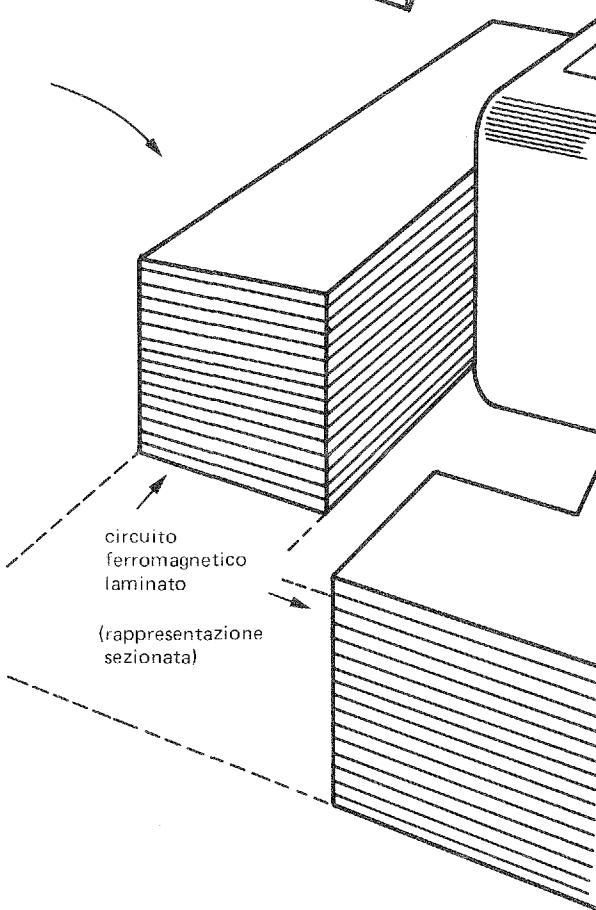
In questo modo le correnti parassite diminuiscono notevolmente per due motivi:

- 1) Le f.e.m. vengono frazionate nel numero di lamine che compongono il nucleo
- 2) La resistenza elettrica di ogni nucleo elementare, composto da ogni lamina, è notevolmente più alta.



#### B) Polverizzare il nucleo

Per circuiti magnetici destinati a sopportare alte frequenze di variazione di flusso magnetico, il nucleo è composto da polvere di ferro impastata con materiale isolante termoinduttore, cotto al forno.



#### C) Uso di sostanze minerali

Per altissime frequenze si usa la ferrite che è un materiale ceramico contenente ossido di ferro (e quindi con buona permeabilità magnetica) e contemporaneamente buon isolante elettrico.

#### D) Entità delle perdite con i materiali citati

Ridotte ai valori inferiori all'1%.

Sezione :	1	Grandezze fondamentali
Capitolo :	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo :	12.4	Azioni elettrodinamiche
Argomento :	12.40	Indice del paragrafo

## Paragrafo 12.4

### AZIONI ELETTRODINAMICHE

#### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 12.41 — Attrazione magnetica

- pag. 1 — I magneti si attirano secondo i poli opposti
- " 2 — Altri esempi di attrazione magnetica

arg. 12.42 — Repulsione magnetica

- pag. 1 — I magneti si respingono secondo i poli omonimi
- " 2 — Altri esempi di repulsione magnetica

arg. 12.43 — Spinta su un conduttore attraversato da corrente

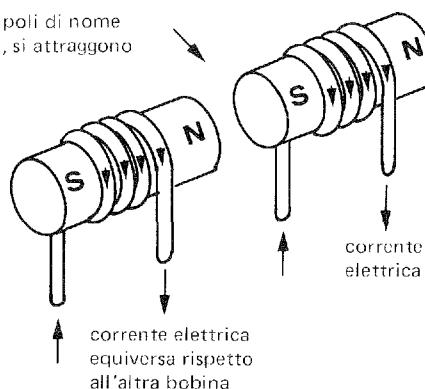
- pag. 1 — Azioni combinate su un conduttore attraversato da corrente quando è immerso in un campo magnetico
- " 2 — Azioni prodotte da correnti indotte

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.4	Azioni elettrodinamiche
Argomento : 12.41	Attrazione magnetica

### I MAGNETI SI ATTIRANO SECONDO I POLI OPPosti

Un campo magnetico ne attira o respinge un altro con l'unico scopo di massimizzare il proprio flusso. Sotto questo aspetto esamineremo le azioni di attrazione.

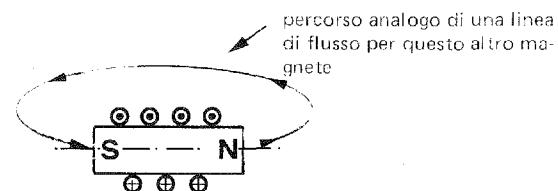
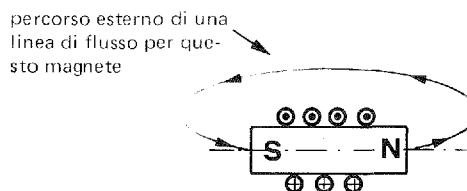
Due circuiti magnetici, i cui poli di nome opposto si trovino affacciati, si attraggono



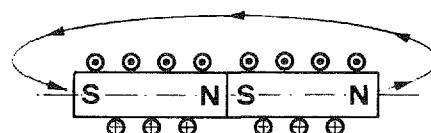
Ciò avviene perché insieme formano un magnete il cui flusso è maggiore di quello che compete a ciascuno

Il fenomeno si verifica per corrente magnetizzante continua, ma anche per corrente alternata, purché entrambe abbiano stessa frequenza e fase

Infatti, esaminiamo un percorso analogo per ciascun magnete, fra i tanti percorsi che costituiscono il mantello di flusso magnetico.



Qui è evidente che il percorso analogo di una linea di flusso, per i due magneti uniti coi poli di nome opposto, è inferiore alla somma dei singoli percorsi.



#### Conclusione

Minor percorso significa minore riluttanza magnetica e minore riluttanza significa maggior flusso, secondo la legge di Hopkinson o legge di Gm magnetica (vedi 12.14-1).

$$\Phi = \frac{NI}{R}$$

flusso magnetico (in weber)       $\Phi$  =      numero di spire del circuito elettrico  
 corrente che le percorre (ampere)       $NI$   
 riluttanza del circuito magnetico       $R$   
 (amperspire per weber = Asp/Wb)

Questo flusso aumenta dopo la congiunzione in quanto alla somma delle f.m.m. corrisponde una riluttanza inferiore alla somma delle singole riluttanze.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

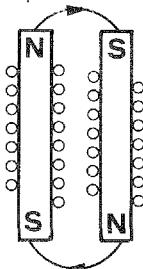
Codice 12.41

Pagina 2

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.4	Azioni elettrodinamiche
Argomento : 12.41	Attrazione magnetica

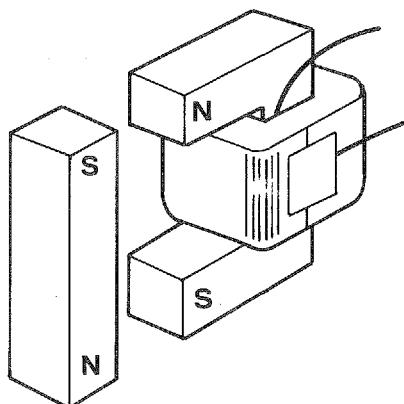
### ALTRI ESEMPI DI ATTRAZIONE MAGNETICA

Qualsiasi altro esempio di attrazione, come anche la repulsione, mostra che il fenomeno persegue sempre lo stesso scopo: massimizzare il flusso magnetico.



Due barrette magnetiche avvicinate dalla parte dei poli di nome opposto, si attirano per ridurre al minimo il percorso delle linee di flusso.

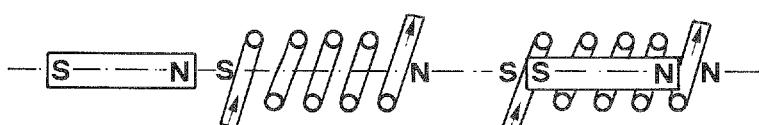
In questo modo, riducendo al minimo la riluttanza, si rende massimo il flusso magnetico.



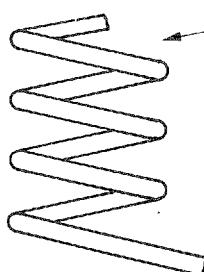
La presenza di ferro anche non magnetizzato, crea forze di attrazione, perché il ferro ha una riluttanza minore di un uguale spazio di aria.

L'attrazione avviene poi anche perché, non bastando il maggiore flusso creato dalla presenza del materiale a maggiore permeabilità (il ferro), il flusso si può incrementare ancora riducendo la parte in aria del circuito, finché il pezzetto di ferro non sia completamente a contatto con il nucleo magnetico.

I poli opposti vi si formano spontaneamente.



Una barretta di ferro il cui asse coincide con quello di un solenoide attraversato da corrente, viene attirato fino al centro.

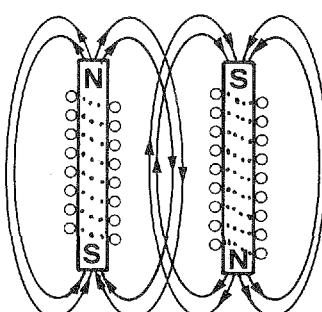
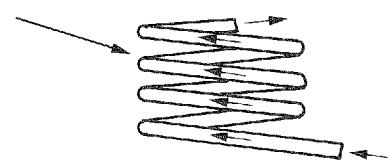


Le spire distanziate di un solenoide non attraversato da corrente ...

... tendono ad avvicinarsi quando sono attraversate da corrente.

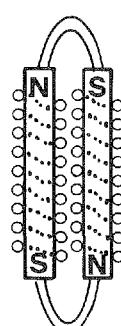
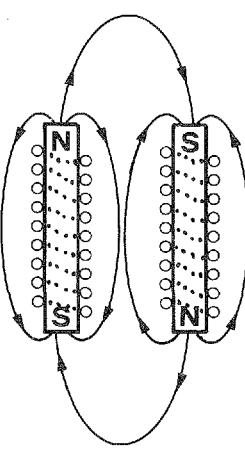
Il motivo è sempre lo stesso.

Avvicinandosi si abbrevia il percorso delle linee di flusso, diminuisce la riluttanza e aumenta il flusso.



Importante conclusione

Linee di flusso  
parallele  
e controverse  
creano attrazione

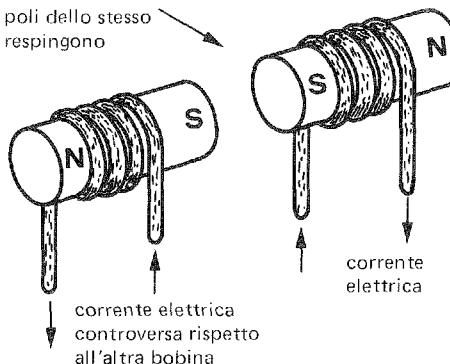


### I MAGNETI SI RESPINGONO SECONDO I POLI OMONIMI

Un campo magnetico ne attira o respinge un altro con l'unico scopo di massimizzare il proprio flusso. Sotto questo aspetto esaminiamo le azioni di repulsione.

Due circuiti magnetici, i cui poli dello stesso nome si trovino affacciati si respingono

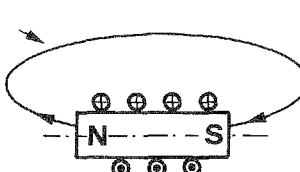
Ciò avviene perché insieme formano un magnete il cui flusso è minore di quello che si avrebbe se affacciati si trovasse i poli di nome opposto (vedi 12.41-1)



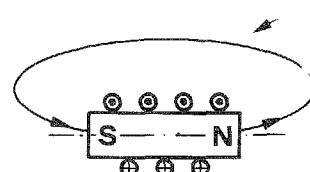
Il fenomeno si verifica per corrente magnetizzante continua, ma anche per corrente alternata, purché entrambe abbiano stessa frequenza e fase.

Infatti, esaminiamo un percorso analogo per ciascun magnete, fra i tanti percorsi che costituiscono il mantello di flusso magnetico.

percorso esterno di una linea di flusso per questo magnete

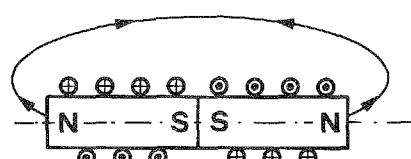


percorso analogo di una linea di flusso per quest'altro magnete



Anche se il percorso analogo per i due magneti uniti coi poli dello stesso nome è inferiore alla somma dei singoli percorsi, le singole f.m.m. ed i rispettivi flussi sono opposti.

La f.m.m. risultante ed il relativo flusso corrisponde alla differenza dei singoli valori.



#### Conclusione

Minore f.m.m. significa minore flusso secondo la legge di Hopkinson o legge di Ohm magnetica (vedi 12.14-1).

$$\Phi = \frac{NI}{R}$$

numero di spire del circuito elettrico  
 corrente che le percorre (ampere)  
 Il prodotto **NI** per il circuito magnetico si chiama  
 riluttanza del circuito magnetico  
 (amperspire per weber = Asp/Wb)

Questo flusso diminuisce dopo la congiunzione in quanto la f.m.m. diminuisce di più di quanto diminuisce la riluttanza.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

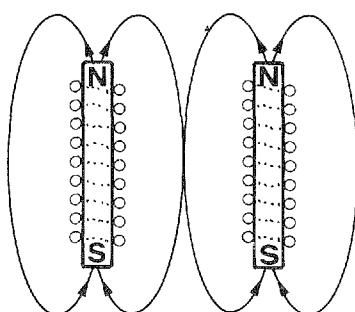
Codice **12.42**

Pagina **2**

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.4	Azioni elettrodinamiche
Argomento : 12.42	Repulsione magnetica

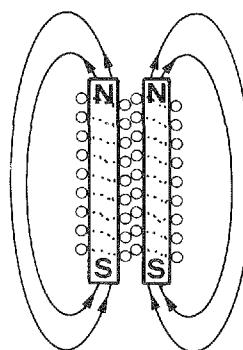
### ALTRI ESEMPI DI REPULSIONE MAGNETICA

Qualsiasi altro esempio di repulsione, come anche l'attrazione, mostra che il fenomeno persegue sempre lo stesso scopo: massimizzare il flusso magnetico.



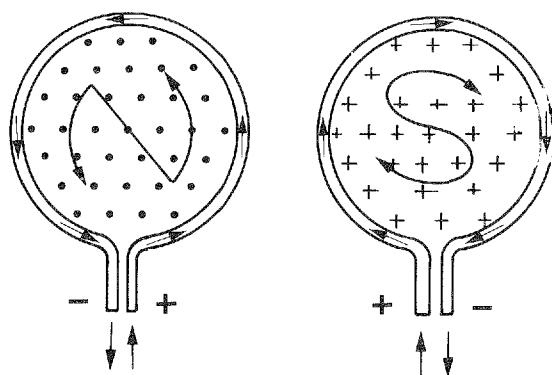
Due barrette magnetiche, avvicinate dalla parte dei poli dello stesso nome, si respingono perché la loro vicinanza crea un addensamento delle linee di flusso nello spazio compreso fra le barrette stesse.

Altre linee uscenti da un polo non possono entrare nel polo dell'altra da dove escono altre linee e perciò devono cercarsi un altro percorso per chiudersi sul polo opposto.



Essendo un altro percorso generalmente più lungo, ne deriva un aumento di riluttanza e diminuzione di flusso. Di qui perciò la preferenza, respingendosi, a starsene per conto loro con un flusso maggiore.

Le spire percorse da corrente tendono a dilatarsi.



Ogni spira di un solenoide attraversata da corrente come nelle figure, è sollecitata da un'azione che tende a dilatarla, perché, dilatandosi, aumenta la sezione di spazio abbracciata dal flusso e perciò diminuisce la riluttanza magnetica.

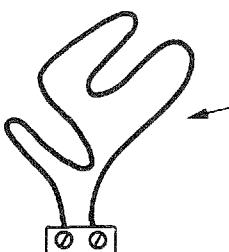
$$\text{Il flusso (Wb)} \rightarrow \Phi = \frac{NI}{R} \leftarrow \text{f.m.m. (Asp.)}$$

aumenta perché diminuisce la riluttanza (Asp/Wb)

Approfittiamo delle figure per illustrare un'altra regola mnemonica che mostra da che parte sta un polo magnetico in funzione del senso circolatorio della corrente.

Importante conclusione: linee di flusso parallele ed equivearse si respingono.

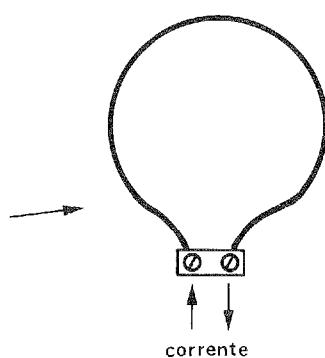
#### Esperimento



Si prenda un conduttore molto sottile, affinché sia molto flessibile, e lo si disponga in modo da abbracciare uno spazio molto ridotto.

Quando lo si fa attraversare da corrente esso si disporrà ben teso in cerchio.

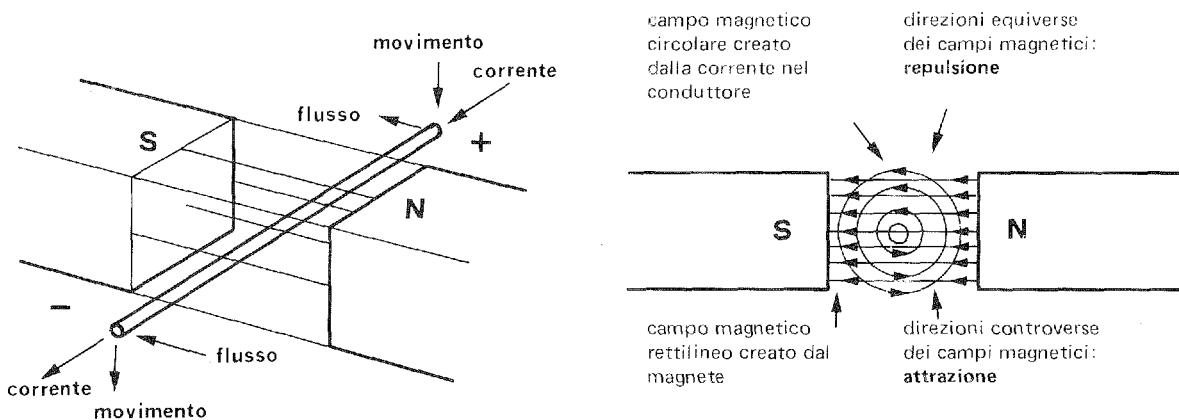
Infatti abbracciando la maggior superficie che la sua lunghezza gli possa consentire, esso ha massimizzato il flusso magnetico, riducendo al minimo la riluttanza del circuito magnetico stesso.



Sezione :	1	Grandezze fondamentali
Capitolo :	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo :	12.4	Azioni elettrodinamiche
Argomento :	12.43	Spinta su un conduttore attraversato da corrente

### AZIONI COMBINATE SU UN CONDUTTORE ATTRAVERSATO DA CORRENTE QUANDO E' IMMERSO IN UN CAMPO MAGNETICO

Un conduttore attraversato da corrente genera un campo magnetico che a sua volta crea azioni di attrazione e repulsione se è immerso in un altro campo magnetico.



Conclusion - Il conduttore, attratto verso il basso e respinto dall'alto, è costretto a muoversi verso il basso.

#### Osservazione

Se, anziché corrente continua, si introducesse corrente alternata, il conduttore sarebbe sollecitato ad un movimento oscillante verso l'alto e verso il basso.

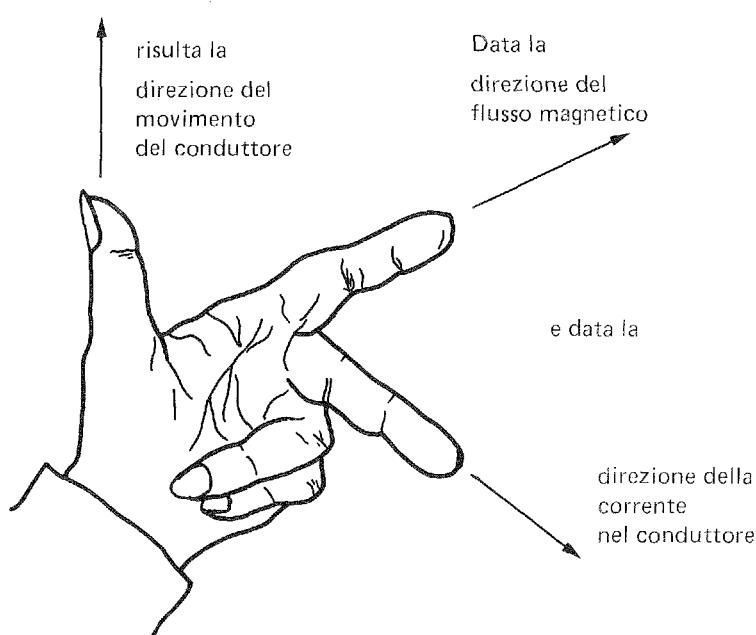
Regola mnemonica della mano sinistra per la determinazione del movimento del conduttore (ricordare: mano "mancina" iniziale M come motore)

Le direzioni delle tre seguenti grandezze  
 1) flusso magnetico  
 2) direzione della corrente  
 3) movimento del conduttore  
 sono perpendicolari fra loro.

Le dita della mano sinistra siano disposte secondo tre direzioni perpendicolari fra loro.

Ogni dito indicherà la direzione di una grandezza, come segue:

- pollice = **movimento**
- indice = **flusso**
- medio = **corrente**



**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 12.43

Pagina 2

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.4	Azioni elettrodinamiche
Argomento : 12.43	Spinta su un conduttore attraversato da corrente

### AZIONI PRODOTTE DA CORRENTI INDOTTE

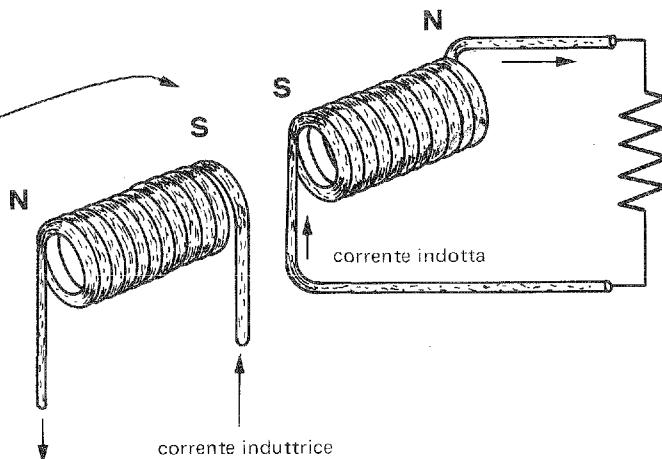
Anche le correnti smagnetizzanti indotte nel secondario di un trasformatore creano azioni di repulsione fra gli avvolgimenti.

In un istante la situazione è quella segnata in figura.

Poli dello stesso nome si trovano affacciati.

Azione: **repulsione**.

Invertendosi la direzione della corrente induttrice, si inverte anche la direzione della corrente indotta e perciò entrambe le coppie di poli si invertono mantenendo l'azione repulsiva.



#### Esperimento

Si formi una colonna con qualche decina di fili di ferro plastificato, lunghi circa 50 cm., legandoli ben stretti con uno spago.

Si prenda un anello metallico chiuso, che abbracci comodamente la colonna.

Attorno alla colonna, in prossimità della base, si formi un avvolgimento di qualche centinaio di spire di filo di rame isolato.

Si stringa bene l'avvolgimento alla colonna, mediante piccoli cunei di legno, stuzzicadenti, ecc.

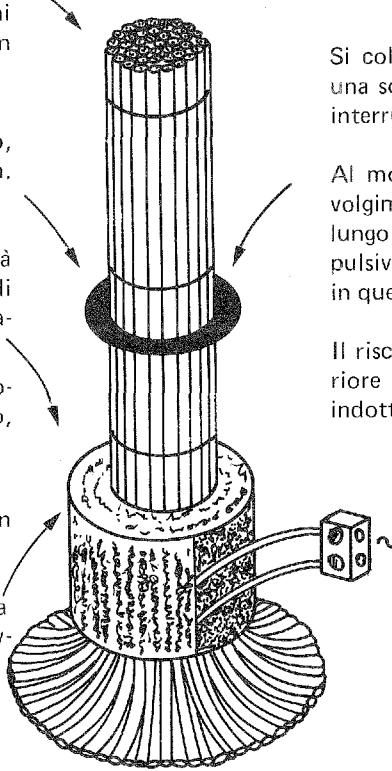
Si apri il fascio di fili della colonna, in modo da formare una solida base.

Si infili l'anello metallico attorno alla colonna e lo si lasci appoggiare all'avvolgimento.

Si collegino i capi dell'avvolgimento ad una sorgente di corrente alternata con un interruttore.

Al momento in cui si dà corrente all'avvolgimento l'anello metallico si solleverà lungo la colonna stessa finché l'azione repulsiva non farà equilibrio al suo peso ed in questo modo resterà sospeso.

Il riscaldamento dell'anello sarà una ulteriore prova della generazione di corrente indotta.



Si raccomanda di iniziare l'esperimento con tensioni modeste a scanso di spiacevoli sorprese.

La tensione può successivamente essere aumentata per rendere più appariscente il fenomeno.

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
<b>Paragrafo</b>	: 12.5	Magnetostatica
<b>Argomento</b>	: 12.50	Indice del paragrafo

## **Paragrafo 12.5**

# **MAGNETOSTATICA**

### **Indice degli argomenti e delle pagine**

#### **arg. 12.51 — Magneti permanenti**

- pag. 1 — Descrizione dei magneti permanenti e dei fenomeni che li riguardano
- " 2 — Proprietà dei magneti permanenti

#### **arg. 12.52 — Campi magnetostatici**

- pag. 1 — Metodi per rilevare la presenza di esempi magnetici permanenti
- " 2 — Campo magnetico terrestre

Sezione	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	12.5	Magnetostatica
Argomento	12.51	Magneti permanenti

## DESCRIZIONE DEI MAGNETI PERMANENTI E DEI FENOMENI CHE LI RIGUARDANO

Ci sono dei materiali che sono in grado di mantenere un flusso magnetico anche quando viene a cessare l'azione della forza magnetomotrice che lo ha creato.

Questi materiali, che contengono prevalentemente ferro, si chiamano **magneti permanenti**.

Ci sono anche materiali, cosiddetti **magneti naturali**, che si trovano in natura già allo stato magnetizzato.

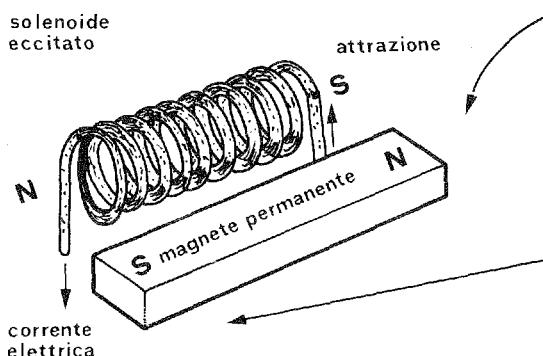
E' comunque impensabile che non ci sia stata, all'origine dei tempi, una forza magnetomotrice che li abbia creati e che poi sia venuta a mancare lasciando allo stato magnetizzato quei materiali che erano adatti a subire il fenomeno della magnetizzazione permanente.

**Magnetizzazione permanente** significa dunque mantenimento del flusso anche quando viene a mancare la forza magnetomotrice.

L'intero nostro pianeta è un esempio in grande di magnete permanente naturale: evidentemente tiene dentro di sé enormi quantità di materiale soggetto a magnetismo permanente.

## Polarità

Il magnete permanente ha le stesse proprietà magnetiche tipiche dei solenoidi percorsi da corrente e perciò possiede anche una polarità magnetica.

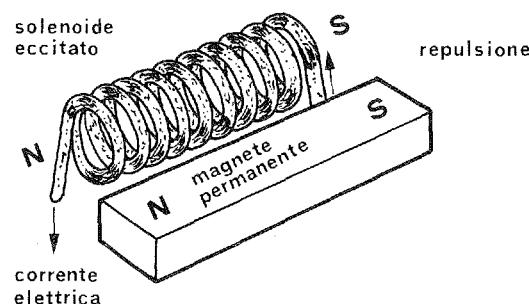


Chiameremo polo **Nord** di una barretta magnetizzata permanentemente quell'estremità che si lascia attirare dalla estremità sud di un solenoide eccitato (già percorso da corrente).

Ovviamente l'altra estremità si chiamerà polo **Sud** e sarà attirata dall'estremità nord del solenoide eccitato.

Fon di ir  
ma  
ne  
1975 A T Gilean - Proibita riservata a termini di legge. Repubblica Italiana - Senato - Camera

Lo stesso magnete permanente orientato in modo che le proprie estremità si trovino di fronte a quelle dello stesso nome di un solenoide eccitato, viene respinto.



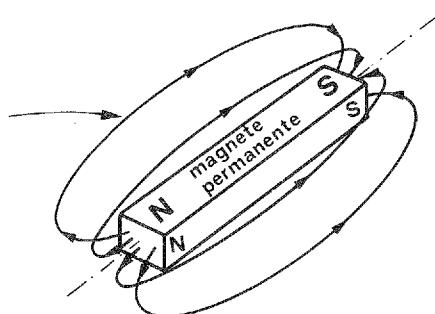
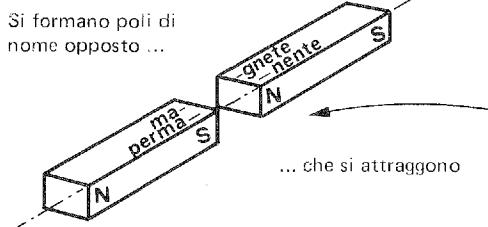
**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**Codice  
12.51

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Pagina : 2	Capitolo : 12 Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
	Paragrafo : 12.5 Magnetostatica
	Argomento : 12.51 Magneti permanenti

**PROPRIETA' DEI MAGNETI PERMANENTI****Il flusso magnetico si chiude sempre**

Anche il flusso generato da un magnete permanente non può restare aperto perché anche l'aria e il vuoto sono permeabili al magnetismo.

In un magnete permanente a forma di barretta, il campo magnetico si chiude verso l'esterno avvolgendo la barretta come un mantello.

**Taglio trasversale****Taglio longitudinale**

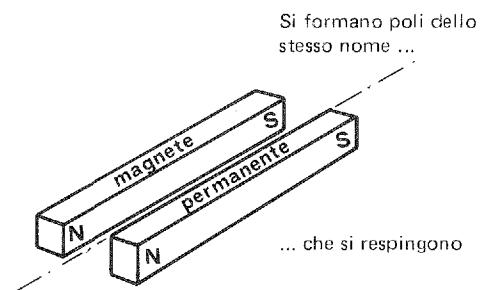
Se la barretta viene tagliata longitudinalmente, cioè lungo l'asse magnetico, su ciascun pezzo si formano poli dello stesso nome.

Questi poli ovviamente si respingono.

Spezziamo in due la barretta trasversalmente all'asse magnetico.

In corrispondenza del taglio si formano due poli di nome opposto fra di loro e opposto a quello della rispettiva estremità.

Questi poli ovviamente si attirano.

**Magnete elementare: dipolo**

Comunque si proceda nel tagliare il magnete permanente in pezzi sempre più minimi, si arriverà ad isolare una entità elementare provvista di **entrambi i poli**.

Ogni entità magnetica elementare si chiama **dipolo** e, se isolata, avrà il proprio circuito magnetico chiuso su di sè.

E' impossibile perciò isolare un polo solo perché è impensabile un circuito magnetico **aperto**.

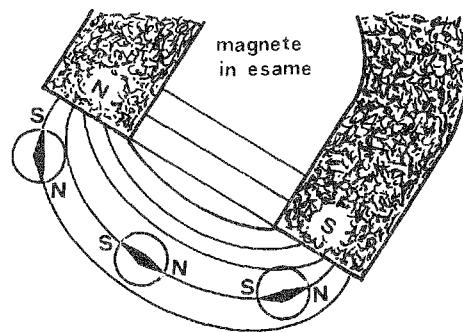
Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.5	Magnetostatica
Argomento : 12.52	Campi magnetostatici

## METODI PER RILEVARE LA PRESENZA DI CAMPI MAGNETICI PERMANENTI

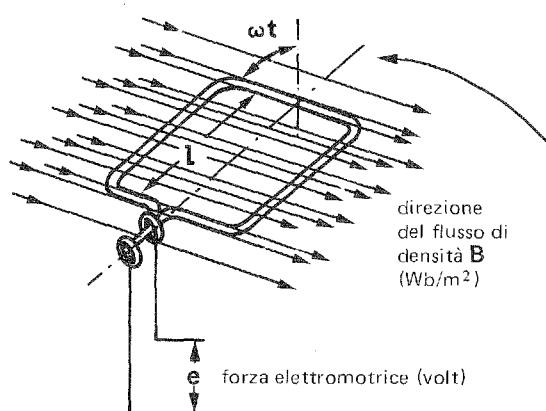
### Direzione del flusso (ago magnetico)

Abbiamo già visto (12.11-2) come, con un piccolo magnete permanente a forma di ago, sospeso nel suo baricentro e in grado di ruotare, si possano determinare non solo le linee del flusso, ma anche la polarità del magnete in esame.

Infatti, la punta Nord dell'ago si orienterà secondo la linea di flusso diretta verso il polo Sud del magnete in esame.



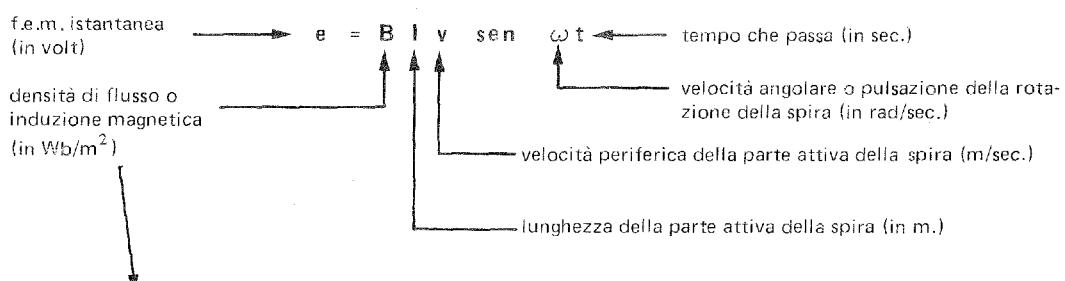
### Generazione di f.e.m. e densità del flusso (spira rotante)



Abbiamo già visto (12.23-3) che una spira rotante, immersa in un campo magnetico, è sede ai suoi capi di una forza elettromotrice.

Posto l'asse di rotazione della spira in posizione perpendicolare alla direzione del flusso, la f.e.m. non dipenderà dalla posizione angolare dell'asse, ma solo dalla posizione angolare  $\omega t$  (radiani) del piano della spira, variabile col tempo.

L'espressione della f.e.m. in funzione del tempo è la seguente:



Essa è definita dalla seguente relazione:

$$\text{densità di flusso (Wb/m}^2\text{)} \rightarrow B = \frac{\Phi}{A} \quad \begin{array}{l} \text{flusso (Wb)} \\ \hline \text{superficie attraversata da detto flusso (m}^2\text{)} \end{array} \quad \text{(praticamente corrisponde alla superficie della spira)}$$



## CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

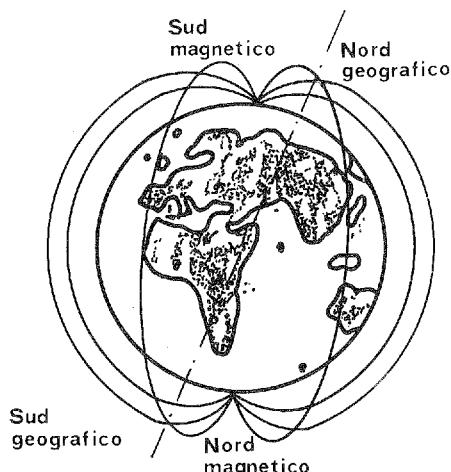
Proprietà magnetiche della Terra

### Localizzazione dei poli e direzione del campo

La Terra, in virtù della sua composizione interna, è un magnete permanente i cui poli magnetici non coincidono con i poli geografici.

Inoltre, fin dall'invenzione della bussola, si è commessa un'inesattezza.

Infatti, poiché sono i poli magnetici di nome opposto che si attirano, l'aver chiamato Nord la punta dell'ago magnetico che indicava il Nord geografico, si è finito per localizzare a Nord il polo Sud magnetico e viceversa. Non fa niente, basta saperlo!



### Posizione dei poli magnetici, rispetto alla posizione dei poli geografici

A parte l'inversione appena accennata, la posizione dei poli magnetici non coincide con la posizione dei poli geografici ed inoltre essa varia con il tempo in modo imprevedibile.

Nell'anno 1955 essa era (rispetto al meridiano di Greenwich)

Polo magnetico	Longitudine	Latitudine
Sud	73°, 5 N	100° W
Nord	71°, 5 S	151° E

### Linee di flusso

Le linee di flusso sono ben lontane dall'essere regolari e distribuite, almeno in superficie, a causa della irregolare distribuzione sulla Terra dei bacini minerari di materiali ferrosi e dell'irregolare posizione e distribuzione del nucleo terrestre chiamato NiFe (Nichel, Ferro).

Anche in quota la distribuzione del flusso è alterata dall'influenza del campo magnetico solare.

Perciò le linee di flusso non sono né parallele ai meridiani (**declinazione magnetica**) né orizzontali (**inclinazione magnetica**).

### Densità di flusso

Per avere un'idea dell'ordine di grandezza della densità del campo magnetico terrestre, diremo che esso varia fra (0,25 e 0,7)  $10^{-9}$  Wb/m<sup>2</sup>.

In particolare nelle seguenti località è

Località	Densità di flusso ( $10^{-9}$ Wb/m <sup>2</sup> )
Polo magnetico Sud	0,7
Indonesia (tropici)	0,35
Galapagos (equatore)	0,25

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	:	12.7	Elettrostatica
Argomento	:	12.70	Indice del paragrafo

## Paragrafo 12.7

# ELETTROSTATICÀ

### Indice degli argomenti e delle pagine

**arg. 12.71 — Carica elettrica e campo elettrostatico**

- pag. 1 — Proprietà elettrostatiche delle cariche elettriche
- " 2 — Potenziale o tensione della carica elettrica

**arg. 12.72 — Valore relativo del potenziale**

- pag. 1 — Segno reciproco di due cariche elettriche
- " 2 — Segno reciproco di più cariche elettriche

**arg. 12.73 — Flusso elettrostatico e carica elettrica**

- pag. 1 — Importanti proprietà delle cariche elettriche
- " 2 — Densità di carica e dielettricità

**arg. 12.74 — Densità di carica e gradiente di tensione**

- pag. 1 — Definizione di gradiente di tensione del campo elettrico
- " 2 — Costante dielettrica assoluta

**arg. 12.75 — Condensatore e capacità**

- pag. 1 — Struttura e parametri del condensatore
- " 2 — Modifica della costante dielettrica in un condensatore carico
- " 3 — Modifica della distanza fra le armature di un condensatore carico
- " 4 — Modifica della superficie delle armature di un condensatore carico
- " 5 — Collegamenti in serie dei condensatori
- " 6 — Collegamenti in parallelo dei condensatori

### PROPRIETA' ELETTROSTATICHE DELLE CARICHE ELETTRICHE

Si illustrano le proprietà elettrostatiche delle cariche elettriche e si riscontra che il campo elettrostatico forma un circuito aperto.

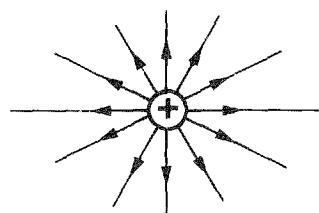
Una certa **carica elettrica** (10.11-2), è individuata come una **quantità di elettricità** e si misura in **coulomb** (simbolo **C**).

Ogni carica elettrica può essere **positiva** o **negativa** ed è isolabile.

Essa, sia positiva o negativa, sia ferma o in moto, irradia il suo **Campo elettrico** uniformemente, se l'ambiente in cui essa è immersa (es. il vuoto o l'aria) è "dielettricamente" uniforme.

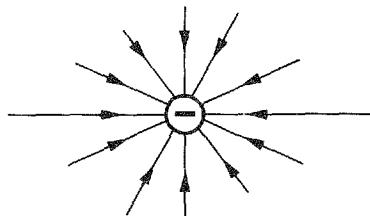
Infatti

una carica elettrica **positiva**,  
ben isolata e distante da qualsiasi altra,  
determina un campo elettrico radiale



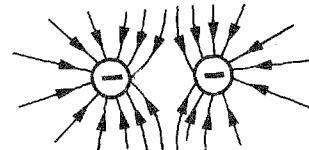
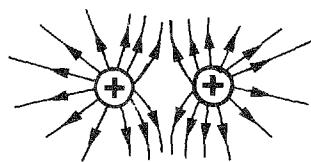
che, per convenzione immaginiamo diretto  
**verso l'esterno**.

una carica elettrica **negativa**,  
ben isolata e distante da qualsiasi altra,  
determina un campo elettrico radiale



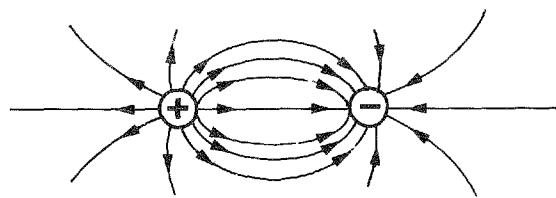
che, per convenzione immaginiamo diretto  
**verso il centro**.

La presenza di altre cariche elettriche disturba l'uniformità del campo. Infatti, siccome  
**due cariche dello stesso segno si respingono**



il campo di entrambe si deformerà come mostrato nelle figure: mentre, siccome

**due cariche di segno opposto si attraggono**



il campo assumerà la configurazione illustrata qui sopra.

**Attenzione.** Anche nel caso di attrazione il circuito è aperto.  
Infatti, seguendo le linee secondo la loro direzione, si nota che esse non formano un anello chiuso, ma vanno dal polo positivo al polo negativo senza tornare indietro.

**Osservazione.** Una carica, solo quando è in movimento, crea anche un campo magnetico chiuso: di questo se ne è parlato nei capitoli precedenti.

L'uniformità del campo elettrostatico può essere disturbata anche dalla non uniformità del mezzo in cui una carica si trova immersa, come vedremo di seguito.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.71	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.7	Elettrostatica
		Argomento : 12.71	Carica elettrica e Campo elettrostatico

**POTENZIALE O TENSIONE DELLA CARICA ELETTRICA**

Si fanno alcune considerazioni sulla carica elettrica come entità e sui potenziali che essa può assumere.

**Non esiste una legge di Ohm elettrostatica**

Infatti, poiché il circuito del campo elettrico è aperto, manca il concetto di flusso come termine analogo alla corrente.

**Potenziale**

Il termine analogo alla tensione è invece il potenziale della carica.

Esso è però un termine di confronto fra due entità, quindi non si potrà mai parlare di potenziale assoluto di una carica, ma di un potenziale di una carica rispetto ad un'altra.

Anche quando si parla di tensione di una carica rispetto ad un **potenziale di riferimento**, è evidente che si intende tensione "rispetto ad un'altra carica che è presente nel punto preso come riferimento".

**Confronto.** Anche l'acqua che si trova in un serbatoio posto in cima ad una torre possiede:

- una certa quota (potenziale) rispetto al suolo,
- un'altra quota rispetto al livello del mare,
- ed un'altra ancora (negativa, perché più bassa) rispetto alla cima della montagna vicina.

Il "mettere a terra" un determinato apparecchio significa fare assumere alle sue strutture metalliche il medesimo potenziale del suolo, collegando l'apparecchio col suolo stesso mediante un conduttore.

**Coulomb, polarità, elettroni e protoni**

Si è già visto in 10.11-2 che per unità di carica elettrica **negativa** si è preso un quantitativo di **elettroni** pari a  $6.25 \times 10^{18}$  e lo si è chiamato **coulomb** (simbolo C).

Allo stesso modo, per unità di carica elettrica **positiva** si prende lo stesso quantitativo di **protoni** e questa carica ha ovviamente lo stesso nome: **coulomb** (simbolo C).

**Potenziale della carica ed energia**

Tensione e potenziale applicati alle cariche elettriche possono sviluppare energia che si misura in **joule**.

Diremo infatti che:

due cariche di 1 coulomb possiedono il potenziale di 1 volt  
quando, nella posizione in cui si trovano

se sono di ugual segno | se sono di segno opposto  
allontanandosi fino all'infinito

cedono richiedono

l'energia di 1 joule, mentre diminuisce la loro forza di attrazione  
repulsione

oppure

provenendo da distanza infinita

richiedono cedono

l'energia di 1 joule, mentre aumenta la loro forza di attrazione  
repulsione

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.7	Elettrostatica
Argomento : 12.7.2	Valore relativo del potenziale

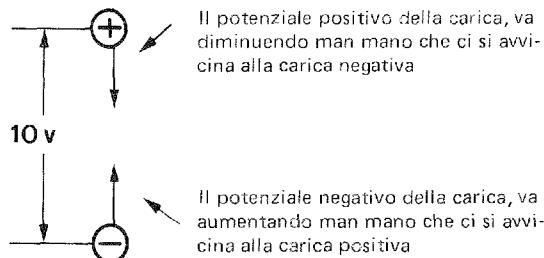
## SEGNO RECIPROCO DI DUE CARICHE ELETTRICHE

Si fanno alcune osservazioni per evitare quegli errori di interpretazione a cui i neofiti vanno frequentemente incontro.

## Esempio

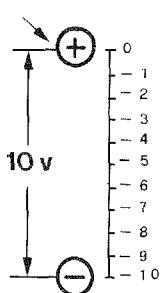
Si abbiano due cariche uguali ed immobili, ma di segno opposto, fra le quali esista la tensione di 10 volt.

Passare da una carica all'altra non significa passare da 10 volt positivi a 10 volt negativi o viceversa, significa variare rispettivamente in diminuzione o in aumento di 10 volt il potenziale di partenza.



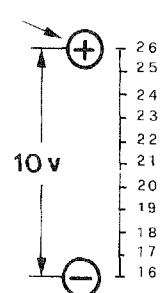
## A) Si passa dal potenziale positivo al negativo per valori decrescenti

Se la carica positiva si trova ad un potenziale di riferimento uguale a 0 V



si passa dalla positiva alla negativa per valori decrescenti da 0 V a -10 V

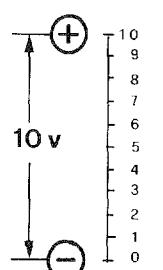
Se la carica positiva si trova ad un potenziale di 26 volt



si passa dalla positiva alla negativa per valori decrescenti da 26 V a 16 V

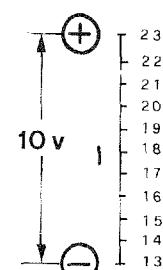
## B) Si passa dal potenziale negativo al positivo per valori crescenti

Se la carica negativa si trova ad un potenziale di riferimento uguale a 0 V



si passa dalla negativa alla positiva per valori crescenti da 0 V a 10 V

Se la carica negativa si trova ad un potenziale di riferimento di 13 volt



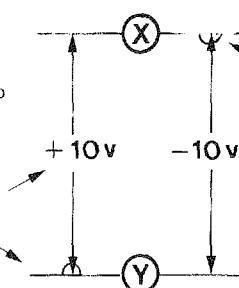
si passa dalla negativa alla positiva per valori crescenti da 13 V a 23 V

## Osservazione

Talvolta, anziché segnare le polarità, si usa mettere il segno accanto al valore numerico.

In questo caso, bisogna mettere bene in evidenza a quale carica ci si riferisce rispetto all'altra.

Infatti, in questo modo indicheremo che la carica X si trova ad un potenziale di 10 V superiore alla carica Y



mentre in questo modo indicheremo che la carica Y si trova ad un potenziale di 10 V inferiore alla carica X

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
12.72	2	Capitolo : 12	Elettromagnetiche, Magnetiche Elettrostatiche
		Paragrafo : 12.7	Elettrostatica
		Argomento : 12.72	Valore relativo dei potenziali

**SEGNO RECIPROCO DI PIU' CARICHE ELETTRICHE**

Continuano le osservazioni per evitare quegli errori di interpretazione a cui i neofiti vanno più frequentemente incontro.

Vedremo come due cariche dello stesso segno, possono avere diversa polarità a seconda del potenziale che una ha rispetto all'altra.

**Esempio:** Una carica, positiva rispetto all'altra, può essere negativa rispetto ad una terza che si trovi ad un potenziale superiore rispetto ad essa.

A) Tre cariche si trovino a potenziali diversi fra loro

1) Sia la carica Y quella in esame e supponiamo che si trovi di 6 V superiore ...

3) Si osservino bene le polarità che sono segnate da questa parte

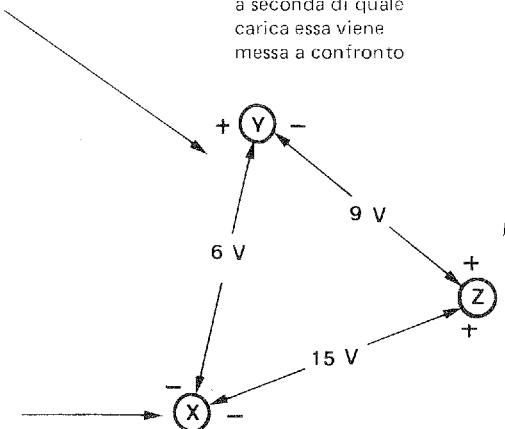
2) ... alla carica X

5) Come si vede la carica Y assume polarità diversa a seconda di quale carica essa viene messa a confronto

4) La carica Z sia di 9 V superiore alla carica Y.

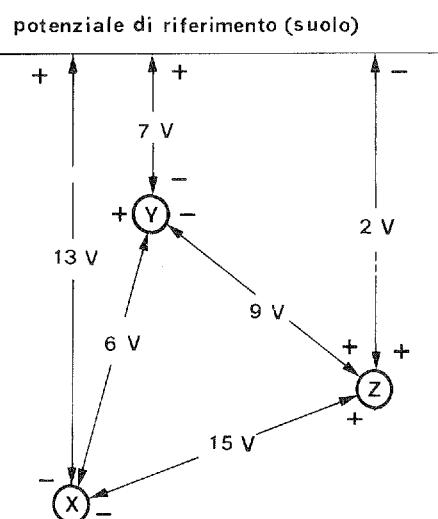
E' evidente che le due cariche debbano possedere due polarità relative come quelle segnate da questa parte

6) Le polarità relative alle cariche X e Z invece vanno bene così perché in ogni caso Z è superiore a X



B) La carica Y, delle stesse tre di prima, si trovi ad un potenziale di 7 V inferiore a quello di un punto di riferimento (ad es. il suolo)

La carica X si trova di 13 V inferiore al potenziale del suolo essendo di 6 V inferiore alla carica Y, la quale si trova di 7 V inferiore al potenziale del suolo.



La carica Z si trova di 2 V superiore al potenziale del suolo essendo di 9 V superiore alla carica Y, la quale si trova di 7 V inferiore al potenziale del suolo

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 12 Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche  
 Paragrafo : 12.7 Elettrostatica  
 Argomento : 12.73 Flusso elettrostatico e carica elettrica

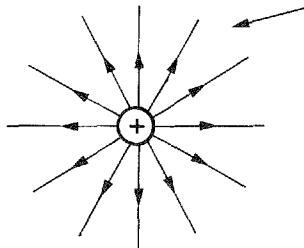
### IMPORTANTI PROPRIETA' DELLE CARICHE ELETTRICHE

Si esaminano alcune proprietà delle cariche elettriche in rapporto al flusso che esse irradiano o che intercorre fra loro.

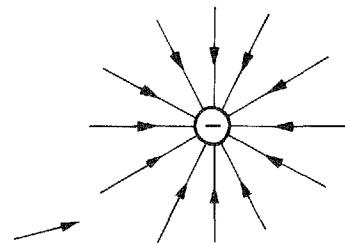
#### FLUSSO E CARICA ELETTRICA SI IDENTIFICANO

##### Cariche di ugual segno

Come abbiamo visto al 12.71-2, non esiste una legge di Ohm elettrostatica, perciò il concetto di flusso si identifica con la carica stessa.



Quindi (12.71-2)  
 la carica di 1 coulomb positiva,  
 genera un flusso uscente di 1 coulomb  
 mentre  
 la carica di 1 coulomb negativa,  
 genera un flusso entrante di 1 coulomb



Due o più cariche da 1 coulomb dello stesso segno, generano un flusso di 2 o più coulomb.

##### Cariche di uguale quantità e di segno opposto

Il flusso che emana dalla positiva viene interamente "assorbito" dalla negativa.

##### Cariche di quantità diversa e di segno opposto

Si "scambiano" il flusso competente alla minore e irradiano l'eccedenza.

**Esempio:** Due cariche di segno opposto, di valore rispettivamente di 2 e 5 coulomb, si scambiano il flusso di 2 coulomb e irradiano la rimanenza (3 coulomb). Questo flusso avrà la stessa polarità della carica maggiore.

In definitiva, vale l'espressione algebrica per due cariche di segno opposto

$$\begin{array}{ccc} \text{valore del flusso} & & \text{valore della carica 1 (C)} \\ \text{elettrico risultante} & \longrightarrow Q = & Q_1 + Q_2 \\ (\text{C}) & & \downarrow \\ & & \text{valore della carica 2 (C)} \end{array}$$

**Nota.** I segni algebrici, che accompagnano i valori, coincidono con quelli elettrici.

La stessa espressione vale anche quando le cariche sono più di due ma con le seguenti precisazioni:

$$\begin{array}{ccc} \text{valore del flusso} & & \text{somma (in coulomb) delle} \\ \text{elettrico risultante} & \longrightarrow Q = & \text{cariche aventi lo stesso segno} \\ (\text{coulomb}) & & \downarrow \\ & & \text{somma (in coulomb) delle} \\ & & \text{cariche aventi segno opposto} \end{array}$$

**Nota.** Se i termini di questa espressione sono di segno opposto, essa si riduce ad una differenza.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 12.73

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Pagina : 2	Capitolo : 12 Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
	Paragrafo : 12.7 Elettrostatica
	Argomento : 12.73 Flusso elettrostatico e carica elettrica

### DENSITA' DI CARICA E DIELETTRICITÀ'

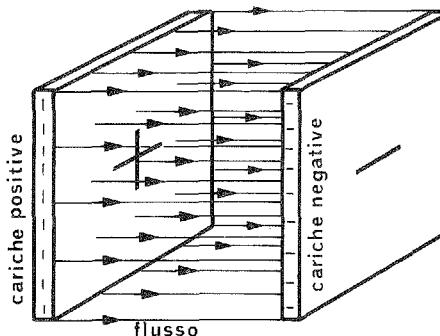
Non potendo funzionare la legge di Ohm per l'elettrostatica, si cercano altri modi per spiegare l'effetto dall'addensamento delle linee di flusso provocate da particolari materiali "dielettrici".

#### Flusso emanante e raccolto da cariche distribuite su di un piano

Le piastre a lato sono metalliche e sono caricate elettricamente di segno opposto, in eguale quantità.

La reciproca attrazione delle cariche e la teoricamente perfetta proprietà isolante del mezzo che le separa, fanno sì che le cariche restino inalterate sulle superfici affacciate.

Le cariche positive emanano un flusso elettrico che viene interamente raccolto dalle cariche negative.



E' importante notare che: **il flusso non cambia comunque si allontanino o si avvicinino le due piastre.**

#### Densità di carica

Poichè la carica si identifica col flusso (12.73-1), avremo una

$$\text{densità di flusso} \quad \longrightarrow \quad D = \frac{Q}{S} \quad \begin{array}{l} \text{carica (in coulomb)} \\ \text{diviso} \\ \text{superficie di ogni piastra} \\ (\text{in } m^2) \end{array}$$

o di carica  
(in coulomb/m<sup>2</sup>)

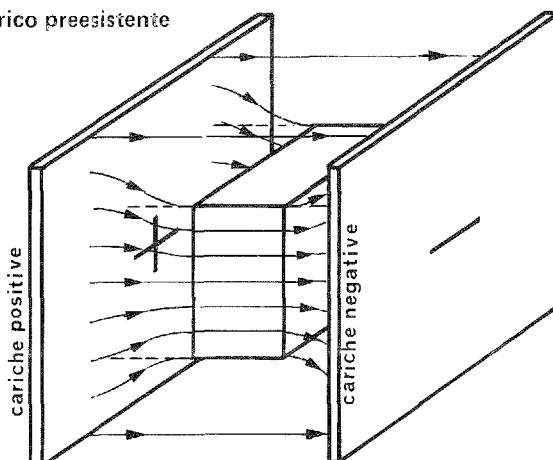
#### Introduzione di un materiale dielettrico nel mezzo dielettrico preesistente

Il materiale dielettrico crea un addensamento delle linee di flusso attraverso di esso.

E' evidente che il flusso totale non varii, perché dipende unicamente dalle cariche.

Concluderemo perciò, per il momento, che il materiale dielettrico ha la facoltà di aumentare la densità del flusso, nel suo interno.

Per le caratteristiche del materiale dielettrico vedi sez. 2.



#### Costante dielettrica relativa di un materiale

Il rapporto fra

$$\frac{\text{la densità di flusso} \quad \longrightarrow \quad D_d}{\text{la densità di flusso} \quad \longrightarrow \quad D} = \epsilon_r \quad \begin{array}{l} \text{nel dielettrico} \\ (\text{coulomb } m^2) \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{nel vuoto circostante} \\ (\text{coulomb } m^2) \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{si chiama} \\ \text{costante dielettrica relativa} \end{array}$$

e

Essa è un numero puro e dice praticamente quante volte quel materiale è più dielettrico del vuoto.

Sezione	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo	12.7	Elettrostatica
Argomento	12.74	Densità di carica e Gradiente di tensione



## DEFINIZIONE DI GRADIENTE DI TENSIONE DEL CAMPO ELETTRICO

Si studiano le relazioni che intercorrono tra carica elettrica, flusso, tensione e distanza fra due piastre metalliche immerse nel vuoto.

## Flusso e tensione

L'unico modo per modificare il flusso elettrostatico fra le piastre è quello di far variare il numero di cariche su ciascuna piastra, e l'unico modo di far variare il numero di cariche è quello di modificare la tensione (in volt) fra la piastra positiva e quella negativa.

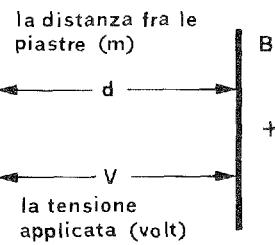
## Tensione e gradiente di tensione

Dati →

il rapporto

$$\frac{\text{tensione applicata (volt)}}{\text{distanza fra le piastre (m)}}$$

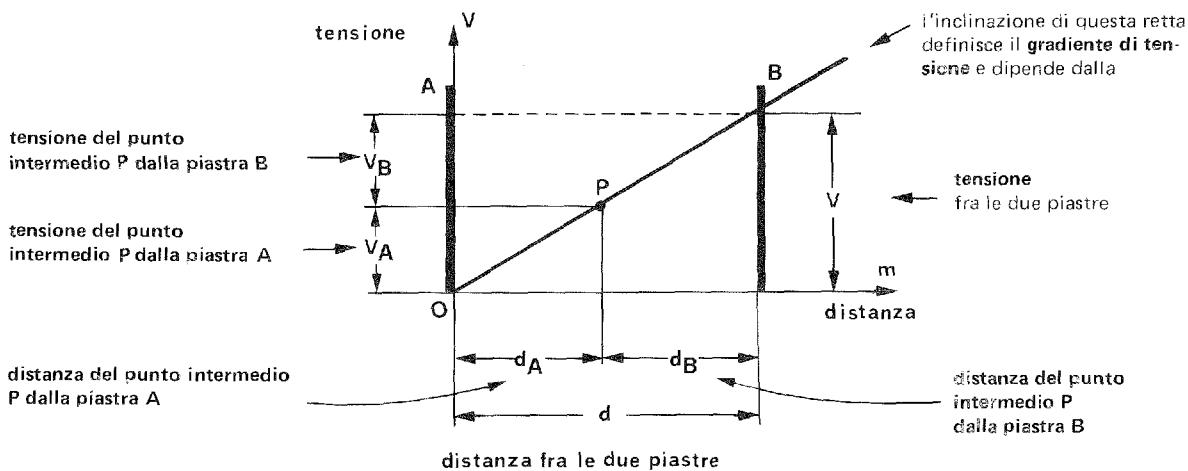
$$\frac{V}{d} = F$$



si chiama  
**gradiente di tensione**  
(o tensione specifica o forza elettrica)  
... e si misura in V/m (volt al metro)

## Caratteristica grafica

Il diagramma mostra l'andamento lineare della tensione fra le piastre per un dato valore di potenziale sulla piastra positiva rispetto alla negativa supposta a potenziale zero.



**Conclusioni.** Poiché è fissa la superficie delle piastre, la densità di carica aumenta con la tensione fra le piastre; e poiché è fissa anche la distanza fra le piastre, il gradiente di tensione aumenta con la tensione stessa fra le piastre.

Dunque, gradiente e densità stanno fra loro secondo un rapporto ben preciso che dipenderà unicamente dal mezzo interposto.



### COSTANTE DIELETTRICA ASSOLUTA

Il gradiente di tensione e la densità di carica, sono fra loro proporzionali e non dipendono né dalla distanza fra le piastre né dalla superficie delle piastre.

Essi dipendono unicamente da una particolare natura del mezzo isolante interposto fra le piastre.

#### Costante dielettrica assoluta

Il rapporto fra

si chiama

densità di carica

$$D = \frac{Q}{S} \text{ (C/m}^2\text{)}$$

$$\begin{array}{c} \rightarrow D \\ \longrightarrow = \epsilon \\ \rightarrow F \end{array}$$

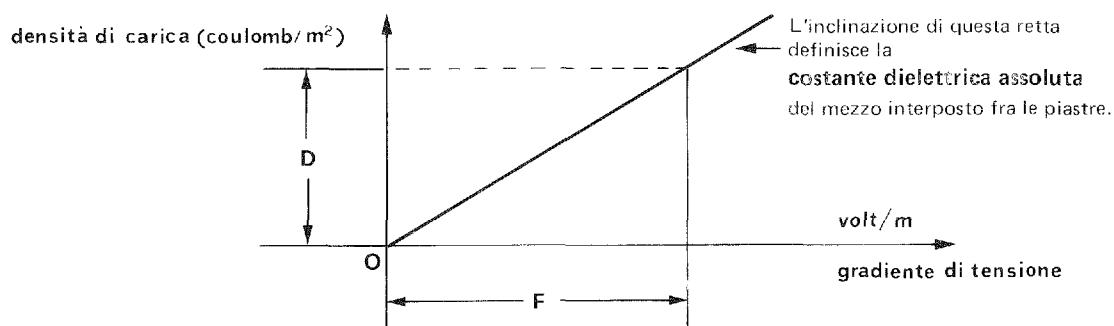
costante dielettrica assoluta

e si misura in  $\text{C/m}^2$  per ogni  $\text{V/m}$   
oppure in farad/m (12.75-1)

gradiente di tensione

$$F = \frac{V}{d} \text{ (V/m)}$$

Essa dipende dalle qualità dielettriche del materiale isolante interposto fra le piastre, secondo questo diagramma.



Il diagramma dice che, fissata la superficie e la distanza fra le piastre, se si fa aumentare il gradiente di tensione (aumentando la quantità di carica e quindi la tensione fra le piastre), aumenta nello stesso rapporto la densità di carica

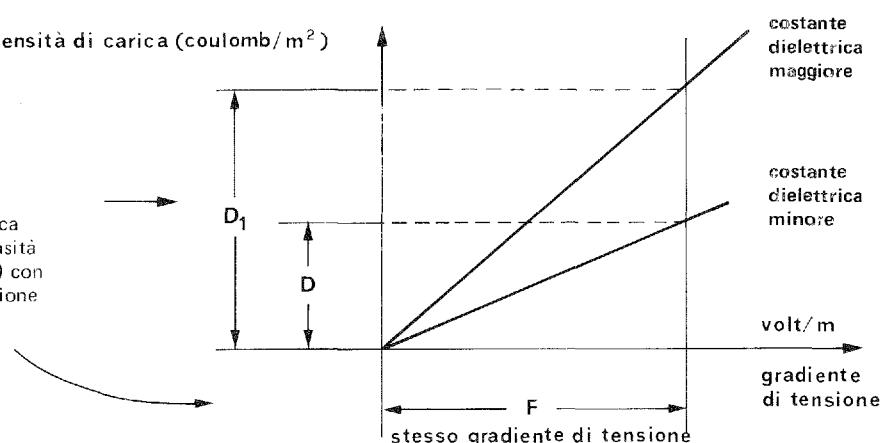
#### Costante dielettrica assoluta del vuoto

E' un dato sperimentale che vale

$$\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}/\text{m}^2}{\text{V}/\text{m}}$$

#### Considerazioni su costanti dielettriche diverse

Un materiale isolante di maggior costante dielettrica permette una maggior densità di carica (in  $\text{coulomb/m}^2$ ) con lo stesso gradiente di tensione (in  $\text{volt/m}$ )



Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.7	Elettrostatica
Argomento : 12.75	Condensatore e capacità

## STRUTTURA E PARAMETRI DEL CONDENSATORE

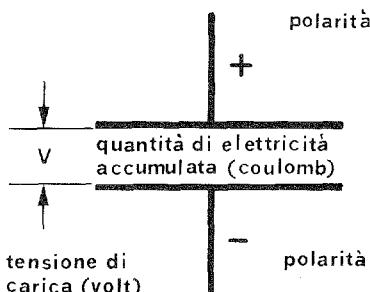
Si definisce un importante elemento del circuito: il condensatore; ed il relativo parametro: la capacità.

## Definizione mediante grandezze elettriche

Da quanto precede abbiamo visto che un apparecchio costituito da due piastre affacciate ed isolate elettricamente con un dielettrico

è capace di addensare cariche elettriche (in coulomb/m<sup>2</sup>) tanto maggiormente quanto più alto è il gradiente di tensione (volt/m) nel dielettrico.

Esso è stato perciò chiamato **condensatore**.



Fissate le sue dimensioni fisiche:

superficie delle piastre (armature)

→ in m<sup>2</sup>

distanza fra le stesse

→ in m

costante dielettrica del materiale

che le tiene isolate e distanziate

oppure

→ in F/m

oppure → in C/m<sup>2</sup>/V/m

la quantità di carica (coulomb) che possiamo "introdurvi" dipende unicamente dalla tensione che applichiamo alle armature, oppure inversamente, la quantità di carica in esso contenute, si manifesta con una tensione (volt) ai capi delle sue armature.

Il rapporto fra (vedi anche 13.10-2),

$$\frac{\text{quantità di carica introdotta (coulomb)}}{\text{tensione che si stabilisce (volt)}} = \frac{Q}{V} = C \quad \begin{array}{l} \text{si chiama} \\ \text{capacità} \\ \text{e si misura in farad (simbolo F)} \end{array}$$

Cioè unitariamente si ha la capacità di 1F (1 farad) quando un condensatore carico di 1C (1 coulomb) di elettricità, presenta la tensione di 1V (1 volt) ai suoi capi.

## Definizione mediante grandezze geometriche e specifiche

Essendo inoltre (12.74-2) la costante dielettrica

$$\epsilon = \frac{Q}{V} = \frac{D}{S} \quad \begin{array}{l} \text{densità} \\ D = \frac{Q}{S} \\ \text{gradiente} \\ F = \frac{V}{d} \end{array}$$

$$\text{si ha } \epsilon = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{d} \cdot \frac{d}{S} ; \quad \text{ma abbiamo appena dimostrato che } \frac{Q}{V} = C \quad \therefore \quad C = \frac{Q}{d} \cdot \frac{1}{S}$$

perciò

$$\epsilon = C = \frac{Q}{d} \cdot \frac{1}{S} \quad \begin{array}{l} \text{distanza fra armature (m)} \\ d \\ \text{superficie di un armatura (m}^2\text{)} \\ S \\ \text{capacità in farad (F)} \\ C \end{array}$$

$$\text{e le sue dimensioni sono } F \cdot \frac{m}{m^2} \text{ cioè } F/m$$

Dalla stessa espressione si può ricavare la

$$C = \frac{S}{d} \cdot \epsilon \quad \begin{array}{l} \text{superficie di un'armatura (m}^2\text{)} \\ S \\ \text{distanza fra le armature (m)} \\ d \\ \text{costante dielettrica del mezzo isolante (F/m)} \\ \epsilon \end{array}$$

La capacità del condensatore aumenta: se aumenta la superficie e se aumenta la costante dielettrica;  
diminuisce: se aumenta la distanza fra le piastre



### MODIFICA DELLA COSTANTE DIELETTRICA IN UN CONDENSATORE CARICO

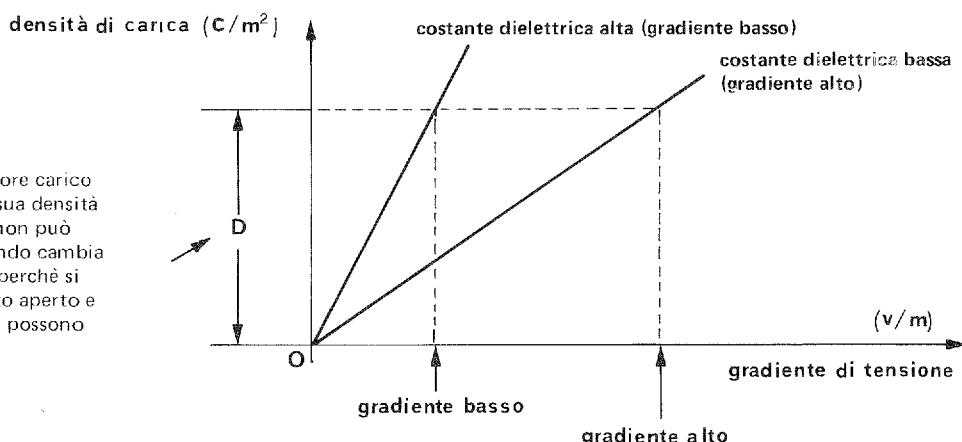
Cosa cambia in un condensatore carico ed a circuito aperto quando cambiamo il tipo di dielettrico? La tensione ai suoi capi.

#### Come si modifica il gradiente di tensione

Un condensatore carico ha già una sua densità di carica predeterminata dalla costante dielettrica, dalla tensione applicata e dalla superficie dell'armatura.

La modifica della costante dielettrica nel condensatore carico, porta alla modifica del gradiente di tensione (12.74-1) per le seguenti ragioni

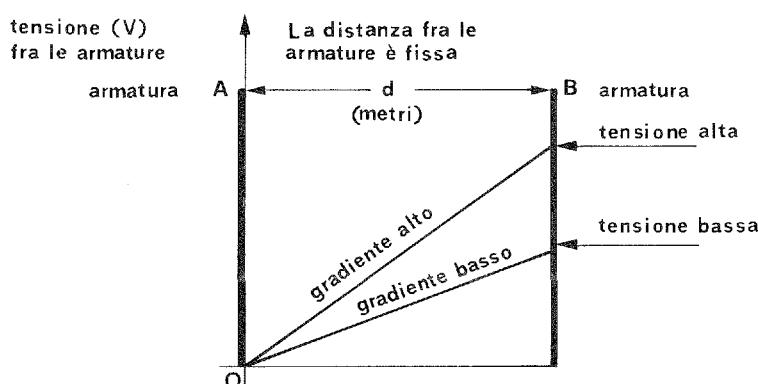
Un condensatore carico possiede una sua densità di carica che non può cambiare quando cambia il dielettrico, perché si trova a circuito aperto e le cariche non possono scappare.



#### Prima conclusione

L'aumento di costante dielettrica abbassa il gradiente di tensione e viceversa

#### Come si modifica in conseguenza la tensione



#### Conclusione finale

L'aumento di costante dielettrica abbassa la tensione ai capi del condensatore carico e viceversa.

Ciò è provato anche matematicamente (12.75-1)

Se  $C = \frac{Q}{V}$  sarà  $V = \frac{Q}{C}$

la tensione, essendo la capacità al denominatore, diminuisce se la capacità aumenta e viceversa.

la carica è fissa (condensatore carico)

la capacità  $C = \epsilon \frac{S}{d}$  aumenta con la costante dielettrica

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 12	Elettromagnetiche Magnetiche Elettrostatiche
Paragrafo : 12.7	Elettrostatica
Argomento : 12.75	Condensatore e capacità

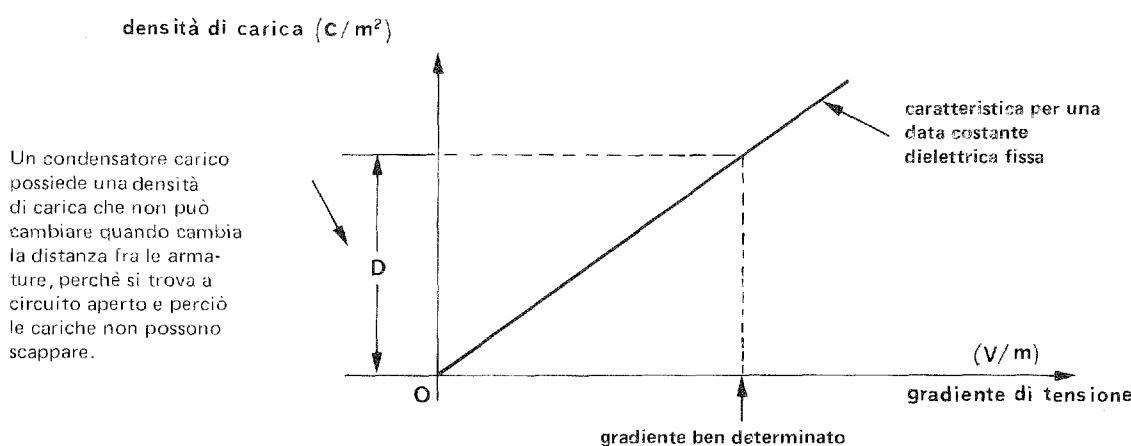
## MODIFICA DELLA DISTANZA FRA LE ARMATURE IN UN CONDENSATORE CARICO

Cosa cambia in un condensatore carico ed a circuito aperto quando cambiamo la distanza fra le armature? Ancora la tensione ai suoi capi.

## Il gradiente di tensione resta inalterato

Un condensatore carico ha già una sua densità di carica predeterminata dalla costante dielettrica, dalla tensione applicata e dalla superficie dell'armatura.

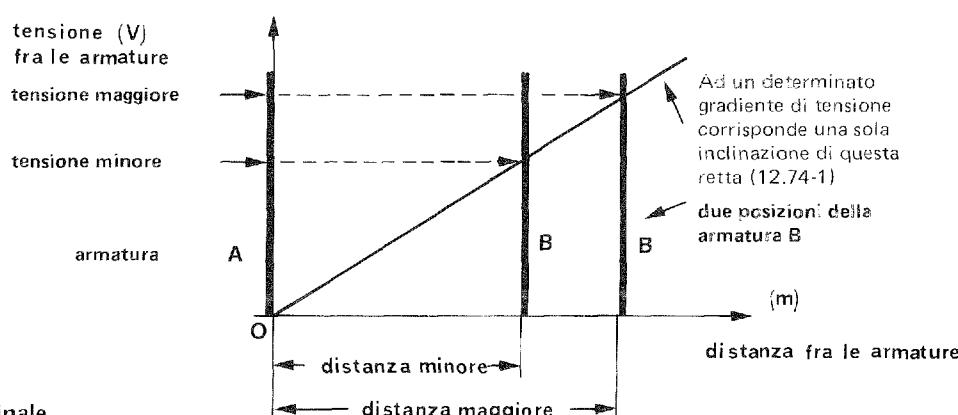
La modifica della distanza fra le armature, non modifica il gradiente di tensione perché esso (vedi 12.74-2) dipende unicamente dalla densità di carica e dalla costante dielettrica (v. figura seguente).



## Prima conclusione

Il gradiente di tensione non dipende dalla distanza fra le armature e perciò resta inalterato.

## Come si modifica in conseguenza la tensione



## Conclusione finale

L'aumento di distanza fra le armature innalza la tensione ai capi del condensatore carico e viceversa.

Sembra paradossale, ma ciò è provato anche matematicamente (12.75-1).

Se  $C = \frac{Q}{V}$  sarà  $V = \frac{Q}{C}$

essendo qui la capacità di denominatore, la tensione aumenta col diminuire della capacità

la carica è fissa (condensatore carico)

la capacità  $C = \epsilon \frac{S}{d}$  diminuisce

all'aumentare della distanza fra le armature, perché questa è al denominatore dell'espressione.



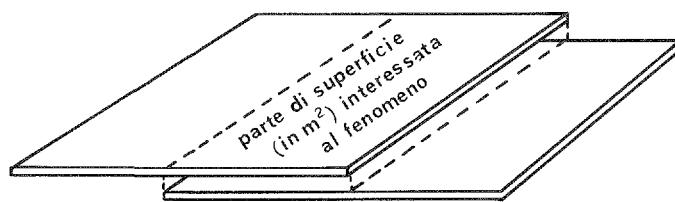
### MODIFICA DELLA SUPERFICIE DELLE ARMATURE IN UN CONDENSATORE CARICO

Cosa cambia in un condensatore carico ed a circuito aperto quando cambiamo la superficie delle armature? Sempre la tensione ai suoi capi.

#### Come si modifica il gradiente di tensione

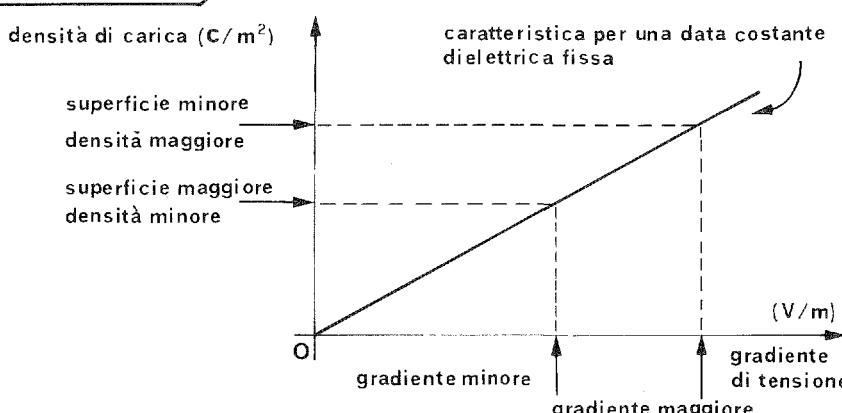
Un condensatore carico ha già una sua densità di carica predeterminata dalla costante dielettrica, dalla tensione applicata e dalla superficie dell'armatura.

La modifica della superficie delle armature modifica il gradiente di tensione, perché esso (12.74-2) dipende unicamente dalla densità di carica.



Variare la superficie delle armature significa far scorrere un'armatura parallelamente all'altra, in modo da modificare l'estensione delle superfici che si trovano affacciate.

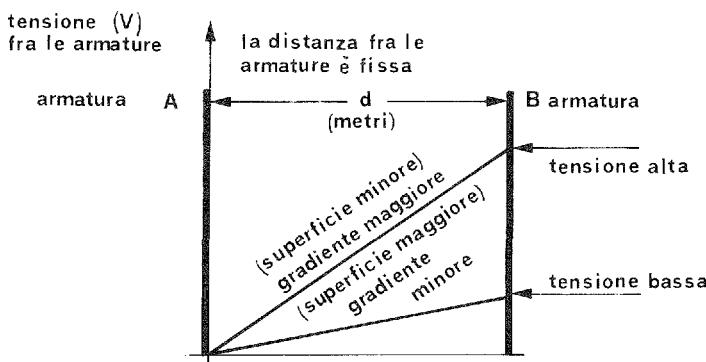
Le cariche presenti in un condensatore carico a circuito aperto, non possono scappare, quindi si addenseranno più o meno a seconda delle variazioni della superficie utile delle armature.



#### Prima conclusione

L'aumento di superficie utile fra le armature, diminuisce la densità di carica e fa diminuire il gradiente di tensione.

#### Come si modifica in conseguenza la tensione



#### Conclusione finale

L'aumento di superficie utile fra le armature, abbassa la tensione ai capi del condensatore carico.

Il fatto non sembra tanto paradossale se si pensa ad un serbatoio pieno.

Se gli si aumenta la capacità allargandolo, il livello del liquido contenuto diminuisce e viceversa.

Sembra paradossale, ma ciò è provato anche matematicamente (12.75-1)

Vedi le stesse espressioni della pagina precedente (12.76-1).

- L'aumento di superficie fa aumentare la capacità
- L'aumento di capacità fa diminuire la tensione



### COLLEGAMENTO IN SERIE DEI CONDENSATORI

Si esamina come si distribuiscono le cariche e le tensioni e si calcola il valore complessivo della capacità.

#### Il collegamento in serie

è quello qui illustrato: l'armatura positiva di uno, viene collegata con la negativa del successivo in modo da formare una catena con le due estremità libere.

#### A) La tensione risultante

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

è uguale alla somma delle tensioni dei singoli componenti.

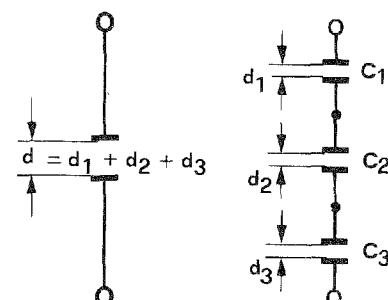
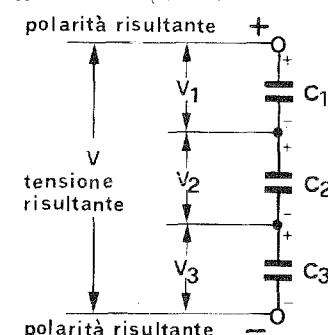
#### B) La capacità risultante

è quella che compete ad un unico condensatore avente la distanza equivalente fra le armature, uguale alla somma delle distanze equivalenti fra le armature dei singoli componenti.

Per distanza equivalente si intende quella che risulta immaginando i condensatori tutti uguali in dielettrico ed in superficie delle armature; cioè (12.75-1)

$$C_1 = \epsilon \frac{S}{d_1} \quad C_2 = \epsilon \frac{S}{d_2} \quad C_3 = \epsilon \frac{S}{d_3}$$

Partendo da questo concetto, cerchiamo di determinare la relazione che lega la capacità totale con le capacità dei componenti.



Da quanto precede, risulta (distanze singole e distanza totale)

$$d_1 = \epsilon \frac{S}{C_1} \quad d_2 = \epsilon \frac{S}{C_2} \quad d_3 = \epsilon \frac{S}{C_3} \quad d = d_1 + d_2 + d_3 = \epsilon S \cdot \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

La capacità totale,

$$\text{essendo } C = \epsilon \frac{S}{d} \quad \text{sarà} \quad C = \epsilon \frac{S}{\left( \epsilon S \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Concludendo:

la capacità risultante  
di più condensatori  
in serie è uguale...  $C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$  ... all'inverso della  
somma degli inversi  
delle singole capaci-  
tà componenti

#### C) La carica risultante

è uguale alla somma delle cariche componenti

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Questo è valido sempre

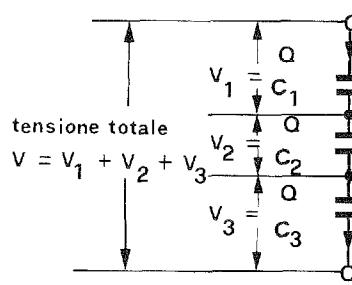
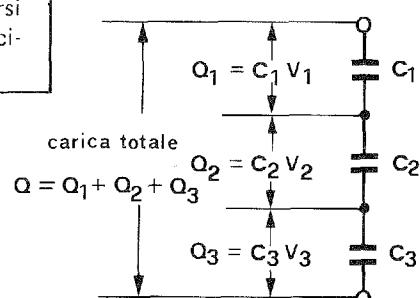
Per la **distribuzione delle tensioni**, bisogna distinguere due casi:

1) I condensatori erano già carichi prima di essere collegati in serie. In questo caso ciascuno mantiene la propria carica e tensione.

Solo durante l'eventuale scarica si arriva ad un livellamento delle tensioni come risulta nel caso seguente

2) I condensatori erano scarichi prima di essere collegati in serie. In questo caso la corrente di carica è uguale per tutti; perciò essi si caricano di quantità uguali indipendentemente dalla capacità.

La tensione che si stabilisce ai capi di ognuna, sarà di valore inverso alla propria capacità:



$$V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad V_2 = \frac{Q}{C_2} \quad V_3 = \frac{Q}{C_3}$$



### COLLEGAMENTO IN PARALLELO DEI CONDENSATORI

Si esamina come si distribuiscono le cariche e si calcola il valore complessivo della capacità.

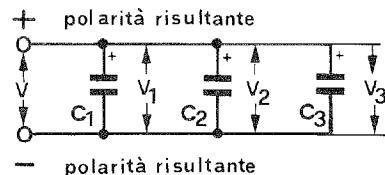
#### Il collegamento in parallelo

è quello qui illustrato: le armature positive vengono tutte collegate fra di loro e così le negative.

##### A) La tensione risultante

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

è uguale alla tensione di ciascuna delle componenti che devono essere uguali fra di loro per definizione di collegamento parallelo.



##### B) La capacità risultante

è quella che compete ad un unico condensatore con superficie equivalente delle armature uguale alla somma delle superfici equivalenti delle armature dei singoli componenti.

Per superficie equivalente si intende quella che risulta immaginando i condensatori tutti uguali nel dielettrico e in distanza fra le armature; cioè (12.75-1)

$$C_1 = \epsilon \frac{S_1}{d} \quad C_2 = \epsilon \frac{S_2}{d} \quad C_3 = \epsilon \frac{S_3}{d}$$

Partendo da questo concetto cerchiamo di determinare la relazione che lega la capacità totale con la capacità dei singoli componenti.

$$S_1 = \frac{C_1 d}{\epsilon} \quad S_2 = \frac{C_2 d}{\epsilon} \quad S_3 = \frac{C_3 d}{\epsilon} \quad S = S_1 + S_2 + S_3 = \frac{d}{\epsilon} (C_1 + C_2 + C_3)$$

La capacità totale,

$$\text{essendo } C = \epsilon \frac{S}{d} \quad \text{sarà } C = \frac{\frac{d}{\epsilon} (C_1 + C_2 + C_3)}{d} = C_1 + C_2 + C_3$$

Concludendo:

Da quanto precede risulta (superficie singole e superficie totale):

la capacità risultante di più condensatori in parallelo è uguale ...

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

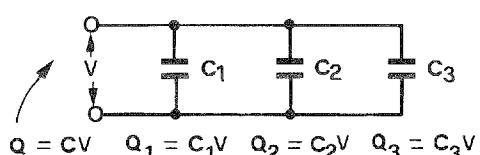
... alla somma delle singole capacità componenti

##### C) La carica risultante

è uguale alla somma delle singole cariche componenti

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Questo è valido sempre.



Per quanto concerne la **distribuzione delle cariche**, bisogna distinguere due casi:

- 1) I condensatori erano già carichi quando sono stati collegati in parallelo. In questo caso, le tensioni si livellano alla tensione comune nel senso che i condensatori che hanno le tensioni maggiori, caricano gli altri finché tutte le tensioni diventano uguali.
- 2) I condensatori sono scarichi quando vengono collegati in parallelo. In questo caso, siccome le tensioni sono uguali per tutti, ciascuno si carica di una quantità di elettricità proporzionale alla propria capacità

$$Q_1 = C_1 V \quad Q_2 = C_2 V \quad Q_3 = C_3 V$$

Sezione : 1 Grandezze Fondamentali  
Capitolo : 13 Parametri del circuito  
Paragrafo : 13.0 Indice del capitolo  
Argomento : 13.00 Indice dei paragrafi

Codice Pagina  
13.00 1

## PARAMETRI DEL CIRCUITO

### Indice dei paragrafi e degli argomenti

- par. 13.0 — Indice del capitolo
  - arg. 13.01 — Indice analitico
  - arg. 13.02 — Bibliografia
  - arg. 13.03 — Informazioni generali
- par. 13.1 — Resistenza e Conduttanza
  - arg. 13.10 — Indice delle pagine
- par. 13.2 — Capacità
  - arg. 13.20 — Indice delle pagine
  - arg. 13.21 — Concetti generali
  - arg. 13.22 — Fenomeno della carica
  - arg. 13.23 — Informazioni complementari
  - arg. 13.24 — Comportamento a regime variabile di tensione
- par. 13.3 — Induttanza
  - arg. 13.30 — Indice delle pagine
  - arg. 13.31 — Concetti generali
  - arg. 13.32 — Fenomeno della carica
  - arg. 13.33 — Informazioni complementari
  - arg. 13.34 — Comportamento a regime variabile di corrente
- par. 13.4 — Caratteristiche a regime alternato in generale
  - arg. 13.40 — Indice delle pagine
  - arg. 13.41 — Resistenza e Conduttanza
  - arg. 13.42 — Capacità
  - arg. 13.43 — Induttanza

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
13.00	2	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.0	Indice del capitolo
		Argomento : 13.00	Indice dei paragrafi

- par. 13.5 — **Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie**
- arg. 13.50 — Indice delle pagine
  - arg. 13.51 — Resistenza
  - arg. 13.52 — Reattanza capacitiva
  - arg. 13.53 — Reattanza induttiva
  - arg. 13.54 — Composizione di reattanze
  - arg. 13.55 — Impedenza
- par. 13.6 — **Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in parallelo**
- arg. 13.60 — Indice delle pagine
  - arg. 13.61 — Conduttanza
  - arg. 13.62 — Suscettanza capacitiva
  - arg. 13.63 — Suscettanza induttiva
  - arg. 13.64 — Composizione disuscettanza
  - arg. 13.65 — Ammettenza.
- par. 13.7 — **Caratteristiche a regime alternato. Equivalenze serie e parallelo**
- arg. 13.70 — Indice delle pagine
  - arg. 13.71 — Confronti fra i valori in serie e in parallelo
  - arg. 13.72 — Valori equivalenti a frequenza costante
  - arg. 13.73 — Valori equivalenti a frequenza variabile
- par. 13.8 — **Caratteristiche a regime alternato. Grandezze e Disposizioni miste**
- arg. 13.80 — Indice delle pagine
  - arg. 13.81 — Studio completo della disposizione C (R + L)
  - arg. 13.82 — Studio completo della disposizione L (R + C)
  - arg. 13.83 — Studio completo della disposizione C + RL
  - arg. 13.84 — Studio completo della disposizione L + RC
- par. 13.9 — **Ricapitolazione**
- arg. 13.90 — Indice delle pagine
  - arg. 13.91 — Informazioni generali

Sezione : 1 Grandezze Fondamentali  
Capitolo : 13 Parametri del circuito  
Paragrafo : 13.0 Indice del capitolo  
Argomento : 13.00 Indice dei paragrafi

Codice Pagina  
13.00 3

## **Paragrafo 13.0**

### **INDICE**

#### **Indice degli argomenti e delle pagine**

arg. 13.01 — Indice analitico

arg. 13.02 — Bibliografia

arg. 13.03 — Informazioni generali

pag. 1 — Panoramica del capitolo  
— Definizione assoluta  
— Evitiamo le confusioni

pag. 2 — Reciprocità dei fenomeni di carica e scarica energetica per gli elementi che presentano capacità e induttanza.

pag. 3 — Resistenza e Conduttanza — Induttanza e Capacità

pag. 4 — Riassunto delle caratteristiche dei parametri fondamentali.

**Sezione** : 1      Grandezze Fondamentali  
**Capitolo** : 13      Parametri del circuito  
**Paragrafo** : 13.0      Esposizione generale  
**Argomento** : 13.01      Indice analitico

## INDICE ANALITICO

**Avvertenza:** ricordando il criterio di codificazione espresso in 00.01-2

se l'indicazione è rappresentata con:

una sola cifra	(es.: 1)
due cifre	(es.: 12)
tre cifre	(es.: 13.7)
quattro cifre	(es.: 12.42)
cinque cifre	(es.: 13.24-1)

significa che la voce cercata è trattata:

nell'intera **sezione** relativa alla cifra indicata  
 nell'intero **capitolo** relativo alle cifre indicate  
 nell'intero **paragrafo** relativo alle cifre indicate  
 nell'intero **argomento** relativo alle cifre indicate  
 nella **pagina** relativa alle cifre indicate

3.65	ammettenza	13.83	disposizione circuitale C + RL
13.2	capacità	13.82	disposizione circuitale L (R + C)
13.42	— in alternata	13.84	disposizione circuitale L + RC
13.03-2	— (carica e scarica della)	13.73-1	disposizioni circuituali (simbologia)
13.21-1	— confronti idraulici	13.01	energia assorbita dagli elementi del
13.21-2	— confronti idraulici	circuito	
13.22-1	— confronti idraulici	13.7	equiv. serie-parallelo in altern.
13.21-1	— definizione	13.74	— confronti
13.21-2	— unità di misura	13.72	— a frequenza costante
13.71-4	— e induttanza (equivalenze in alternata)	13.73	— — — variabile
13.71-2	— e resistenza (equivalenze in alternata)	13.21-2	farad
13.11-2	caratteristiche del conduttore perfetto.	13.5	grandezze in serie in alternata
13.11-1	— del resistore perfetto	13.6	— in parallelo in alternata
13.11-4	caratteristiche dei parametri fondamen-	13.34-2	Henry
	tabella riassuntiva)	13.55	Impedenza
13.22	caratteristiche del condensatore	13.3	Induttanza
13.24	— del condensatore	13.43	— in alternata
13.32	— dell'induttore	13.71-4	— e capacità (equiv. in alternata)
13.34	— dell'induttore	13.71-3	— e resistenza (equiv. in alternata)
13.1	conduttanza	13.03-2	— carica e scarica
13.61	conduttanza	13.31-1	— confronti ferroviari
13.03-3	conduttanza	13.31-2	— confronti ferroviari
13.41	— in alternata	13.32-1	— confronti ferroviari
13.61	— in alternata	13.31-1	— definizione
13.22-4	costante di tempo RC	13.34-2	— unità di misura
13.01-1	costanti del circuito	13.01-1	parametri del circuito
13.73-2	disposizione circuitale R + L + C	13.52	reattanza capacitiva
13.73-3	disposizione circuitale RLC	13.53	— induttiva
13.73-4	disposizione circuitale R (R + L + C)		
3.81	disposizione circuitale C (R + L)		

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

<b>Codice</b>	<b>Pagina</b>	<b>Sezione</b> : 1      Grandezze Fondamentali
13.01	2	<b>Capitolo</b> : 13      Parametri del circuito
		<b>Paragrafo</b> : 13.0      Esposizione generale
		<b>Argomento</b> : 13.01      Indice analitico

13.54	reattanze (composizione)	13.71-1	— e resistenza (equivalenze)
13.01-2	reciprocità fenomeni carica e scarica	13.23-1	scarica del condensatore
13.1	resistenza	13.33-1	— dell'induttore
13.51	resistenza	13.62	suscettanza capacitiva
13.03-3	resistenza	13.63	— induttiva
13.41	— in alternata	13.64	suscettanze (composizione)
13.51	— in alternata	13.22-5	tempo di carica
13.71-2	— e capacità (equiv. in alternata)	13.21-2	unità di misura della capacità
13.71-3	— e induttanza (equiv. in alternata)	13.34-2	— — — dell'induttanza

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 13 Parametri del circuito  
 Paragrafo : 13.0 Esposizione Generale  
 Argomento : 13.02 Bibliografia

Codice **13.02** Pagina **1**

**LIBRI**

ABBREVIAZIONE	AUTORI E TITOLO	EDITORE
BOTTANI	E. Bottani e R. Sartori Lezioni sui fondamenti dell'Elettronica	Libreria Editrice Politecnica 1944
COLOMBO	A. Colombo Manuale dell'ingegnere	Hoepli 1947
MONDANI	F. Mondani Elementi di elettronica e di elettrotecnica 2 voll'	Trevisini 1966
GIOMETTI	R. Giometti e F. Frascari Elettrotecnica Elettronica Radiotecnica	Calderini 1° vol. 1973 2° vol. 1974
E.S.T.	Enciclopedia della Scienza e della Tecnica	Mondadori 1965

**RIVISTE**

SIGLA	TITOLO	EDITORE
TA	Tecniche dell'Automazione	ETAS KOMPASS
Sp	Sperimentare	J.C.E.
S.R.	Selezione Radio TV	J.C.E.
E.O.	Elettronica Oggi	J.C.E.

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 13 Parametri del circuito  
 Paragrafo : 13.0 Indice del capitolo  
 Argomento : 13.03 Informazioni generali

Codice Pagina  
**13.03** 1

## PANORAMICA DEL CAPITOLO

### INTRODUZIONE

E' bene fin d'ora tentare di mettere in chiaro alcuni concetti fondamentali che i principianti spesso confondono.

In questo capitolo spiegheremo prima il comportamento elettrico dei tre elementi fondamentali del circuito:

- il condensatore
- l'induttore
- il resistore

al fine di chiarire poi l'influenza che hanno in ogni elemento del circuito le tre grandezze fondamentali che li caratterizzano:

- la capacità
- l'induttanza
- la resistenza

### DEFINIZIONE ASSOLUTA

Queste grandezze fondamentali si chiamavano un tempo "costanti" del circuito in quanto il loro valore si immaginava immutabile sotto qualsiasi sollecitazione elettrica.

Oggi si preferisce chiamarle "parametri del circuito" in quanto il loro valore interviene come operatore sotto determinate condizioni elettriche.

### GRANDEZZE TIPICHE DEL REGIME ALTERNATO SINOIDALE

Ci sono altre grandezze derivate da queste che sono caratteristiche uniche dell'elettricità a regime alternato sinoidale.

Esse sono      — la reattanza (induttiva e capacitiva)  
 e ancora      — la resistenza

Dalla combinazione in serie di queste due ultime nasce una grandezza fondamentale molto importante:  
 — l'impedenza

Per facilitare i concetti caratteristici di altre combinazioni, non si può fare a meno di considerare le grandezze reciproche che sono:

- la suscettanza (induttiva e capacitiva)
- la conduttanza

mentre dalle loro combinazioni in parallelo nasce:  
 — l'ammettenza

### EVITIAMO LE CONFUSIONI!

Spesso il principiante fa una confusione paurosa e poichè essa è estremamente dannosa alla chiarezza dell'apprendimento dei fenomeni elettrici in generale, raccomandiamo al lettore di porre la massima attenzione sui concetti che verranno espressi in questo capitolo.

Forse tutta questa confusione nasce dal fatto che la resistenza la troviamo inalterata sia come parametro assoluto del circuito sia come grandezza caratteristica del circuito a regime alternato sinoidale ed inoltre l'assonanza di certi termini come induttanza e impedenza aumenta il caos mentale.

Si eserciti bene il lettore a ben discriminare i significati per evitare che nel suo caos mentale ci si trovi poi tutta l'elettronica.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 13.03

Pagina 2

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.0	Indice del capitolo
Argomento : 13.03	Informazioni Generali

### RECIPROCITA' DEI FENOMENI DI CARICA E SCARICA ENERGETICA PER GLI ELEMENTI CHE PRESENTANO CAPACITA' E INDUTTANZA

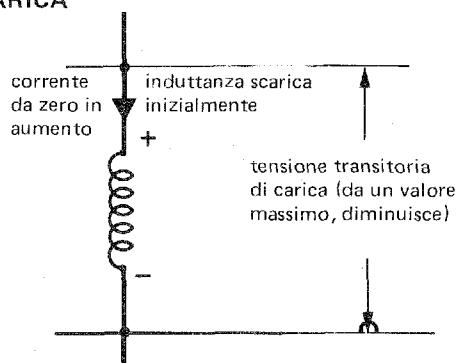
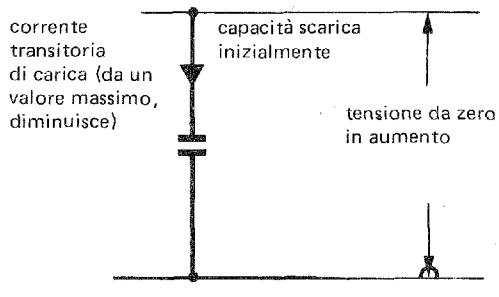
E' interessante constatare il ruolo reciproco che giocano queste due grandezze.  
C'è una sorprendente analogia di fenomeni dove tensione e corrente scambiano il ruolo.

Panorama delle situazioni che vengono trattate in dettaglio nei fogli successivi.

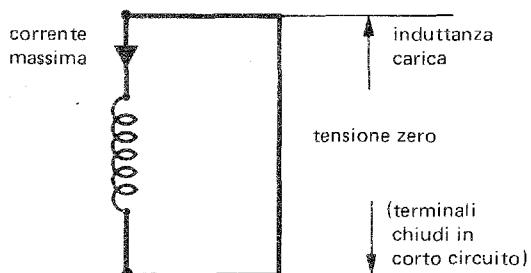
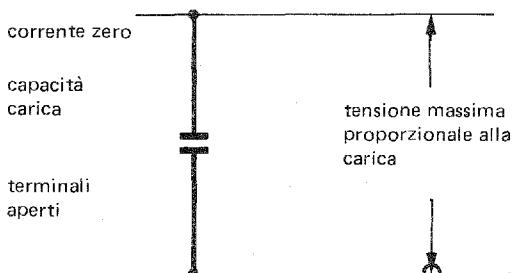
La **CAPACITA'** si carica di energia potenziale  
che si esprime in tensione (volt)

**L'INDUTTANZA** si carica di energia cinetica  
che si esprime in corrente (Ampere)

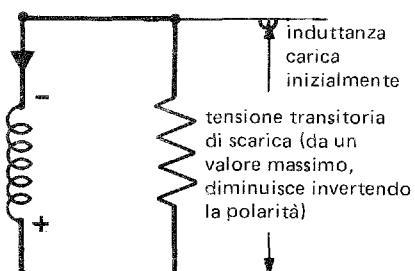
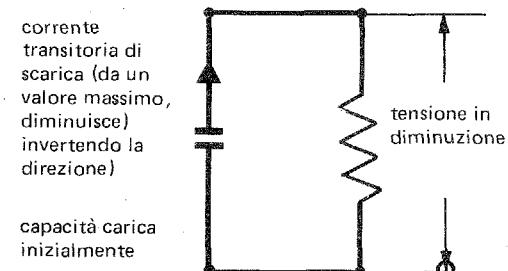
#### INIZIO DELLA CARICA



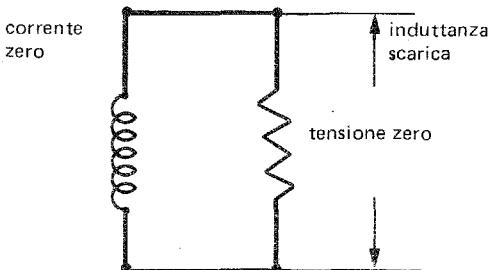
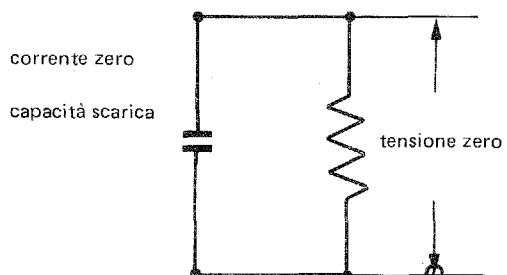
#### FINE DELLA CARICA



#### INIZIO DELLA SCARICA



#### FINE DELLA SCARICA



### RESISTENZA E CONDUTTANZA, INDUTTANZA E CAPACITÀ'

N.B. In questo foglio, come sempre, il concetto di resistenza, anche se espresso da solo, non preclude quello di conduttanza che è il suo reciproco.

#### Comportamento in generale

Il comportamento della resistenza nei circuiti, oltre a quello di (10.2 e 11.72)

- lasciar passare una corrente, se si applica una tensione ai suoi capi, oppure
  - presentare una tensione ai suoi capi, se la si fa attraversare da corrente,
- dal punto di vista energetico, non accumula (come capacità e induttanza), ma
- dissipia energia sottoforma di calore.

**Induttanza, Capacità e Resistenza** sono grandezze che si presentano sempre, desiderate o indesiderate, in qualsiasi circuito o negli elementi che lo compongono.

Constatì il lettore nella sezione "Elementi del circuito" come:

- Un resistore è tale in quanto la grandezza resistenza è dominante.  
In esso però, capacità e induttanza, per quanto ridotte perché indesiderabili, sono inevitabili.
- Un condensatore è tale in quanto la grandezza capacità è dominante.  
In esso però, resistenza e induttanza, per quanto ridotte perché indesiderabili, sono inevitabili.
- Un induttore è tale in quanto la grandezza induttanza è dominante.  
In esso però, resistenza e capacità, per quanto ridotte perché indesiderabili, sono inevitabili.
- qualsiasi altro elemento che eserciti una determinata funzione avrà presenti, in modo più o meno dominante oppure indesiderato, tutte e tre le grandezze: Resistenza, Capacità e Induttanza

#### Resistenza e Conduttanza - Comodità di rappresentazione

Nei circuiti equivalenti, generalmente troveremo che:

- La resistenza è presente come tale, quando è rappresentata in serie ad altre grandezze.
- La conduttanza è presente come tale, quando è rappresentata in parallelo ad altre grandezze.

#### Comportamento a regime variabile

Tensione e correnti, in ottemperanza alla legge di Ohm, si mantengono rigidamente proporzionali fra loro, secondo quei coefficienti reciproci che si chiamano resistenza **R** o conduttanza **G** secondo le ben note relazioni:

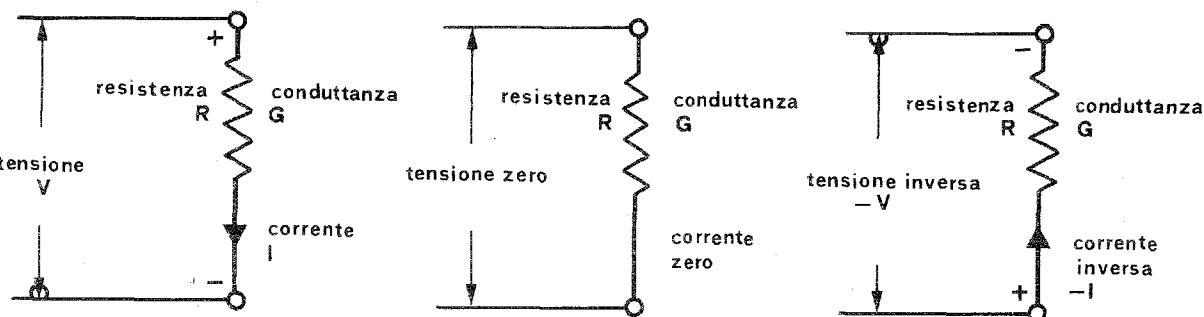
$$I = GV \quad G = \frac{1}{R}$$

$$V = RI \quad R = \frac{1}{G}$$

Vedremo inoltre come, a differenza del comportamento di induttanza e capacità:

- qualsiasi forma d'onda sottoforma di tensione applicata ad una conduttanza, genera una corrente che ha le stesse forme d'onda, frequenza e fase della tensione.
- qualsiasi forma d'onda sottoforma di corrente che attraversa una resistenza, genera una tensione che ha le stesse forme d'onda, frequenza e fase della corrente.
- la resistenza o la conduttanza servono da elementi "rallentatori" nei fenomeni transitori.

#### Rappresentazione grafica di tre condizioni



**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice **13.03**

Pagina **4**

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.0	Ricapitolazione
Argomento : 13.03	Informazioni Generali

**RIASSUNTO DELLE CARATTERISTICHE DEI PARAMETRI FONDAMENTALI**

PARAMETRI	RESISTENZA	CONDUTTANZA	CAPACITA'	INDUTTANZA
Simbolo	R	$G = \frac{1}{R}$	C	L
Unità di misura	ohm ( $\Omega$ )	siemens (S)	farad (F)	henry (H)
Equazione statica	$v = Ri$	$I = Gv$	$q = Cv$	$u = Li$
Energia assorbita	$vi \Delta t$	$vi \Delta t$	$v \Delta q$	$i \Delta u$
Potenza dissipata	$Ri^2$	$Gv^2$	—	—
Energia accumulata	—	—	$\frac{1}{2} Cv^2$	$\frac{1}{2} Li^2$
Equazione dinamica di funzionamento	$v = Ri$	$i = Gv$	$i = C \frac{\Delta v}{\Delta t}$	$v = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$
Elemento caratteristico	Resistore	Conduttore	Condensatore	Induttore
Simbolo grafico				
Grandezza sensibile a:	corrente	tensione	rapidità di variazione di tensione	rapidità di variazione di corrente
che produce proporzionalmente al suo valore:	tensione	corrente	corrente (di carica)	tensione (di reazione)

Altri simboli che ricorrono nella tabella

$q$  = carica elettrica in coulomb (cioè ampersecondi)

$u$  = impulso di tensione in voltsecondi

$\frac{\Delta v}{\Delta t}$  = rapidità di variazione della tensione in volt/secondo

$\Delta t$

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$  = rapidità di variazione della corrente in amper/secondo

$\Delta t$

Con le lettere minuscole sono indicate quelle grandezze che possono variare durante l'esperimento.

Con le lettere maiuscole sono indicate quelle grandezze, i parametri per l'appunto, che sono destinate a rimanere costanti.

**NOTA:** Resistenza e Conduttanza sono due modi diversi e reciproci di vedere la proporzionalità fra tensione e corrente e possono essere indifferentemente applicate al medesimo elemento del circuito.

Capacità e Induttanza, ripetiamo, si riferiscono invece a due diversi elementi del circuito: il condensatore e l'induttore, rispettivamente.

Anche queste due grandezze posseggono il parametro reciproco.

Entrambi però sono stati volutamente ignorati per non complicare lo studio

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 13	Parametri del circuito
<b>Paragrafo</b>	: 13.1	Resistenza e conduttanza
<b>Argomento</b>	: 13.10	Indice degli argomenti e delle pagine

## **Paragrafo 13.1**

# **RESISTENZA E CONDUTTANZA**

### **Indice degli argomenti e delle pagine**

**arg. 13.11 — Concetti generali**

**pag. 1 — Resistenza**  
La resistenza nel contesto delle grandezze elettriche

**pag. 2 — Conduttanza**

## R E S I S T E N Z A

### LA RESISTENZA NEL CONTESTO DELLE GRANDEZZE ELETTRICHE

E' indispensabile introdurre questo paragrafo anche nella panoramica che riguarda fondamentalmente i fenomeni elettrici tipici delle grandezze: Capacità (13.2) e Induttanza (13.3), perché sia ben chiaro il ruolo che questa grandezza svolge nei compiti delle altre due.

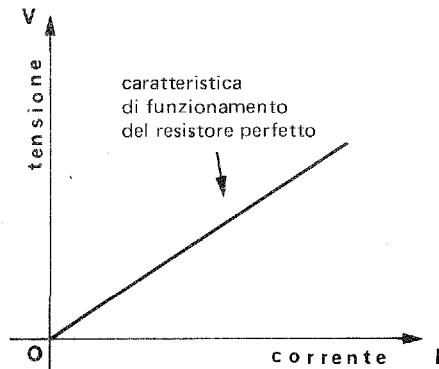
Dal punto di vista energetico la resistenza è dissipatrice di energia mentre capacità e induttanza l'accumulano e la rendono al generatore se la sua tensione non si mantiene costante.

Abbiamo già visto in 10.2 e 11.72 come la resistenza elettrica sia intesa come un parametro che stabilisce il concetto di proporzionalità fra tensione e corrente, che interagiscono, in un resistore e in un conduttore.

Per ogni valore di corrente esiste un solo valore di tensione che la provoca: la relazione fra queste due grandezze per un dato elemento in esame si presenta graficamente come in figura.

Essa è lineare secondo il parametro  $R$  (resistenza in ohm), che determina l'inclinazione della retta caratteristica conformemente alle scale che si sono scelte per le coordinate.

L'espressione dei valori in termini di resistenza è generalmente molto più comune che l'esposizione reciproca (conduttanza) descritta alla pagina seguente.



Nei calcoli generalmente si tiene conto dei valori espressi come resistenza quando si hanno *elementi in serie* la cui resistenza totale è uguale alla somma delle resistenze parziali

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
13.11	2	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.0	Resistenza e conduttanza
		Argomento : 13.11	Concetti generali

## CONDUTTANZA

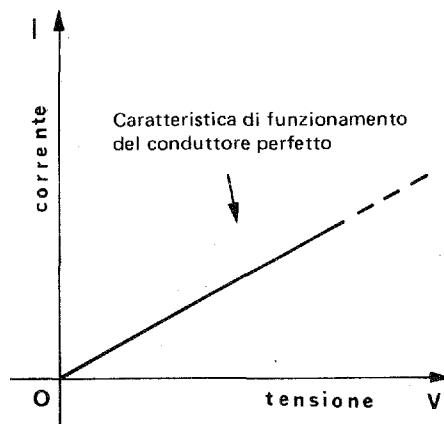
Questa grandezza non è che il reciproco della resistenza.

Essendo il suo simbolo G essa è definita come  $G = \frac{1}{R}$  e quindi ovviamente è anche  $R = \frac{1}{G}$

Si può parlare indifferentemente di un resistore che abbia una determinata conduttanza espressa come il reciproco della sua resistenza e di un conduttore che abbia una determinata resistenza espressa come il reciproco della sua conduttanza.

La caratteristica del medesimo resistore perfetto di cui la pagina precedente può essere presentato sotto forma di conduttanza come illustrato in figura.

Essa è lineare secondo il parametro G (conduttanza in Siemens) che determina l'inclinazione della retta caratteristica conformemente alle scale che si sono scelte per le coordinate.



Va notato che questo tipo di scelta di coordinate per rappresentare il funzionamento resistivo di un elemento del circuito è molto più usato del precedente, mentre l'espressione dei valori in termini di conduttanza è molto meno comune dell'espressione reciproca (resistenza) descritta alla pagina precedente.

Nei calcoli invece si preferisce tener conto dei valori espressi come conduttanza quando si hanno *elementi in parallelo* la cui conduttanza totale è uguale alla somma delle conduttanze parziali

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

## Paragrafo 13.2

# CAPACITA'

### Indice degli argomenti e delle pagine

#### arg. 13.21 — Concetti generali

- pag. 1 — Definizione di capacità
  - Confronti
- pag. 2 — Unità di misura della capacità: farad
  - Confronti

#### arg. 13.22 — Fenomenologia della carica

- pag. 1 — Carica a corrente costante del condensatore
- pag. 2 — Studio della carica a corrente costante del condensatore
- pag. 3 — Similitudini nel fenomeno della carica di un condensatore
- pag. 4 — Studio del fenomeno della carica di un condensatore
- pag. 5 — Tempo di carica e costante di tempo per un circuito RC
- pag. 6 — Andamento della corrente di carica di un condensatore

#### arg. 13.23 — Informazioni complementari

- pag. 1 — Fenomeno della scarica di un condensatore
- pag. 2 — Carica del condensatore con resistore in parallelo

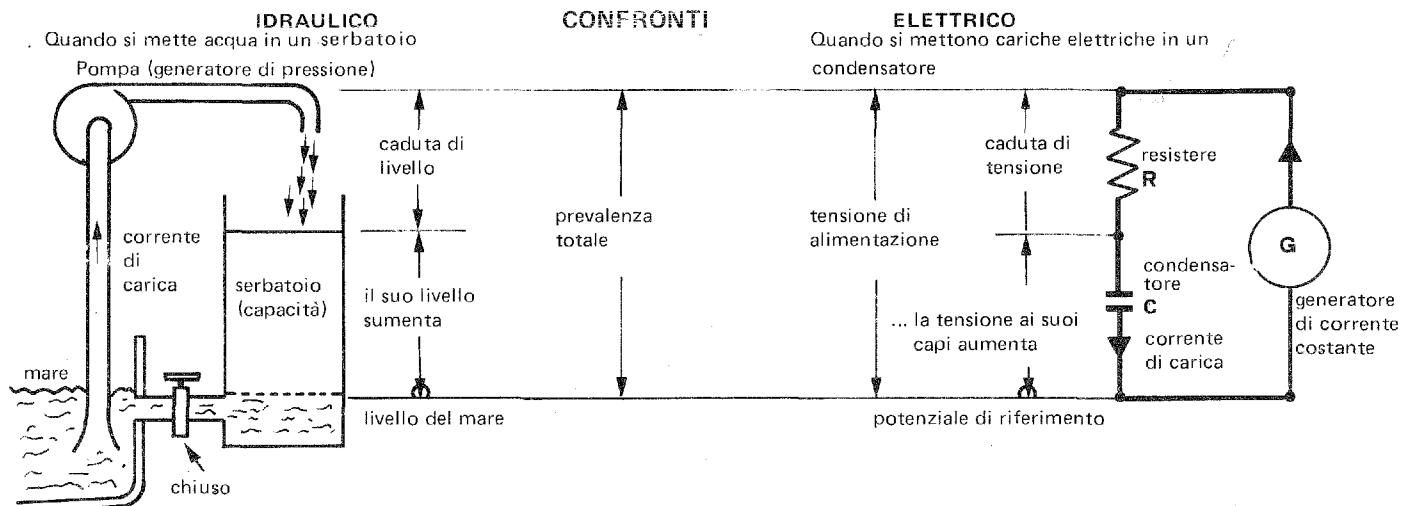
#### arg. 13.24 — Comportamento a regime variabile di tensione

- pag. 1 — Carica del condensatore con tensione variabile
- pag. 2 — L'unità di misura sotto l'aspetto dinamico
- pag. 3 — Esempio di condensatore sottoposto a variazioni lineari di tensione
- pag. 4 — Esempio di condensatore sottoposto a variazioni qualsiasi di tensione

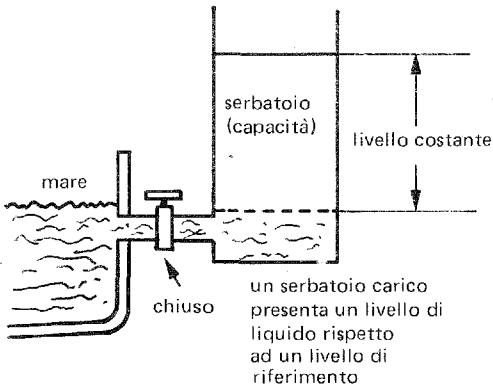
## DEFINIZIONE DI CAPACITÀ'

Capacità elettrica è quella proprietà che hanno tutti i corpi, ed in particolare i condensatori (v. sez. 2) di immagazzinare quantità di elettricità sottoforma statica.

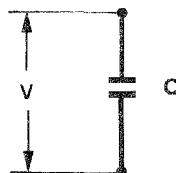
Il livello dell'energia accumulata si presenta ai capi delle capacità sottoforma di tensione.



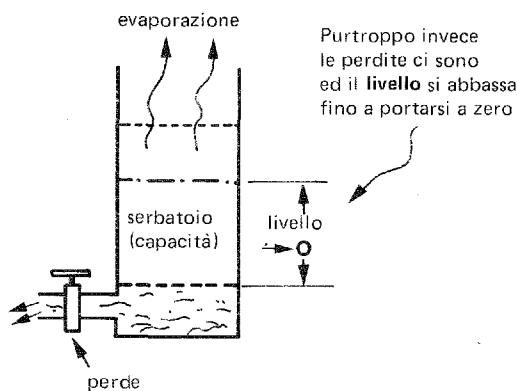
Se non ci fossero perdite il livello potrebbe essere mantenuto indefinitivamente anche quando la pompa è allontanata.



Se non ci fossero perdite, la tensione ai capi potrebbe mantenersi indefinitivamente, anche quando il condensatore è staccato dal circuito ed è mantenuta aperta.

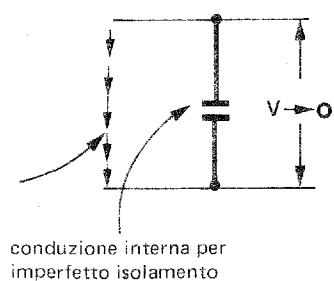


un condensatore carico presenta una tensione fra i suoi terminali (un terminale presenta un potenziale rispetto all'altro)



Purtroppo invece le perdite ci sono e la tensione si abbassa fino a portarsi a zero

conduzione esterna attraverso umidità atmosferica

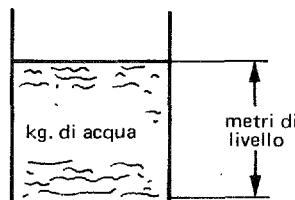


**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**Codice  
**13.21**Pagina  
**2**

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.2	Capacità
Argomento : 13.21	Concetti generali

**UNITA' DI MISURA DELLA CAPACITA': FARAD****CONFRONTI****IDRAULICO**

La capacità di un serbatoio si può definire in **chilogrammi di acqua** che bisogna metterci per far alzare di **un metro** il livello



il rapporto

$$\frac{\text{chilogrammi di acqua}}{\text{diviso} \quad \text{metri di livello}}$$

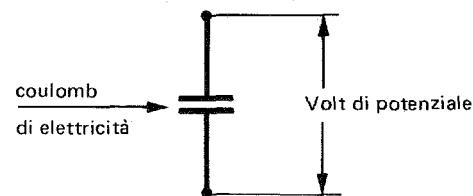
definisce la capacità del serbatoio e scriveremo concisamente:

$$C = \frac{Q}{h}$$

capacità del serbatoio      Q      quantità di liquido in kg.  
    h      livello in metri

L'unità di misura di questa capacità non ha un nome particolare: si dirà che un serbatoio ha una capacità di tot. kg al metro di livello.

La capacità di un circuito o di un dispositivo si può definire in **coulomb di elettricità** che bisogna metterci per far alzare di **un volt** la tensione ai suoi capi.



il rapporto

$$\frac{\text{coulomb di elettricità}}{\text{diviso} \quad \text{volt di tensione}}$$

definisce la capacità del dispositivo e scriveremo concisamente:

$$C = \frac{Q}{V}$$

capacità del dispositivo      Q      quantità di elettricità in coulomb  
    V      livello del potenziale in volt

L'unità di misura di questa capacità si chiama **FARAD** (simbolo F).

Si dirà che un dispositivo ha la capacità di tot farad quando gli si devono introdurre tot coulomb per far alzare di un volt il potenziale ai suoi capi.

In particolare si ha che

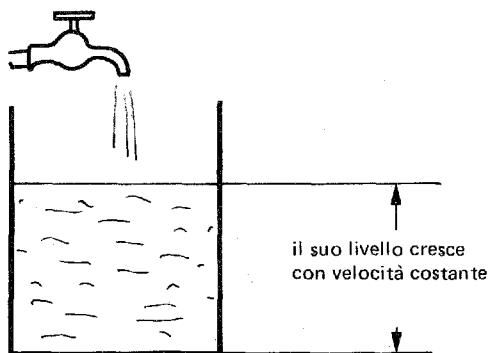
$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$$

### CARICA A CORRENTE COSTANTE DEL CONDENSATORE

Per esaminare il fenomeno nella sua completezza, è meglio cominciare a considerare questo caso particolare, facendo i soliti confronti con l'idraulica.

#### FENOMENO IDRAULICO

Se un rubinetto eroga costantemente la medesima quantità di acqua dentro ad un serbatoio perfettamente cilindrico (v. 13.21-1)



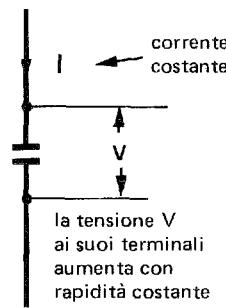
La velocità di salita del livello dipende dall'erogazione del rubinetto e dalla capacità del serbatoio

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{I}{C}$$

erogazione di acqua in kg/sec  
 Velocità di salita del livello in m/sec  
 Capacità del serbatoio in kg di acqua m di livello  
 La capacità si trova al denominatore, perciò più essa è grande, minore è la velocità di salita del livello

#### FENOMENO ELETTRICO

Se un condensatore viene caricato a corrente costante



la tensione V ai suoi terminali aumenta con rapidità costante

La rapidità di variazione della tensione dipende dal valore della corrente e dalla capacità del condensatore

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{I}{C}$$

Velocità di salita della tensione in volt/sec  
 corrente in ampere  
 Capacità del condensatore in volt coulomb  
 Questa grandezza si chiama FARAD (v. 13.21-1)

#### Conclusione

Se la corrente ... aumenta, la tensione ... aumenta più rapidamente  
 Se la corrente ... diminuisce, la tensione ... aumenta meno rapidamente  
 Se la corrente ... si annulla, la tensione ... si arresta all'ultimo valore  
 Se la corrente ... si inverte, la tensione ... diminuisce con una certa rapidità fino a raggiungere lo zero, dopo di che la tensione si inverte perché il condensatore si carica di segno opposto.

Evidentemente succede per la corrente la stessa cosa se è la tensione la variabile indipendente.

### STUDIO DELLA CARICA A CORRENTE COSTANTE DEL CONDENSATORE

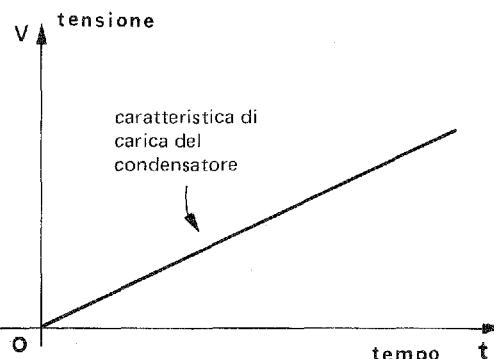
Abbiamo visto che la legge con la quale si determina la rapidità di variazione della tensione ai capi del condensatore è la seguente:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{I}{C}$$

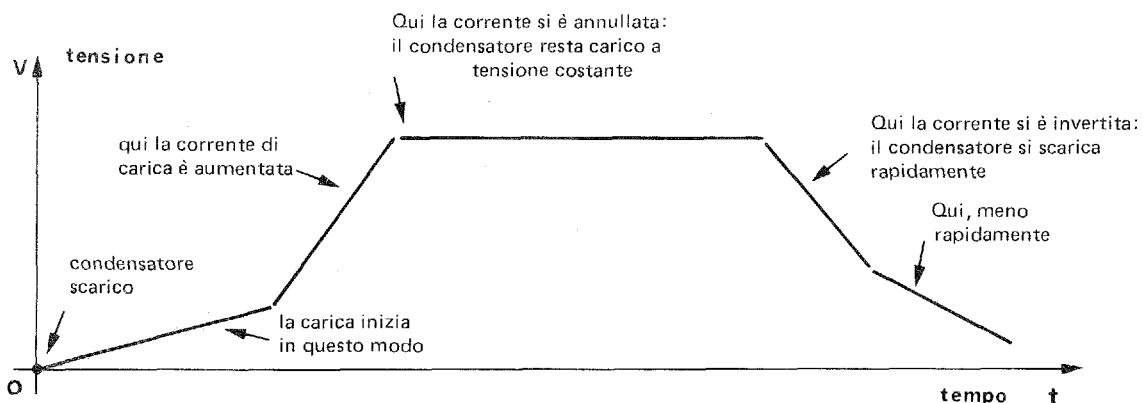
E' evidente che se la corrente I è costante, la rapidità di salita  $\frac{\Delta V}{\Delta t}$  della tensione è pure costante, ciò significa che la tensione sale regolarmente al passare del tempo.

La rappresentazione grafica del fenomeno è quella segnata a lato.

L'inclinazione della caratteristica dipende dal valore della corrente di carica.



Qualora il valore della corrente di carica subisse delle variazioni, la caratteristica si presenterebbe come segue: (le descrizioni si riferiscono ai vari tratti del diagramma)



Se si volesse conoscere il valore della tensione in funzione del tempo che passa, l'espressione precedente si scrive come segue:

Variazione di tensione in volt che si riscontra dopo un intervallo di tempo in cui la corrente si è mantenuta costante ad un determinato valore

$$\Delta V = \frac{I}{C} \Delta t$$

Variazione della corrente di carica (Amp)

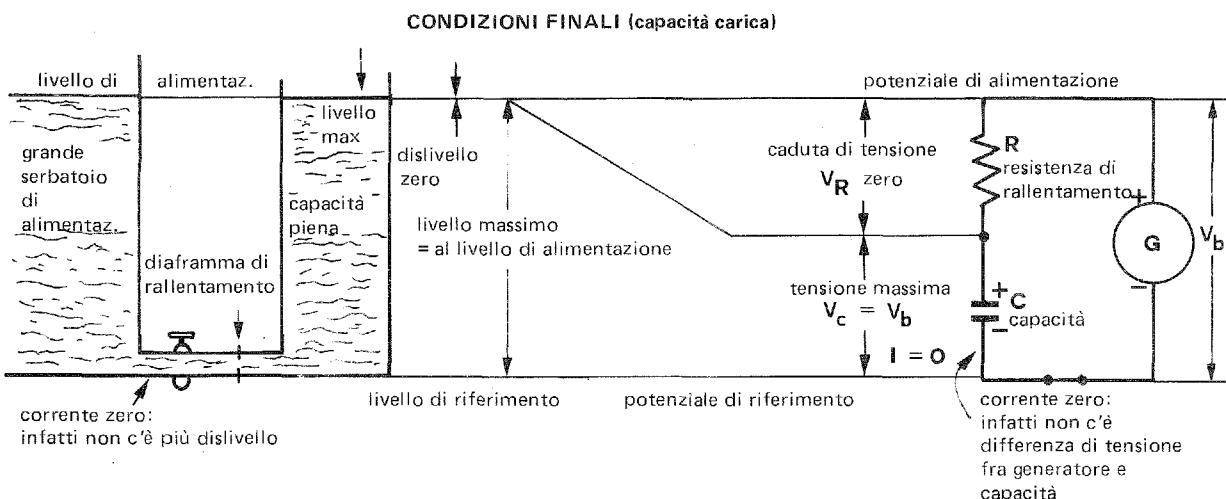
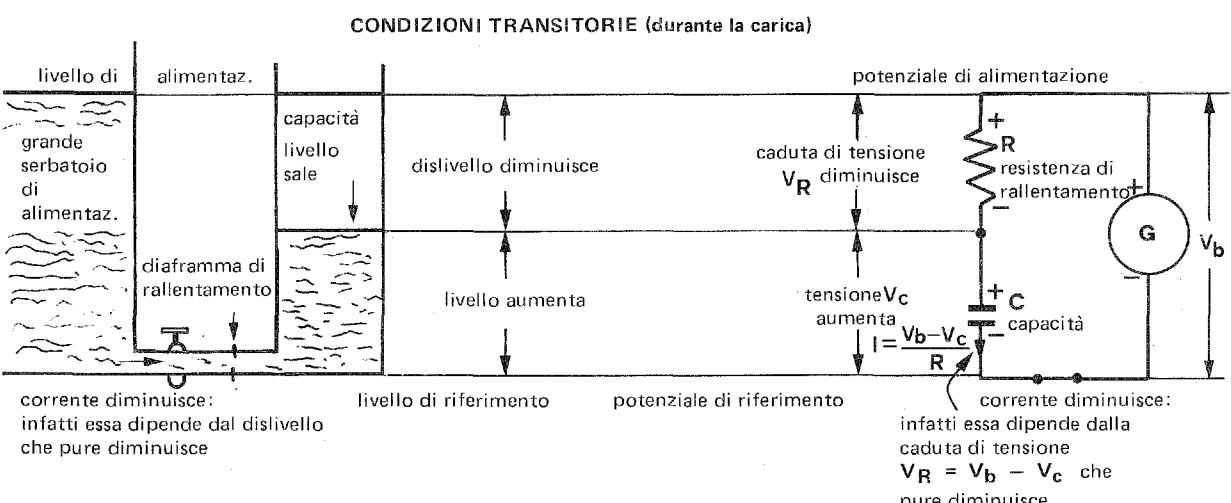
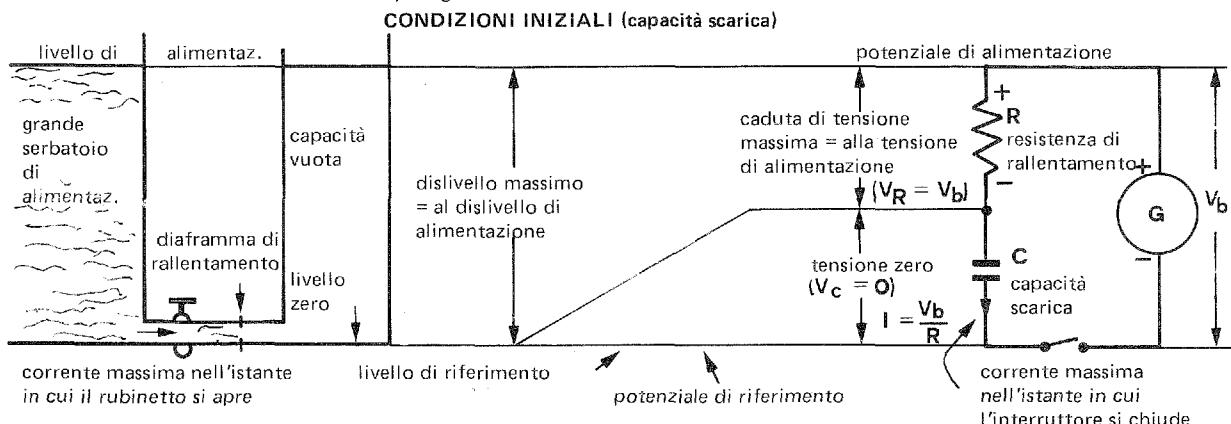
Intervallo di tempo in secondi in cui la corrente mantiene costante il suo valore

Valore della capacità (Fanal)

## SIMILITUDINI NEL FENOMENO DELLA CARICA DI UN CONDENSATORE

Quando si sottopone una capacità scarica ad una sorgente di tensione, la capacità di carica di quantità di elettricità statica. Il livello della quantità che è entrata si mostra come una tensione ai capi della capacità.

Esaminiamo il fenomeno con il solito paragone idraulico in tre fasi.



Aumentando il valore della resistenza il fenomeno è più lento (vedi pag. 5).



### STUDIO DEL FENOMENO DELLA CARICA DI UN CONDENSATORE

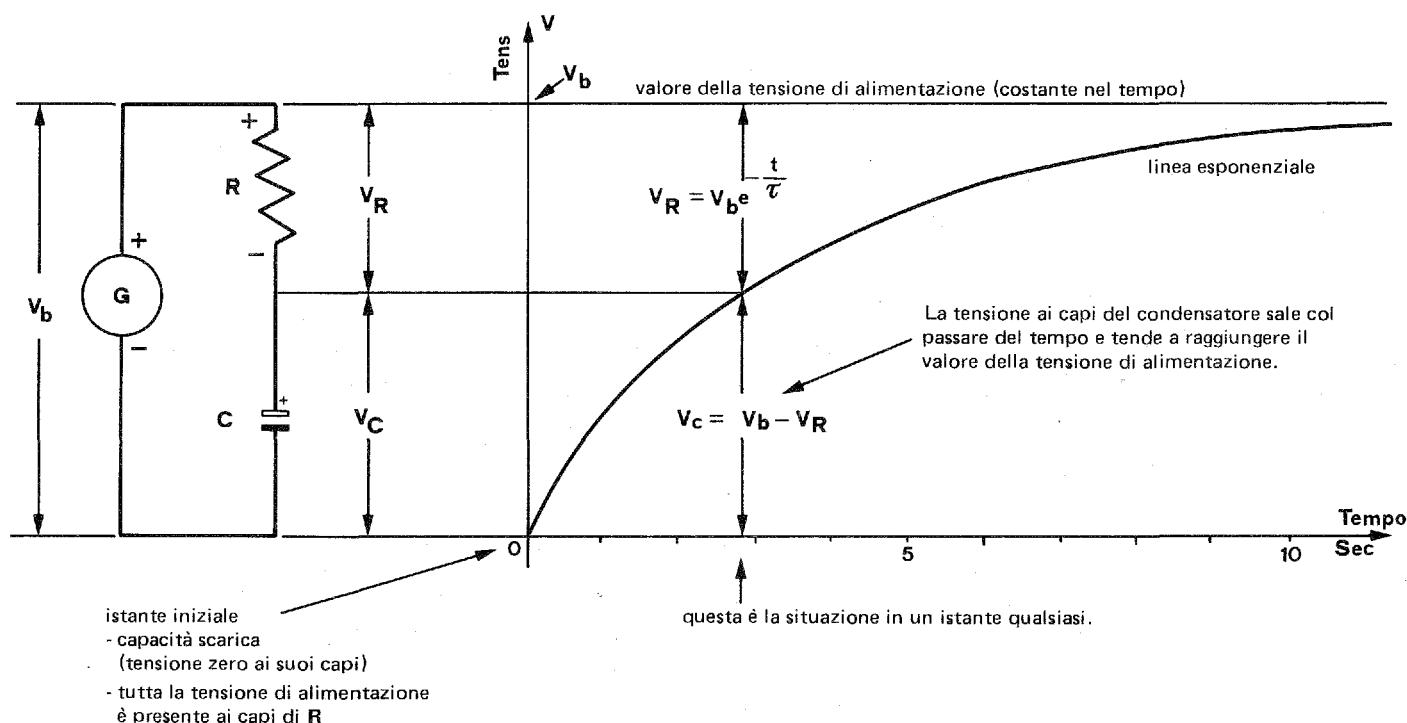
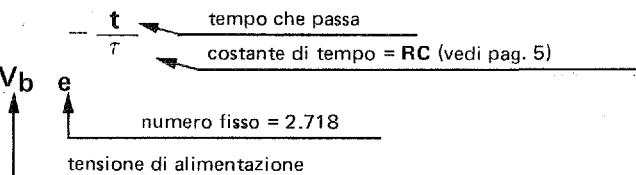
Esaminiamo con quale legge nel tempo la tensione sale ai capi della capacità durante la carica.

#### EQUAZIONE DI FUNZIONAMENTO

Si esamina prima ciò che succede ai capi della resistenza  $R$

Tensione ai capi di  $R$

Questa caduta di tensione è funzione esponenziale del tempo che passa



Conosciuta la legge con la quale la tensione  $V_R$  varia col passare del tempo, si può determinare quella con la quale la tensione  $V_C$  varia col passare del tempo per semplice differenza.

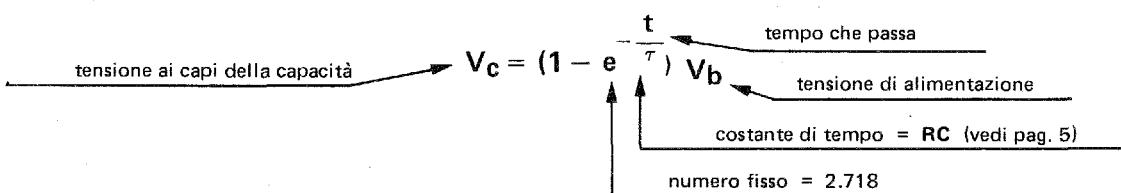
Essendo

$$V_C = V_b - V_R$$

si sostituisce il valore noto di  $V_R$   
 (v. Figura)

$$V_C = V_b - V_b e^{-\frac{t}{\tau}}$$

e, con un po' di algebra elementare, trasformando opportunamente, si arriva alla relazione finale.





### TEMPO DI CARICA E COSTANTE DI TEMPO PER UN CIRCUITO RC

Il tempo di carica di un circuito **RC** (resistenza in serie ad una capacità) è teoricamente infinito perché la tensione sulla capacità non raggiunge mai la tensione di alimentazione.

In pratica però la carica può dirsi raggiunta dopo un tempo pari a 6 volte il fattore **RC**.

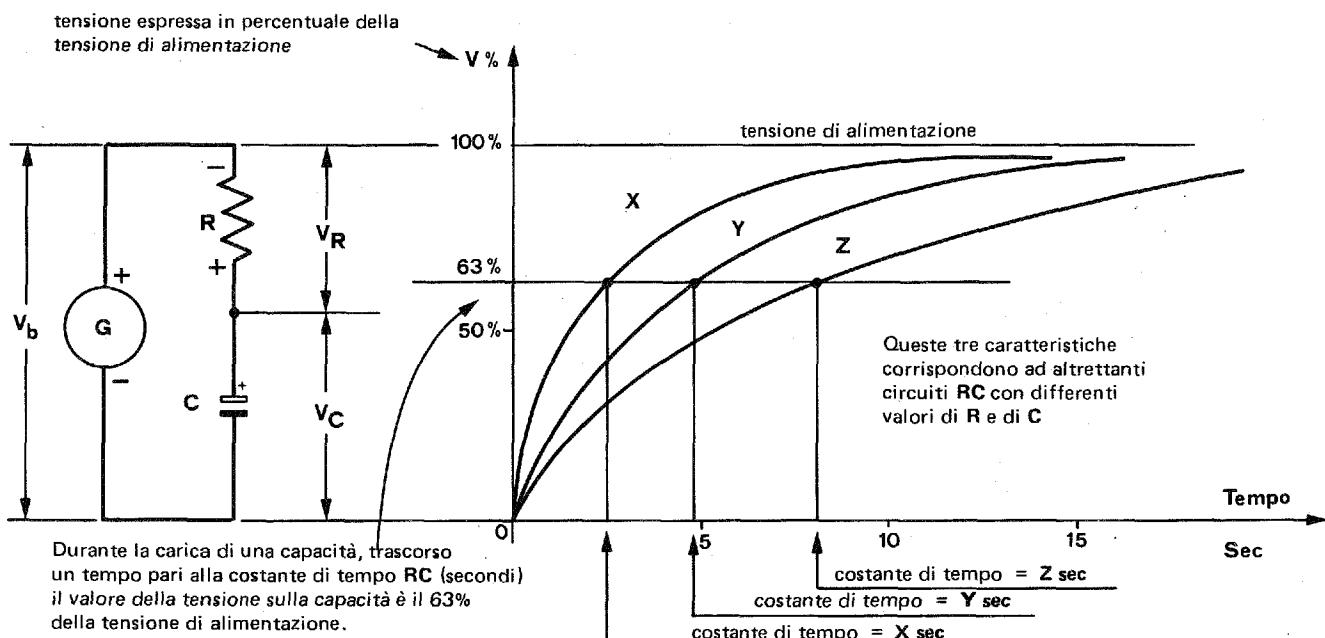
Si chiama **costante di tempo** (vedi 13.22) il prodotto

$$\tau = \frac{R \cdot C}{\text{costante di tempo in secondi}} \quad \begin{matrix} \text{capacità in farad} \\ \text{resistenza in ohm} \end{matrix}$$

Dunque, ripetiamo, il prodotto **RC** corrisponde ad un tempo in secondi.

Ora vogliamo dimostrare che in ogni circuito **RC** sottoposto a carica dopo un tempo pari al prodotto **RC** (secondi) dei rispettivi valori, la tensione sulla capacità raggiunge il 63% della tensione di alimentazione.

Prendiamo le caratteristiche di tre circuiti aventi differenti valori del prodotto **RC**.



Vediamo algebricamente perchè.

Nell'espressione algebrica della caratteristica (vedi 13.23)

$$V_c = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) V_b$$

il tempo  $t = \tau = RC$  fa diventare l'esponente uguale a 1, cioè

$$V_c = (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}) V_b$$

Esprimendo sottoforma di frazione la potenza ad esponente negativo e sostituendo ad e il suo valore = 2.718, si ha

$$V_c = (1 - \frac{1}{2.718}) V_b$$

Completiamo i conti

$$V_c = (1 - 0,387) V_b$$

Osservazione

Riducendo R e aumentando C mantenendo costante  $\tau$ , aumenta il valore della corrente di carica.

$$V_c = 0,632 V_b$$

$$V_c = 63,2\% V_b$$

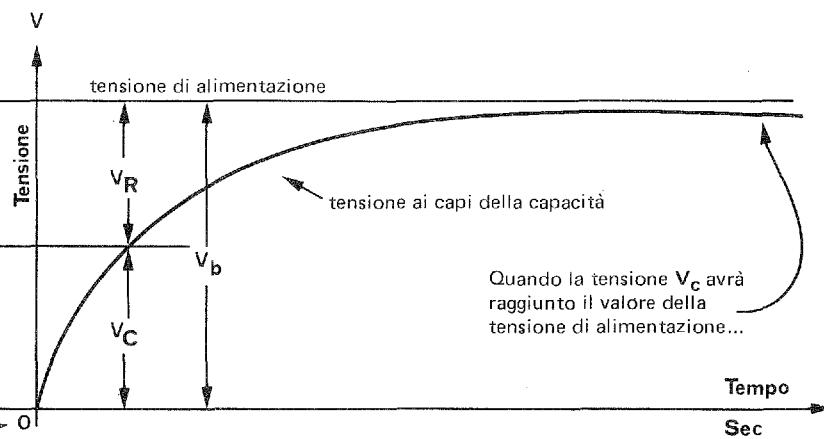
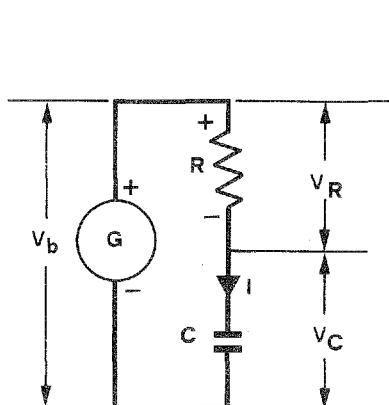
Questo è quanto volevamo dimostrare.



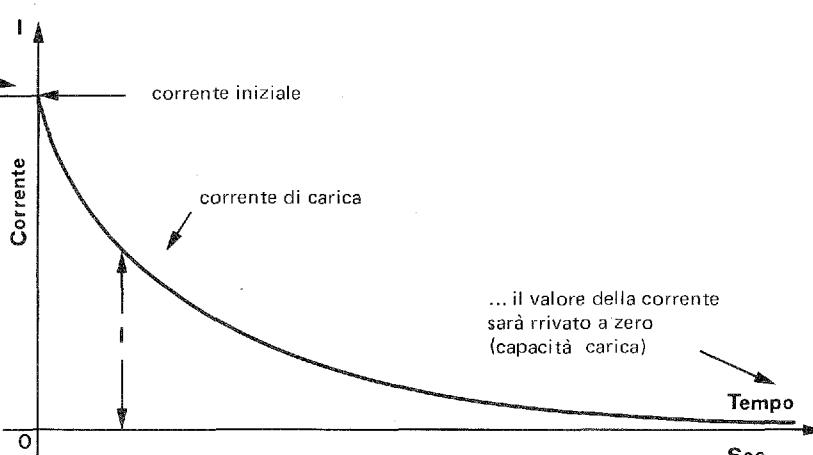
### ANDAMENTO DELLA CORRENTE DI CARICA DI UN CONDENSATORE

Durante la carica di una capacità di un circuito RC la corrente è massima all'inizio della carica e vale indi diminuisce fino ad annullarsi.

$$I_0 = \frac{V_b}{R}$$



istante iniziale  $\left\{ \begin{array}{l} \text{tensione } V_c = 0 \\ \text{corrente } I = \frac{V_b}{R} \end{array} \right.$



Espressione algebrica

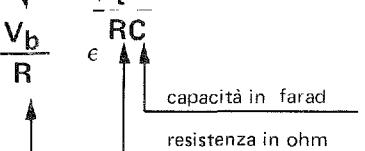
numero fisso = 2,718

tensione di alimentazione in volt

corrente di carica in ampere

$$\frac{V_b}{R} = \text{valore iniziale della corrente in ampere}$$

tempo che passa in secondi



$RC$  = costante di tempo in sec.

ATTENZIONE

Dopo un tempo  $t = RC$  la corrente è pari al 36,8% del valore iniziale.

Dimostrazione — Infatti, nell'espressione algebrica

$$I = \frac{V_b}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

si ponga  $t = RC$  e la frazione all'esponente diventa = 1 mentre l'espressione algebrica diventa

$$I = \frac{V_b}{R} e^{-1}$$

Trasformando in frazionario l'esponente negativo e sostituendo ad  $e$  il suo valore = 2,718

$$I = \frac{V_b}{R} \frac{1}{2,718}$$

Completando i conti

$$I = \frac{V_b}{R} 0,368$$

Questo è quanto volevamo dimostrare

$$I = 36,8 \frac{V_b}{R}$$



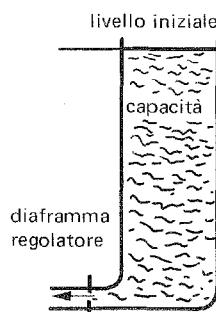
### FENOMENO DELLA SCARICA DI UN CONDENSATORE

Il fenomeno della scarica presenta delle analogie con quello della carica salvo che:

- il generatore non è più necessario
- si inverte il senso della corrente e di conseguenza
- si inverte la polarità della resistenza
- tensione e corrente scendono entrambe.

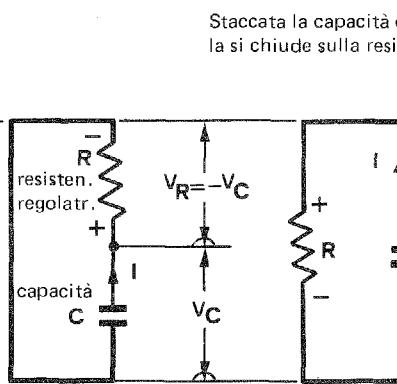
Esaminiamo il fenomeno con il solito paragone idraulico.

Staccato il serbatoio pieno  
si lascia defluire l'acqua



A livello massimo la portata di deflusso è massima.  
La portata diminuisce man mano che il livello si abbassa

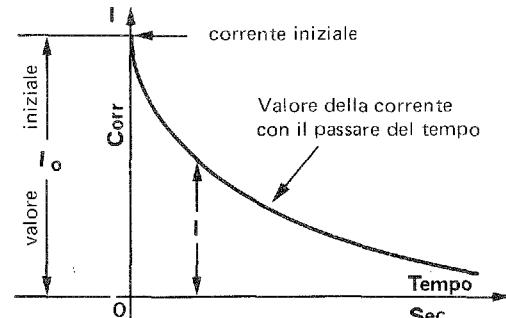
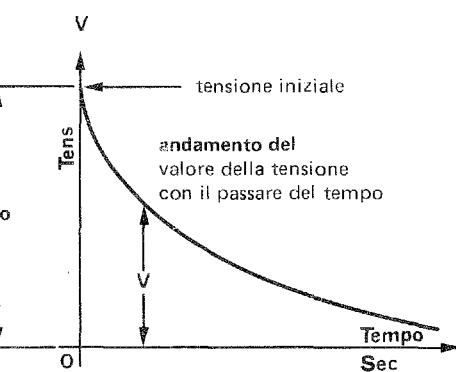
Staccata la capacità carica  
la si chiude sulla resistenza



Si constati l'inversione di polarità sulla resistenza.  
Ora è la capacità che funge da generatore e quindi

è più intuitivo disegnare il circuito in questo modo

A tensione massima si ha corrente massima  
Man mano che la tensione diminuisce, la corrente pure diminuisce



**Costante di tempo** - Valgono gli stessi concetti del fenomeno della carica, ma **ATTENZIONE**:

Dopo un tempo  $t = RC$  la tensione, ed anche la corrente, sono pari al 36,8% del valore iniziale.

Vediamo algebricamente perchè:

Scriviamo l'espressione del valore della tensione in funzione del trascorrere del tempo.

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

tensione iniziale in volt

tempo che passa in secondi

$\frac{t}{RC}$

costante di tempo in secondi

$R = \text{resistenza in ohm}$

$C = \text{capacità in farad}$

numero fisso = 2.718

Se si pone  $t = RC$  la frazione in esponente diventa = 1  
e l'espressione algebrica si modifica così:

$$V = V_0 e^{-1}$$

Trasformando in frazionario l'esponente negativo e sostituendo ad  $e$  il suo valore = 2.718 l'espressione diventa

$$V = V_0 \frac{1}{2.718}$$

Completando i conti

$$V = V_0 0.368$$

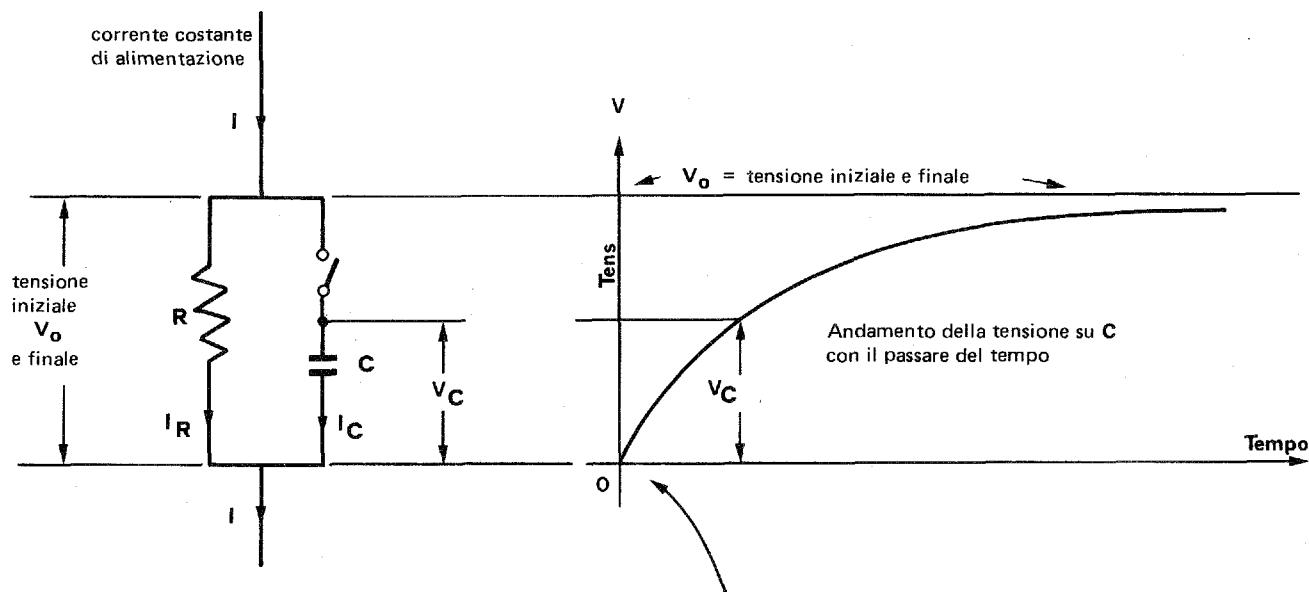
Per la corrente analogamente sostituendo  $V$  con  $I$   
Ed era ciò che volevamo dimostrare

$$V = 36.8\% V_0$$



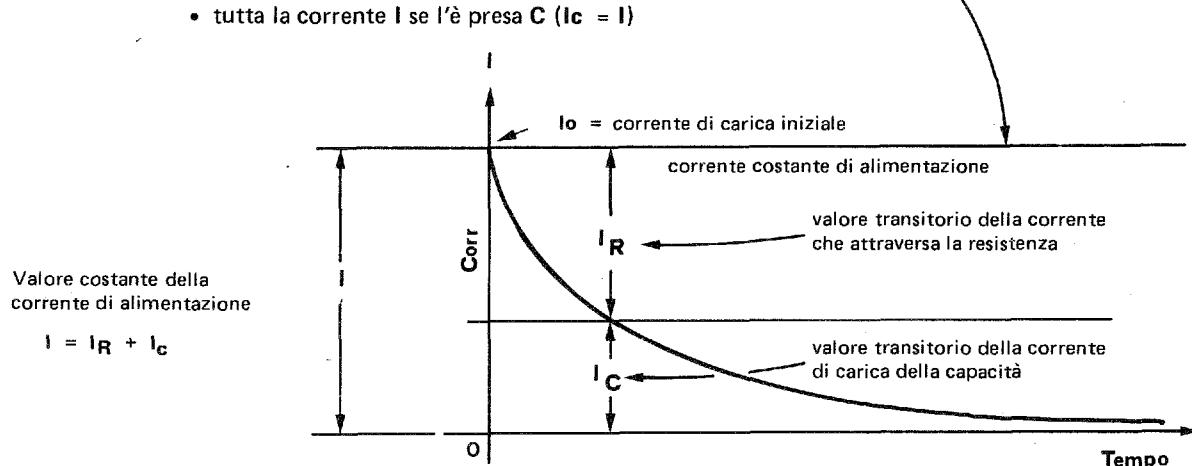
### CARICA DEL CONDENSATORE CON RESISTORE IN PARALLELO

L'alimentazione a corrente costante è meno intuitiva, ma non deve essere meno interessante per comprendere questo fenomeno che è molto importante in elettronica e per inquadrarlo nel principio di reciprocità fra tensione e corrente.



All'istante di chiusura dell'interruttore (inizio della carica):

- la tensione iniziale va a zero perché la capacità è scarica e perciò  $V_C = 0$
- la corrente  $I_C$  che attraversa la capacità è massima ed uguale a  $I$  ( $I_C = I$ )
- la corrente  $I$  che attraversava la resistenza è zero perché:
  - non c'è tensione ai suoi capi ( $V_0 = V_C = 0$ )
  - tutta la corrente  $I$  se l'è presa  $C$  ( $I_C = I$ )



Dopo un certo tempo, teoricamente infinito (fine della carica), si ha:

- la capacità è carica sotto tensione  $V_0$  e perciò
- la corrente di carica è zero ( $I_C = 0$ ) e perciò ancora
- la corrente che attraversa  $R$  ritorna al valore iniziale  $I$

Sezione : 1 Grandezze fondamentali

Capitolo : 13 Parametri del circuito

Paragrafo : 13.2 Capacità

Argomento : 13.24 Comportamento a regime variabile di tensione



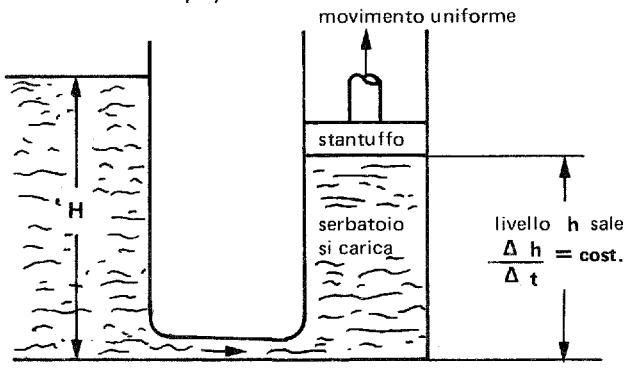
### CARICA DEL CONDENSATORE CON TENSIONE VARIABILE

Se abbiamo afferrato il concetto di capacità espresso al paragrafo 13.1, possiamo esaminare ora ciò che succede quando la capacità viene caricata con tensione che, invece di apparire tutta all'improvviso ai capi del circuito, viene inviata gradualmente secondo una determinata legge.

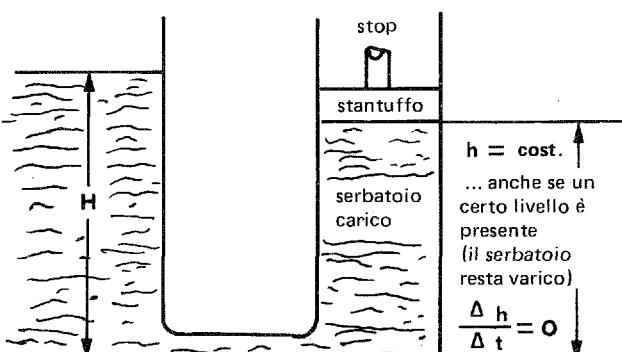
Per semplificare il concetto immagineremo qui che la legge con la quale faremo variare nel tempo la tensione sia lineare. Cioè sia  $V = kt$

#### Fenomeno idraulico

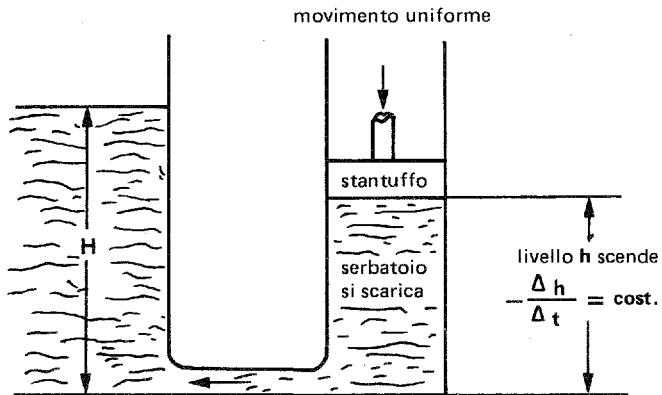
Se in un serbatoio si fa crescere il livello uniformemente col tempo, la corrente di carica sarà costante.



Se si arresta il movimento di salita del livello...

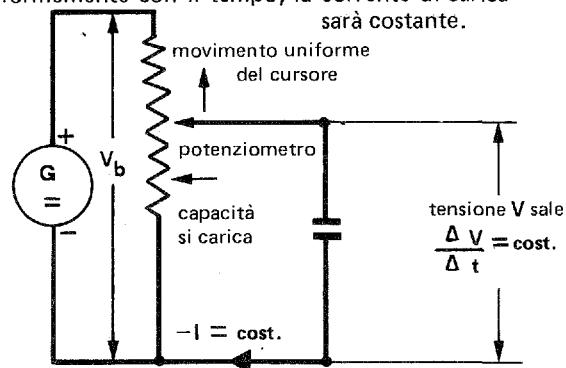


Se infine si fa abbassare il livello...

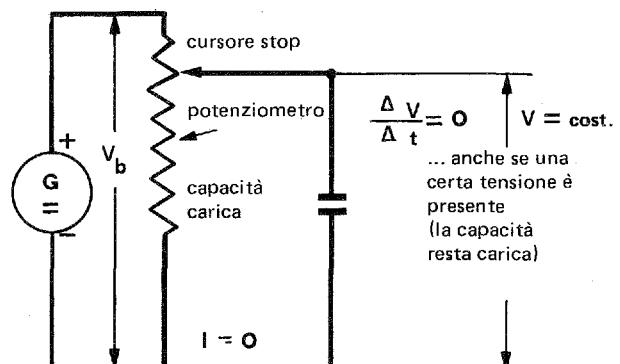


#### Fenomeno elettrico

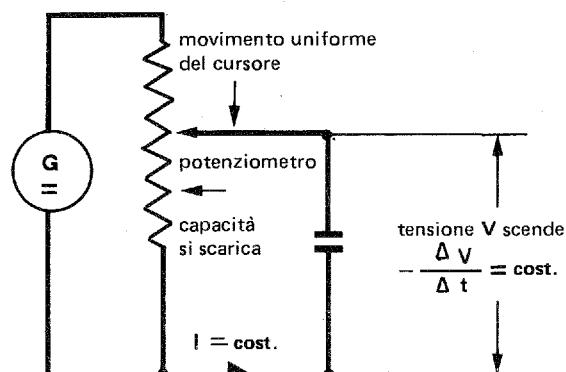
Se ai capi di una capacità si fa crescere la tensione uniformemente con il tempo, la corrente di carica sarà costante.



Se si arresta la salita della tensione...



Se infine si fa diminuire la tensione...





### L'UNITA' DI MISURA SOTTO L'ASPETTO DINAMICO

Dai fenomeni comparati esaminati nella pagina precedente è evidente che:

#### Situazione idraulica

Il flusso di carica del serbatoio

$$Q = C \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

è proporzionale alla capacità del serbatoio  
è proporzionale alla rapidità di variazione del livello

Da questa relazione si può dedurre il fenomeno inverso: alimentando il serbatoio con un flusso costante di liquido.

La rapidità di salita del livello

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{Q}{C}$$

è direttamente proporzionale al flusso di carica  
è inversamente proporzionale alla capacità

Inoltre dalla stessa relazione si può anche ricavare la capacità del serbatoio

$$C = \frac{Q}{\frac{\Delta h}{\Delta t}}$$

flusso di carica (kg/sec)  
rapidità di salita del livello (m/sec)  
capacità (kg/m)

Questa capacità non ha un nome particolare.

Si dirà che un serbatoio ha una capacità di tot kg al metro di livello quando, caricandolo con un flusso di tot kg al secondo, il livello del liquido contenuto aumenta di 1 metro al secondo.

#### Situazione elettrica

la corrente di carica della capacità

$$I = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

è proporzionale al valore della capacità  
è proporzionale alla rapidità di variazione della tensione applicata

Da questa relazione si può dedurre il fenomeno inverso: alimentando il condensatore con un flusso costante di carica elettrica.

La rapidità di salita della tensione

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{I}{C}$$

è direttamente proporzionale alla corrente di carica  
è inversamente proporzionale alla capacità

Inoltre dalla stessa relazione si può anche ricavare il valore della capacità

$$C = \frac{I}{\frac{\Delta V}{\Delta t}}$$

corrente di carica (A)  
rapidità di salita della tensione (V/sec)  
capacità (F)

Questa capacità ha un nome: FARAD

Si dirà che un dispositivo ha un capacità di tot farad (coulomb al volt di potenziale) quando caricandolo con una corrente di tot ampere (coulomb al secondo) il potenziale ai suoi capi aumenta di 1 volt al secondo.

In particolare si ha che:

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ ampere}}{1 \text{ volt}} \text{ secondo}$$

in altre parole ancora:

la capacità di 1 farad fa assorbire ai capi del circuito una corrente continua e costante di 1 ampere, se applico ai suoi capi una tensione uniformemente variabile in ragione di 1 volt/sec.

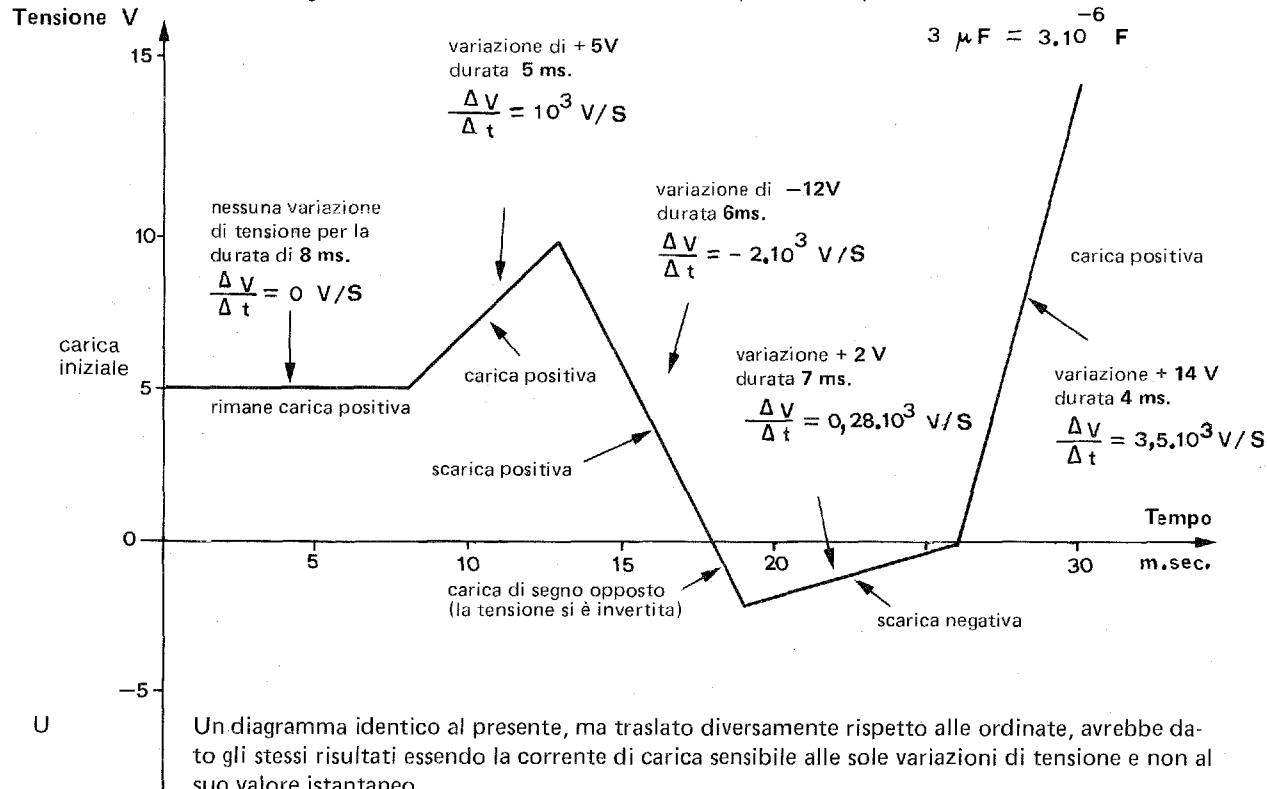
**Attenzione:** Le grandezze fisiche non sono omogenee con quelle elettriche: esse sono state messe a confronto solo per la loro sorprendente analogia intuitiva.

**Suggerimento:** Si confronti l'affascinante ed inevitabile identità con quanto descritto a pag. 13.10-2



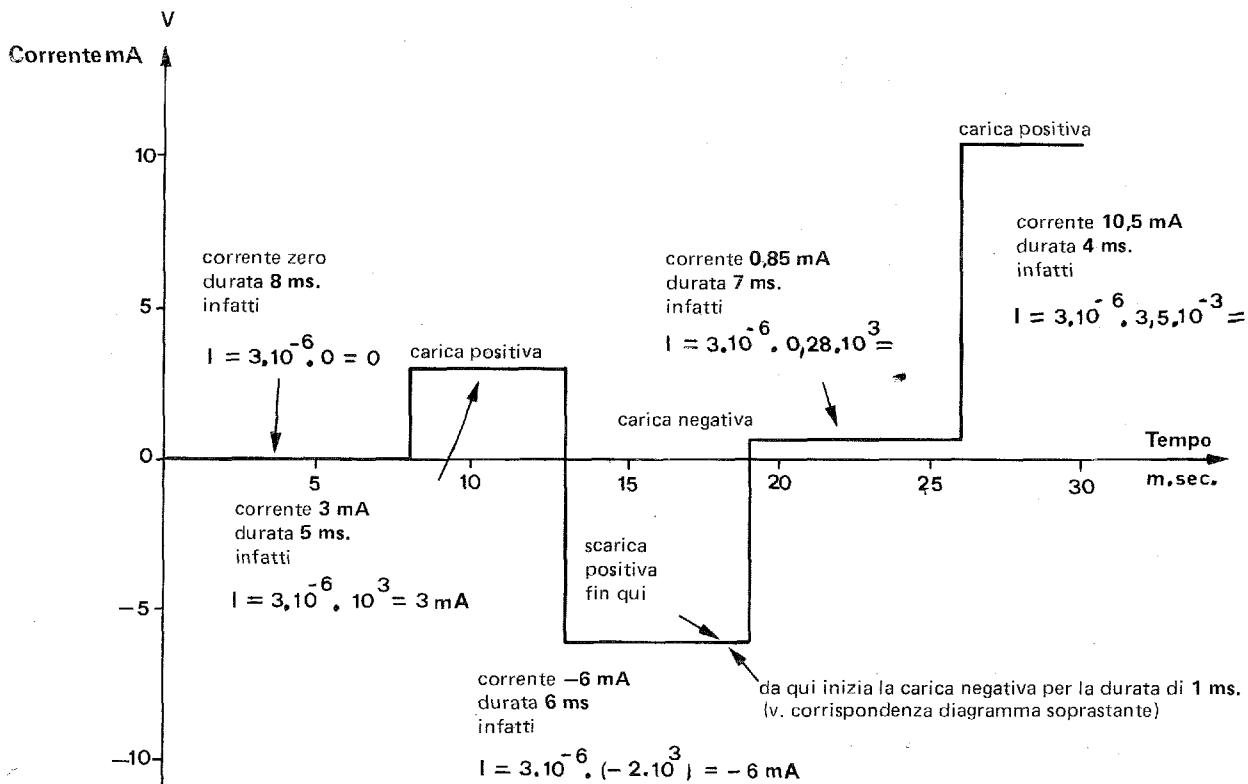
### ESEMPIO DI CONDENSATORE SOTTOPOSTO A VARIAZIONI LINEARI DI TENSIONE

Dato il diagramma di variazione della tensione ai capi di una capacità di



Un diagramma identico al presente, ma traslato diversamente rispetto alle ordinate, avrebbe dato gli stessi risultati essendo la corrente di carica sensibile alle sole variazioni di tensione e non al suo valore istantaneo.

Tracciamo qui sotto il diagramma contemporaneo dell'andamento della corrente di carica e scarica.





### ESEMPIO DI CONDENSATORE SOTTOPOSTO A VARIAZIONI QUALSIASI DI TENSIONE

Dato il seguente diagramma della tensione applicata ai capi di una capacità da  $5\mu F = 5 \cdot 10^{-6} F$ .

In questo caso gli intervalli di tempo in cui si verifica un determinato valore di  $\Delta V/\Delta t$  sono infinitesimi (istantanei), dato che anche le stesse variazioni cambiano ad ogni istante.

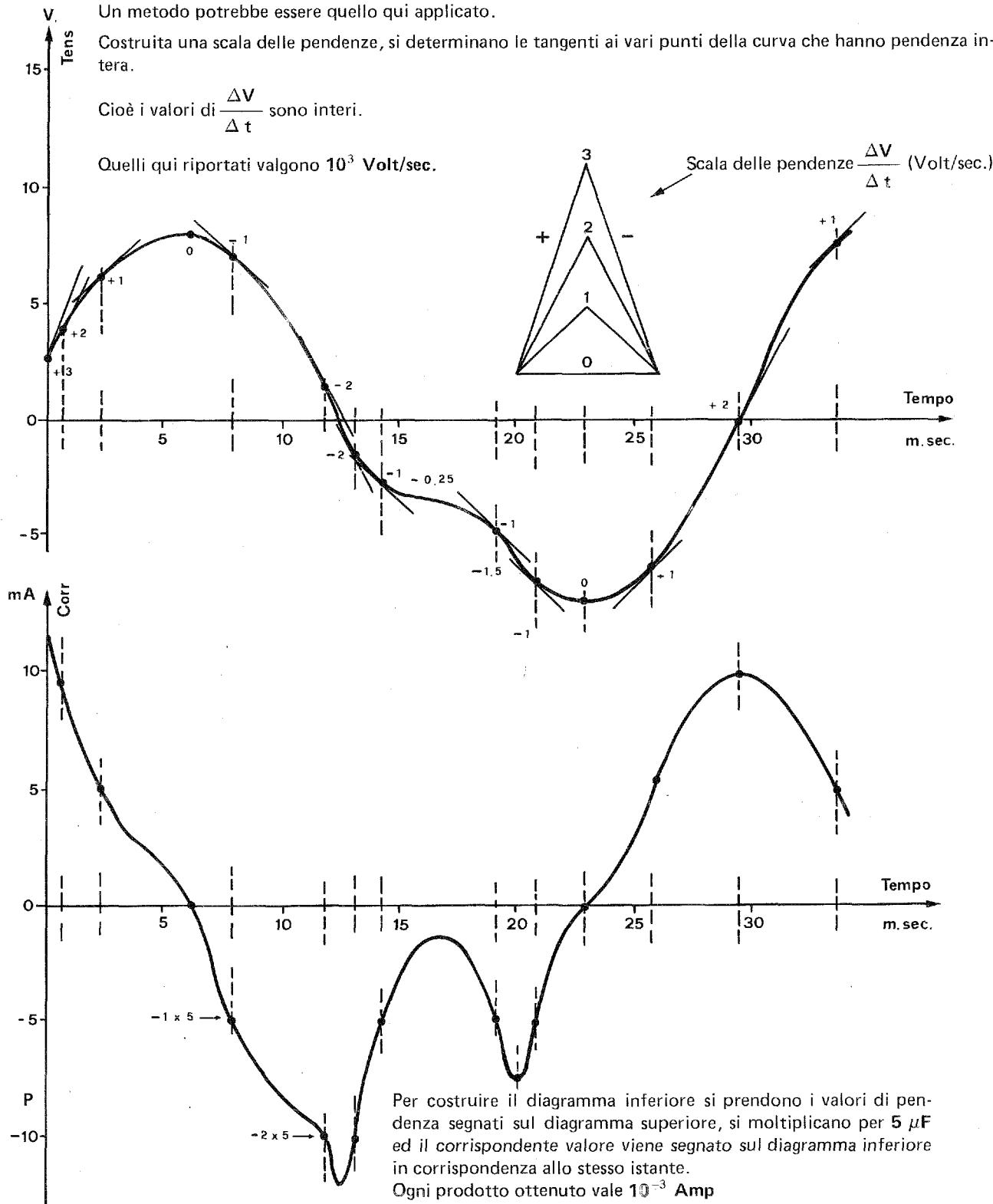
Intervalli di tempo finiti possono però essere determinati sulle tangenti dei punti più significativi.

Un metodo potrebbe essere quello qui applicato.

Costruita una scala delle pendenze, si determinano le tangenti ai vari punti della curva che hanno pendenza intera.

Cioè i valori di  $\frac{\Delta V}{\Delta t}$  sono interi.

Quelli qui riportati valgono  $10^3$  Volt/sec.



Sezione : 1. Grandezze Fondamentali  
 Capitolo : 13. Parametri del circuito  
 Paragrafo : 13.3. Induttanze  
 Argomento : 13.30. Indice del paragrafo

## Paragrafo 13.3

### INDUTTANZA

**arg. 13.31 — Concetti generali**

- pag. 1 — Definizione di induttanza
- Confronti
- pag. 2 — Unità di misura dell'induttanza: henry
- Confronti.

**arg. 13.32 — Fenomenologia della carica**

- pag. 1 — Carica a tensione costante dell'induttore
- pag. 2 — Studio della carica a tensione costante dell'induttore
- pag. 3 — Similitudini nel fenomeno della carica di un induttore
- pag. 4 — Studio del fenomeno della carica di un induttore
- pag. 5 — Tempo di carica e costante di tempo per un circuito RL
- pag. 6 — Andamento della corrente di carica di un induttore

**arg. 13.33 — Informazioni complementari**

- pag. 1 — Fenomeno della scarica di un induttore
- pag. 2 — Carica dell'induttore con resistore in parallelo

**arg. 13.34 — Comportamento a regime variabile di corrente**

- pag. 1 — Carica dell'induttore con corrente variabile
- pag. 2 — L'unità di misura sotto l'aspetto dinamico
- pag. 3 — Esempio di induttore sottoposto a variazioni lineari di corrente
- pag. 4 — Esempio di induttore sottoposto a variazioni qualsiasi di corrente.

## DEFINIZIONE DI INDUTTANZA

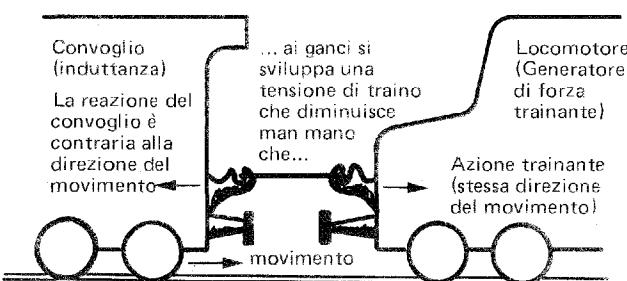
Induttanza elettrica è quella proprietà che hanno tutti i corpi ed in particolare gli induttori (v. sez. 2) di immagazzinare delle qualità di elettricità in movimento.

Questa energia accumulata è presente sotto forma di corrente elettrica che attraversa l'induttanza e non può essere annullata senza essere dispersa sotto forma di calore (dissipazione) o accumulata sotto altra forma.

### CONFRONTI

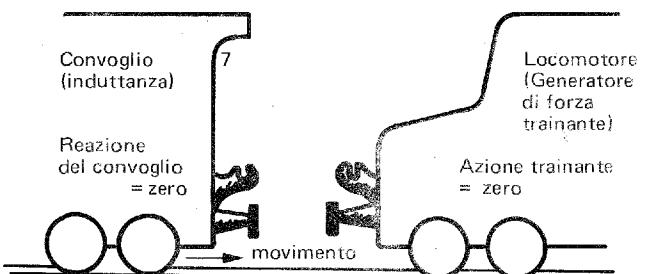
#### Ferroviario

Quando si traina un convoglio ferroviario...

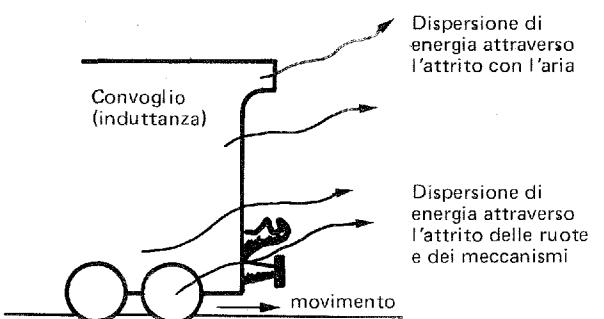


...il convoglio aumenta di velocità e quindi anche di energia cinetica.

Raggiunta la velocità voluta,



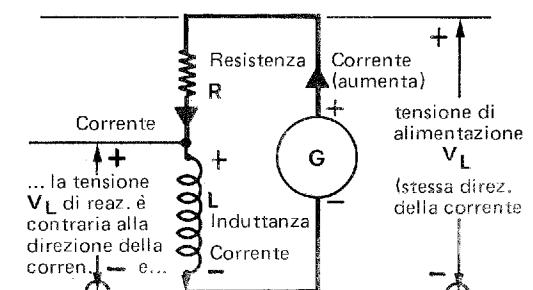
se non ci fossero attriti, la velocità potrebbe essere mantenuta indefinitamente.  
 anche quando il locomote è staccato.



Purtroppo invece gli attriti ci sono e il convoglio rallenta fino a fermarsi.

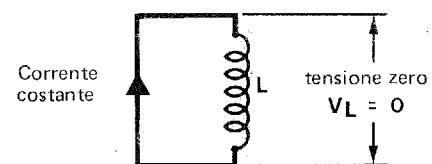
#### Elettrico

Quando si mettono in moto delle cariche elettriche in una induttanza...



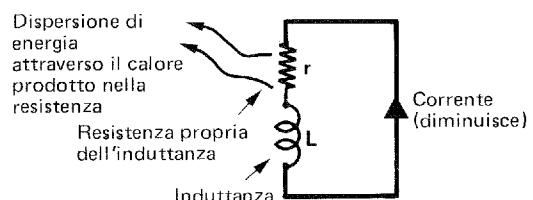
...diminuisce man mano che le cariche aumentano di velocità e quindi anche di energia cinetica.

Raggiunta la corrente voluta,



se l'induttanza fosse priva di resistenza propria, la corrente protrebbe essere mantenuta indefinitamente, mettendo in corto circuito l'induttore prima di staccarlo dal generatore.

L'esistenza di questo fenomeno che sembra paradossale, è messo in evidenza dalla scintilla che si forma nell'interruttore, quando si apre un circuito induttivo, non potendosi arrestare di colpo l'energia cinetica esistente nel circuito stesso.



Purtroppo invece le resistenze proprie ci sono e la corrente diminuisce fino ad annullarsi.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
13.31	2	Capitolo : 13	Parametri dei circuiti
		Paragrafo : 13.3	Induttanza
		Argomento : 13.31	Concetti generali

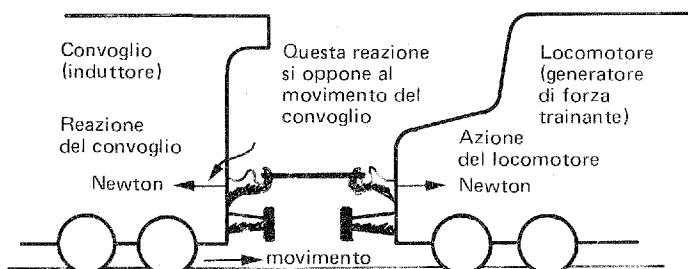
**UNITA' DI MISURA DELL'INDUTTANZA: HENRY**

**CONFRONTI**

**Ferroviario**

L'inerzia di un convoglio (cioè l'attitudine a immagazzinare energia cinetica) si può definire in questo modo:

per quanto tempo si deve applicare una certa tensione di traino (newton-secondi) per far raggiungere al convoglio la velocità di un metro al secondo.



Il rapporto

$$\frac{\text{newton-secondi}}{\text{diviso}} = \frac{\text{metri / secondo}}{}$$

definisce l'inerzia del convoglio e scriveremo concisamente

$$M = \frac{Ft}{v}$$

forza applicata di newton  
durata dell'applicazione: sec.  
impulso di moto in newton-secondi  
velocità raggiunta dal convoglio (m/sec)  
alla fine dell'impulso  
Inerzia del convoglio

Questa inerzia in fisica si chiama **massa**

Si dice che un convoglio ha

una massa di **tot kgM** quando gli si devono applicare **tot newton** di forza di traino per la durata di **un secondo** per fargli raggiungere la velocità di **un metro / sec.**

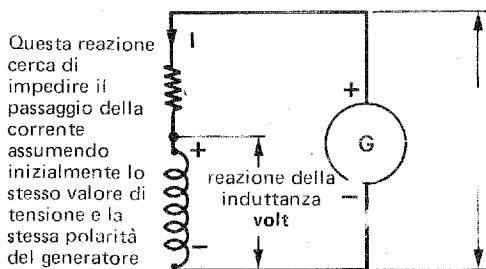
**Attenzione:**

Le grandezze fisiche non sono omogenne con quelle elettriche: esse sono state messe in paragone solo per la sorprendente analogia intuitiva.

**Elettrico**

L'induttanza di un dispositivo (cioè l'attitudine ad immagazzinare energia elettrocinetica) si può definire in questo modo:

per quanto tempo si deve applicare una certa tensione elettrica (volt-secondi) per far raggiungere al dispositivo la corrente di un ampere (= coulomb al secondo).



Il rapporto

$$\frac{\text{volt-secondi}}{\text{diviso}} = \frac{\text{ampere}}{}$$

definisce l'induttanza del circuito e scriveremo concisamente

$$L = \frac{Vt}{I}$$

tensione applicata in volt  
durata dell'applicazione in sec.  
impulso di tensione in volt-secondi  
induttanza del circuito  
corrente raggiunta nel circuito (ampère)  
alla fine dell'impulso

L'unità di misura di questa induttanza si chiama **Henry**.

Si dice che un circuito ha

una induttanza di **tot Henry** quando gli si devono applicare **tot volt** di tensione per la durata di **un secondo** per fargli raggiungere la corrente di **un ampere**.

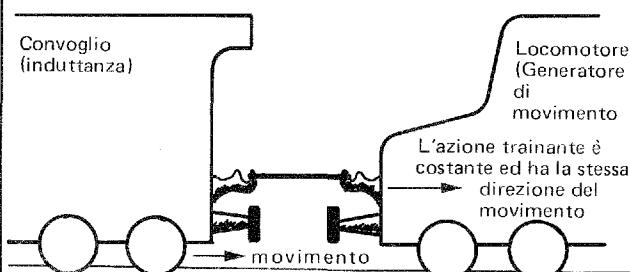
In particolare si ha che

$$1 \text{ henry} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ampere}} \cdot \frac{1 \text{ secondo}}$$

### CARICA A TENSIONE COSTANTE DELL'INDUTTORE

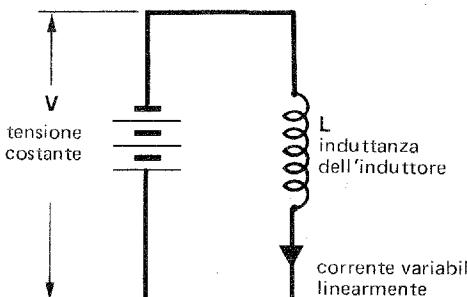
Per esaminare il fenomeno nella sua completezza è meglio cominciare a considerare questo caso particolare facendo i soliti confronti ferroviari.

Se un locomotore traina un convoglio esercitando al gancio uno sforzo costante



...il convoglio aumenterà di velocità in modo da mantenere costante l'accelerazione.

Se un induttore viene caricato a tensione costante...



...la corrente che l'attraversa varierà con una rapidità secondo la seguente espressione

Sarà cioè:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{E}{M}$$

Sforzo al gancio in newton

massa del convoglio in kg.

accelerazione del convoglio (rapidità di variazione della sua velocità in m/sec/sec).

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{V}{L}$$

tensione applicata in volt

induttanza in henry

rapidità di variazione della corrente in A/sec.

#### Conclusioni

- Se la tensione aumenta
- Se la tensione diminuisce
- Se la tensione si annulla
- Se la tensione si inverte

- la corrente aumenta più rapidamente
- la corrente aumenta meno rapidamente
- la corrente si mantiene all'ultimo valore
- la corrente diminuisce con una certa rapidità fino ad annullarsi dopo di che la corrente si inverte e continua ad aumentare negativamente (cioè continua a diminuire).

Il fenomeno è meno intuitivo di quello relativo alla capacità, ma vale la pena di confrontare l'analogia (13.22-1).

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

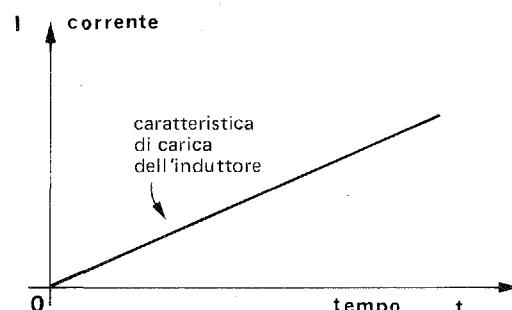
Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze Fondamentali
13.32	2	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.3 Induttanza
		Argomento : 13.32 Fenomeno della carica

### STUDIO DELLA CARICA A TENSIONE COSTANTE DELL'INDUTTORE

Abbiamo visto che la legge con la quale si determina la rapidità di variazione della corrente che attraversa l'induttore è la seguente:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{V}{L}$$

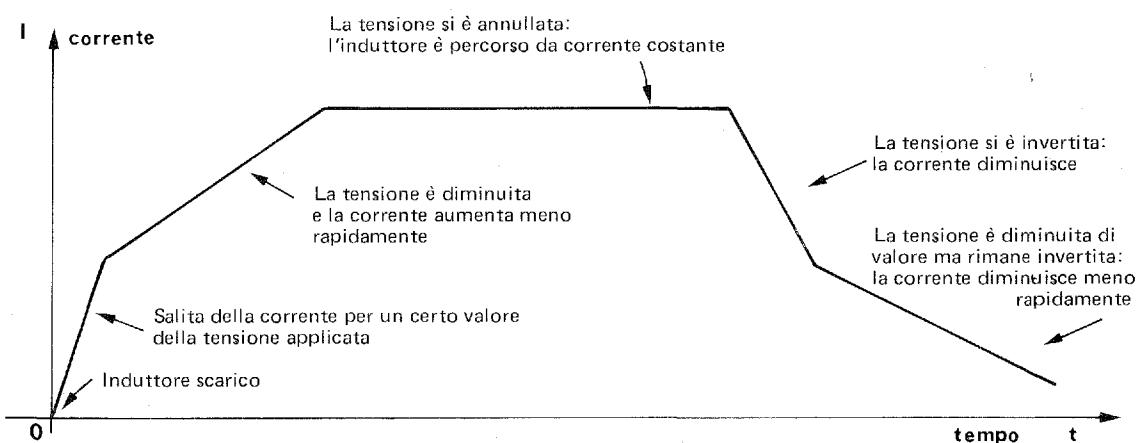
E' evidente che se la tensione  $V$  è costante, la rapidità di crescita della corrente è pure costante, ciò significa che la corrente cresce regolarmente al passare del tempo.



La rappresentazione grafica del fenomeno è quella segnata a lato.

L'inclinazione della caratteristica dipende dal valore della tensione di carica.

Qualora il valore della tensione applicata subisca delle variazioni, la caratteristica si presenterebbe come segue:



Se si volesse conoscere il valore della corrente in funzione del tempo che passa, l'espressione precedente si scrive come segue:

$$\Delta I = \frac{V}{L} \Delta t$$

Variazione di corrente in Amp. che si riscontra dopo l'intervallo di tempo in cui la tensione si è mantenuta costante ad un determinato valore.

Valore della tensione applicata (volt)

Intervallo di tempo in secondi in cui la tensione mantiene costante il suo valore

Valore della induttanza (henry)

Constatare l'analogia con il comportamento della capacità (13.22-2).

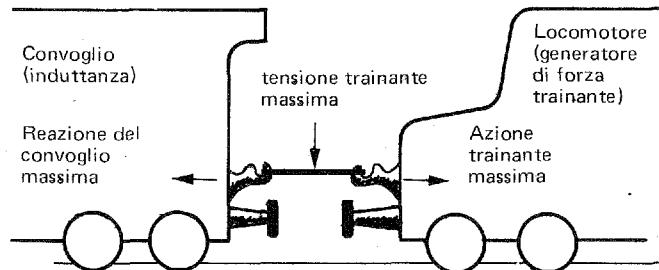
### SIMILITUDINI NEL FENOMENO DELLA CARICA DI UN INDUTTORE

Quando si sottopone una induttanza scarica ad una sorgente di tensione, l'induttanza si carica di quantità di elettricità in movimento.

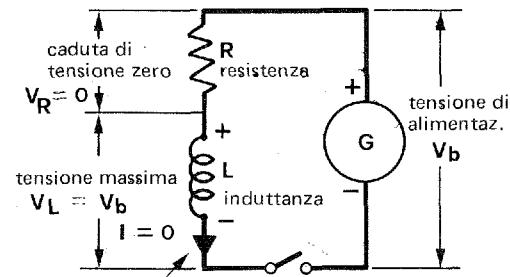
Il livello della quantità in movimento si rivela come una corrente che attraversa l'induttanza.

Esaminiamo il fenomeno con il solito paragone ferroviario in tre fasi.

#### CONDIZIONI INIZIALI (induttanza scarica)

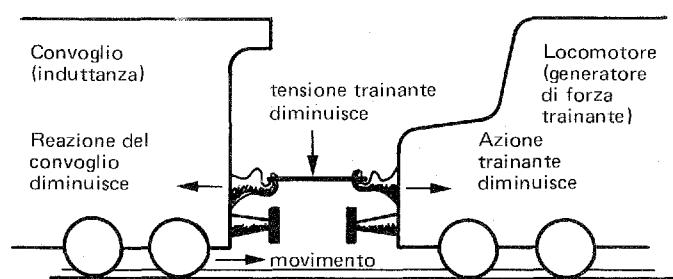


velocità zero nell'istante in cui il locomotore si mette in moto:  
 la reazione del convoglio contrasta l'azione trainante del locomotore.

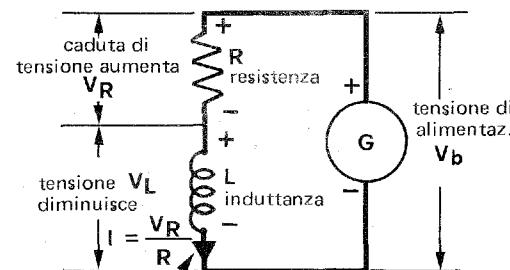


corrente zero nell'istante in cui l'interruttore si chiude (il generatore entra in azione)  
 la reazione dell'induttore si manifesta con una tensione uguale e contraria al generatore.

#### CONDIZIONI TRANSITORIE (durante la carica)

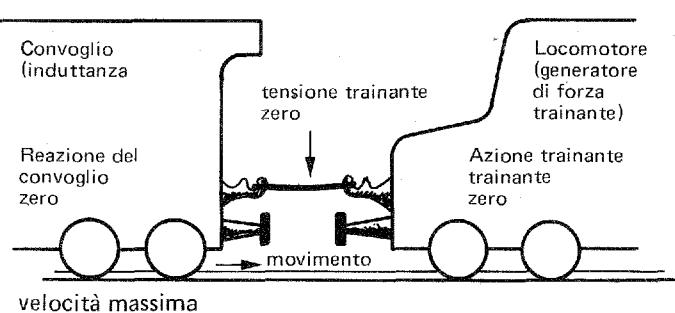


velocità aumenta perché col movimento diminuisce la reazione del convoglio



corrente aumenta nella misura in cui diminuisce la tensione contrastante VL.

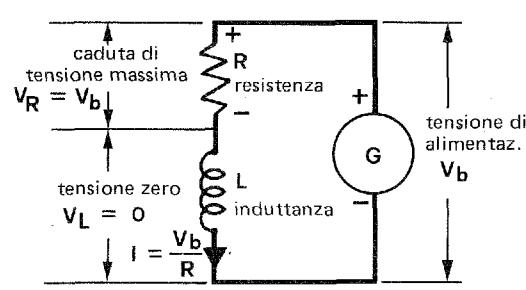
#### CONDIZIONI FINALI (induttanza carica)



Essendo zero la tensione di reazione, questo convoglio può continuare il suo moto anche staccando il locomotore.

Sempre in assenza di attriti.

Aumentando il valore della resistenza R il fenomeno è più lento (vedi pagg. seguenti).



corrente massima

Essendo zero la tensione dell'induttore, esso può essere messo in corto circuito e la corrente continuerà a circolare anche staccando il generatore.

Sempre in assenza di

resistenze passive interne.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

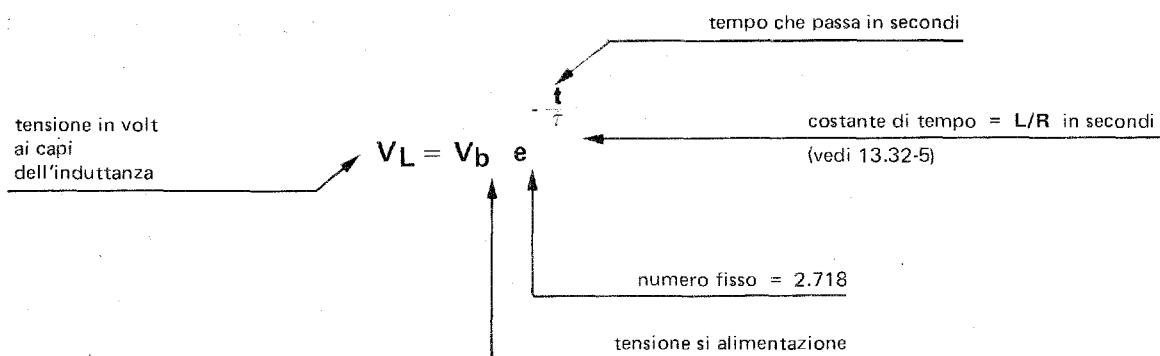
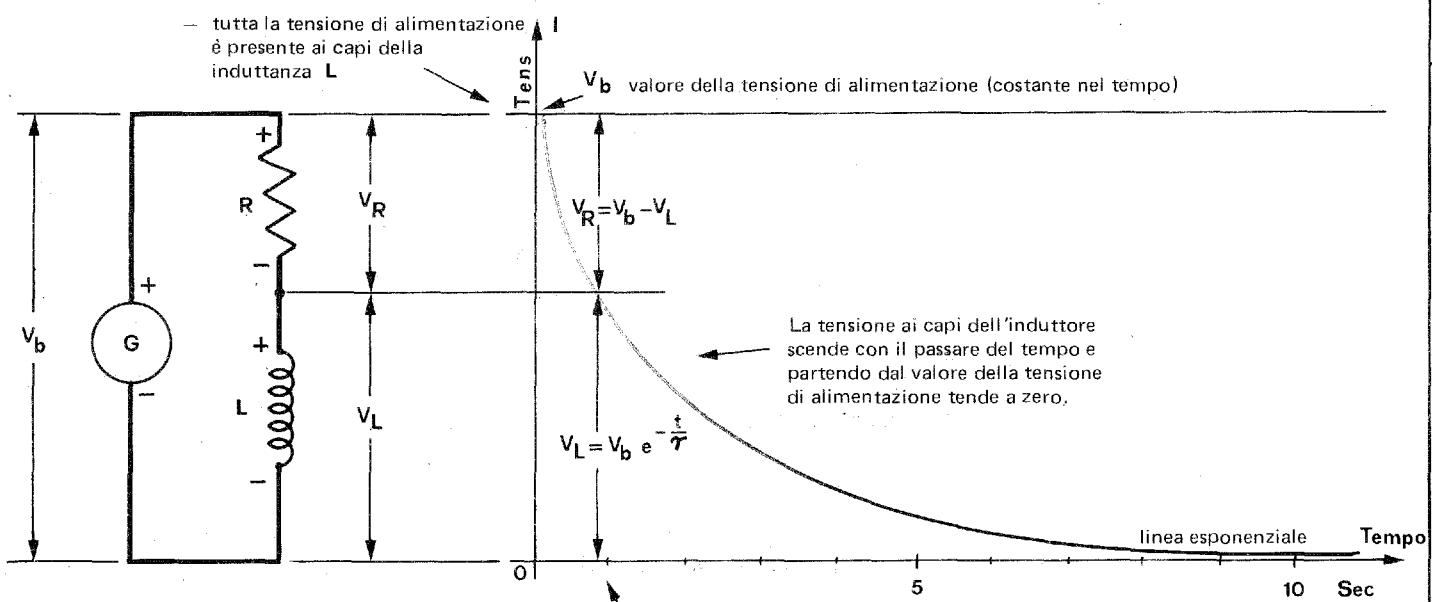
Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze Fondamentali
13.32	4	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.3 Induttanza
		Argomento : 13.32 Fenomeno della carica

**STUDIO DEL FENOMENO DELLA CARICA DI UN INDUTTORE**

Esaminiamo la legge con la quale la tensione ai capi dell'induttanza scende con il tempo durante la carica.

Istante iniziale

- Induttanza scarica  
(nessuna corrente la attraversa)
- tutta la tensione di alimentazione  
è presente ai capi della  
induttanza  $L$





### TEMPO DI CARICA E COSTANTE DI TEMPO PER UN CIRCUITO RL

Il tempo di carica di un circuito **RL** (resistenza in serie ad una induttanza) è teoricamente infinito perché la tensione sull'induttanza non riesce ad andare a zero.

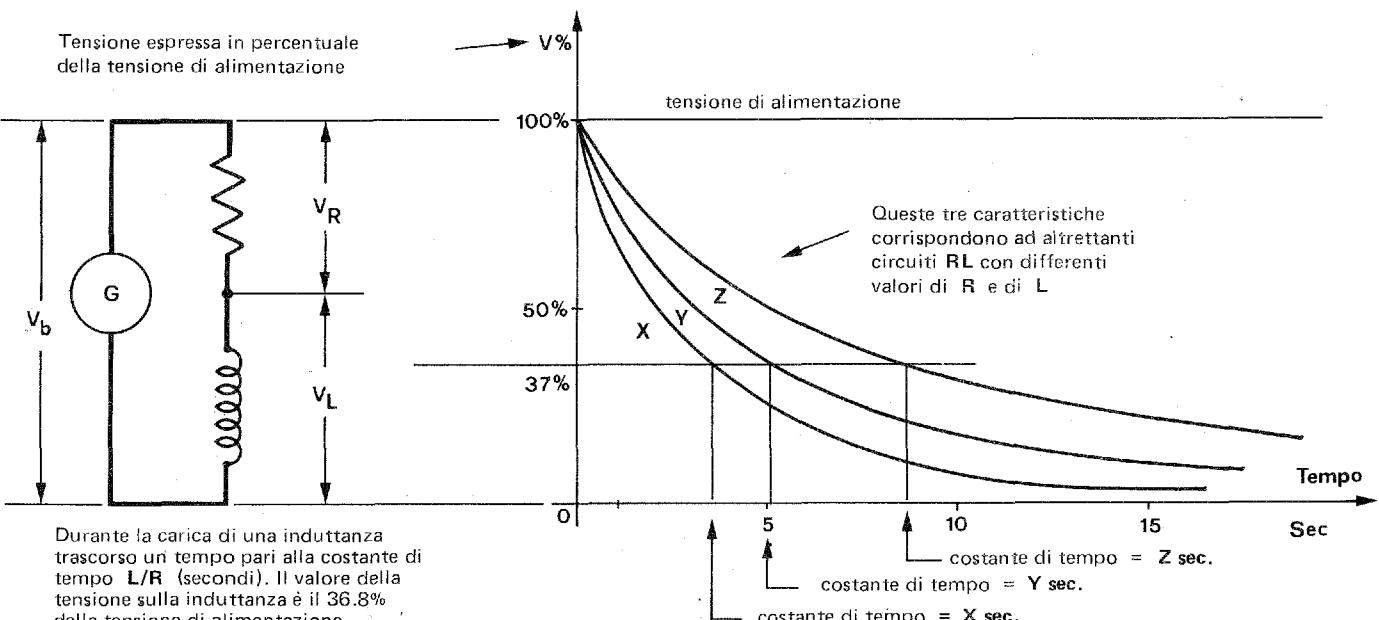
In pratica però, la carica può dirsi raggiunta dopo un tempo pari a 6 volte il rapporto  $\frac{L}{R}$   
 Si chiama **costante di tempo** (vedi 13.32-4) il rapporto

$$\text{costante di tempo in secondi} \quad \tau = \frac{L}{R}$$

Dunque, ripetiamo, il rapporto  $\frac{L}{R}$  corrisponde ad un tempo in secondi.

Ora vogliamo dimostrare che ogni circuito **RL** sottoposto a carica dopo un tempo pari al rapporto  $L/R$  (secondi) dei rispettivi valori, la tensione sull'induttanza raggiunge il 36.8% della tensione di alimentazione.

Prendiamo le caratteristiche di tre circuiti aventi differenti valori del rapporto  $\frac{L}{R}$



Durante la carica di una induttanza trascorso un tempo pari alla costante di tempo  $L/R$  (secondi). Il valore della tensione sulla induttanza è il 36.8% della tensione di alimentazione

Vediamo algebricamente perchè.

Nell'espressione algebrica della caratteristica (vedi 13.23)

$$V_L = V_b e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Il tempo  $t = \tau = \frac{L}{R}$  fa diventare l'esponente = 1, cioè:

$$V_L = V_b e^{-1}$$

Esprimendo sotto forma di frazione la potenza ad esponente negativo e sostituendo ad e il suo valore = 2.718, si ha

$$V_L = V_b \frac{1}{2.718}$$

Completando i conti

$$V_L = V_b \cdot 0.368$$

Questo è quanto volevamo dimostrare

$$V_L = 36.8\% V_b$$

Osservazione

Riducendo sia R che C, mantenendo costante  $\tau$ , aumenta il valore della corrente di carica.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice  
13.32

Pagina  
6

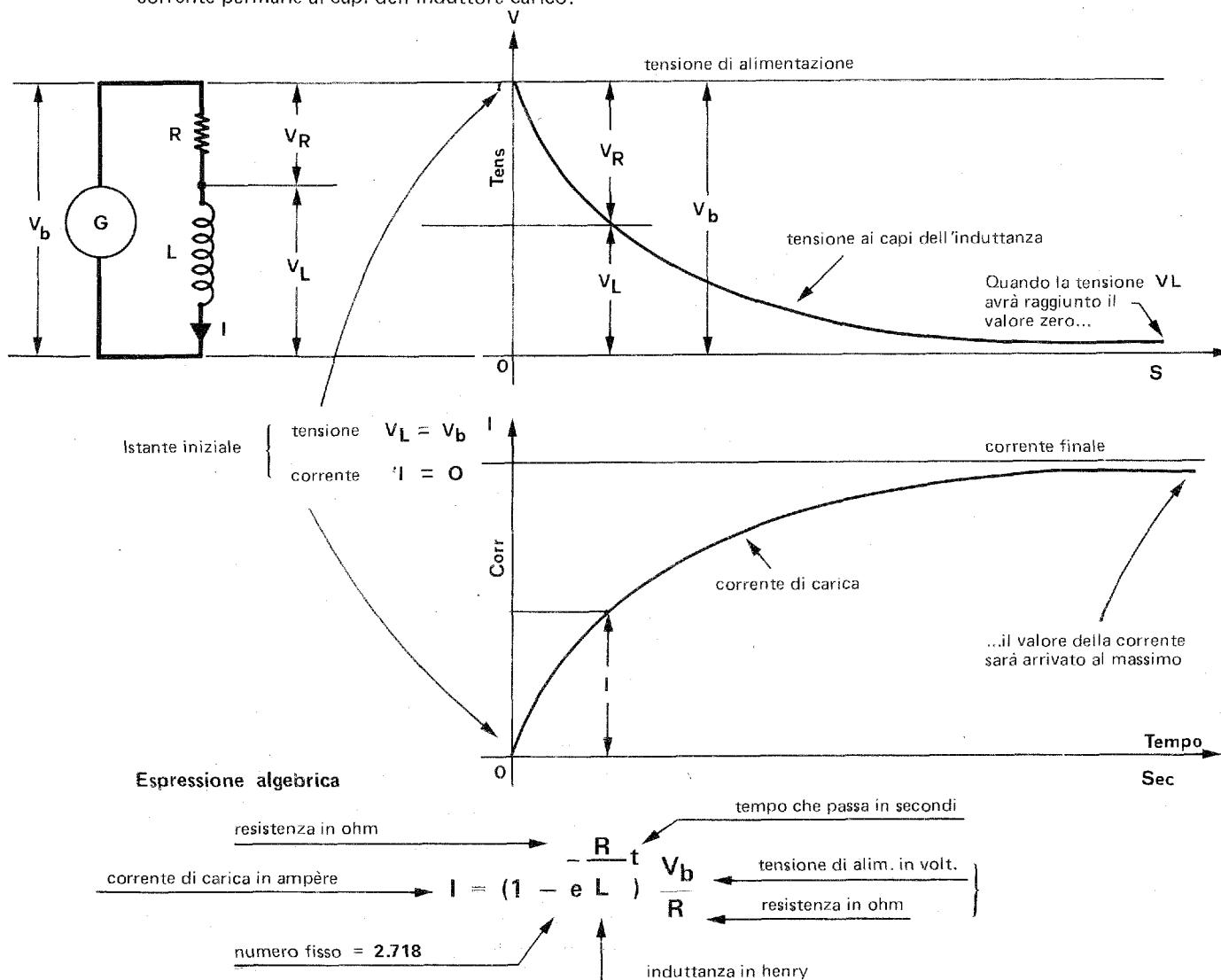
Sezione : 1 Grandezze Fondamentali  
Capitolo : 13 Parametri del circuito  
Paragrafo : 13.3 Induttanza  
Argomento : 13.32 Fenomeno della carica



**ANDAMENTO DELLA CORRENTE DI CARICA DI UN INDUTTORE**

Durante la carica di una induttanza in un circuito  $RL$ , la corrente è zero all'inizio della carica a causa della reazione di tensione  $V_L = V_b$  indi, la corrente aumenta fino a valore  $I_M = V_b/R$  mentre la tensione va a zero.

Come si vede, la tensione appare transitoriamente durante la carica, annullandosi a carica avvenuta, mentre la corrente permane ai capi dell'induttore carico.



**ATTENZIONE**

Dopo un tempo  $t = \frac{L}{R}$  la corrente è pari al 63% del valore finale

**Dimostrazione** - Infatti, nell'espressione algebrica

Si ponga  $t = \frac{L}{R}$  e la frazione all'esponente diventa = 1 mentre la espressione algebrica diventa

$$I = \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot \frac{L}{R}}\right) \frac{V_b}{R}$$

$$I = \left(1 - e^{-1}\right) \frac{V_b}{R}$$

Trasformando in frazionario l'esponente negativo e sostituendo ad  $e$  il suo valore = 2.718

$$I = \left(1 - \frac{1}{2.718}\right) \frac{V_b}{R}$$

Completando i conti

$$I = 0,632 \frac{V_b}{R}$$

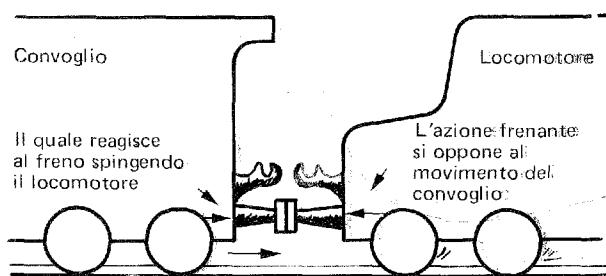
Ed è ciò che volevamo dimostrare

$$I = 63\% \frac{V_b}{R}$$



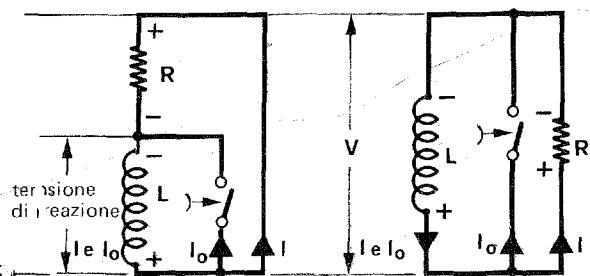
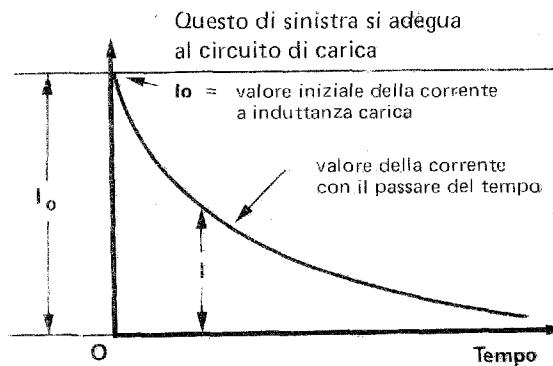
### FENOMENO DELLA SCARICA DI UN INDUTTORE

Per scaricare l'energia cinetica del convoglio lanciato (cioè per fermarlo) supponiamo (per accostarci meglio all'analogia) che soltanto il locomotore sia dotato di freni.



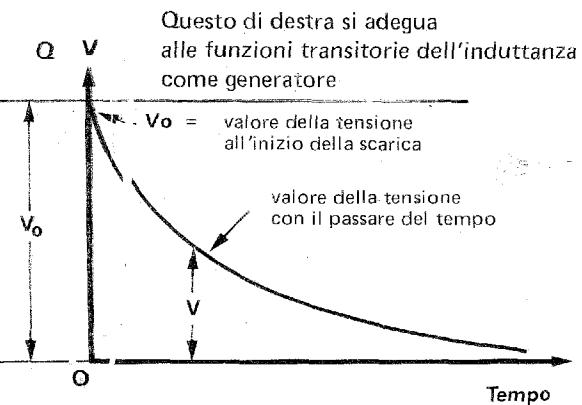
Al momento della frenata agiscono i respingenti (l'azione di traino è invertita), ma la spinta diminuisce man mano che la velocità diminuisce.

La spinta agisce nella direzione del movimento ed è tanto più forte quanto più rapida è la frenata:



Durante la scarica si crea una controtensione che tende ad evitare che la corrente diminuisca. E' l'induttanza ora che funge da generatore.

I due disegni sono funzionalmente identici.



All'inizio si hanno tensione e correnti massime. Poi diminuiscono insieme.

#### Costante di tempo

Valgono gli stessi concetti (vedi 13.24) del fenomeno della carica; ma ATTENZIONE

Dopo un tempo  $t = RC$  la corrente ed anche la tensione sono pari al 36.8% del valore iniziale.

#### Vediamo algebricamente perché

Scriviamo l'espressione del valore della corrente in funzione del passare del tempo.

$$\begin{aligned} &\text{corrente iniziale in ampère} \\ &\text{corrente in ampère in funzione del tempo} \quad I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \\ &\text{resistenza in ohm} \quad R \\ &\text{tempo in secondi} \quad t \\ &\text{induttanza in henry} \quad L \\ &\frac{L}{R} = \text{costante di tempo in secondi} \\ &\text{numero fisso} = 2.718 \end{aligned}$$

Per  $t = \frac{L}{R}$  l'espressione algebrica diventa

Sostituendo i valori e completando i conti

Per la tensione analogamente sostituendo I con V.

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

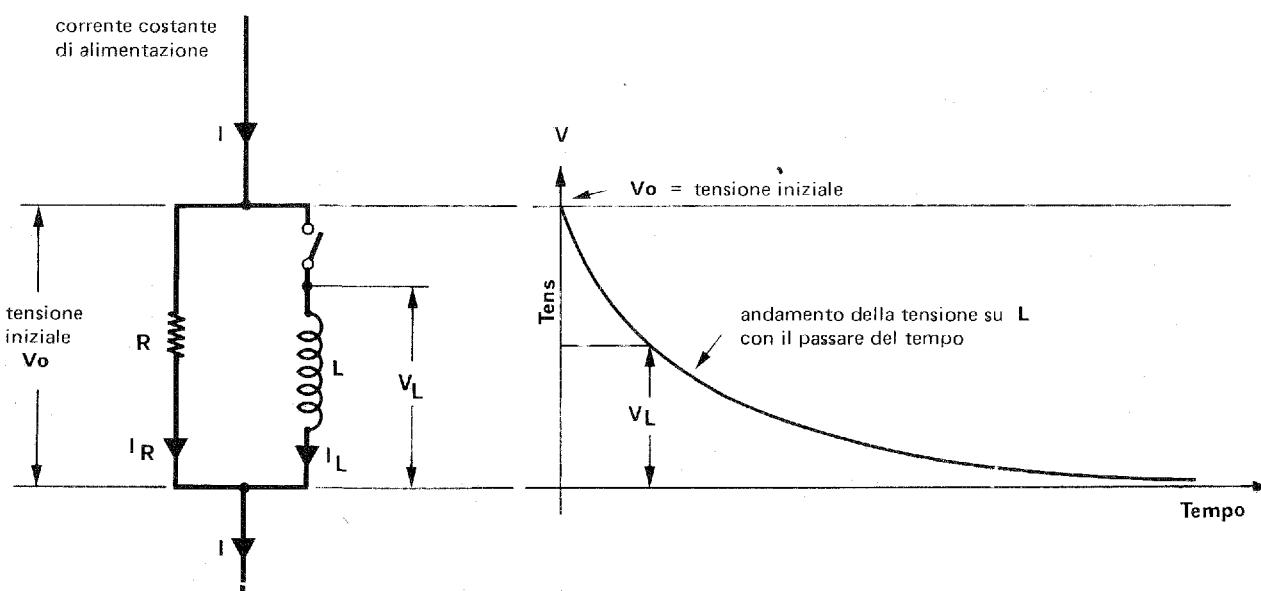
$$I = I_0 \cdot 0.368$$

$$I = 36.8\% I_0$$



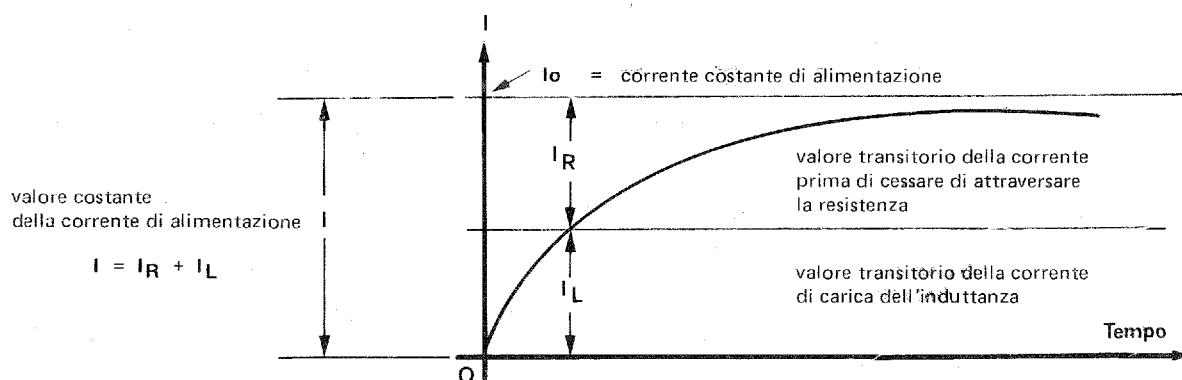
### CARICA DELL'INDUTTORE CON RESISTORE IN PARALLELO

L'alimentazione a corrente costante è meno intuitiva, ma non deve essere meno interessante per comprendere questo fenomeno che è molto importante in elettronica e per inquadrarlo nel principio di reciprocità fra tensione e corrente.



All'istante di chiusura dell'interruttore (inizio della carica):

- la tensione iniziale  $V_0$  resta immutata perché generata dalla induttanza per opporsi alla corrente
- la corrente  $i_L$  che vorrebbe attraversare l'interruttore è zero ( $i_L = 0$ )
- la corrente  $i_R$  che attraversa la resistenza resta immutata



Dopo un certo tempo, teoricamente infinito (fine della carica), si ha:

- l'induttanza è carica con tutta la corrente  $I$  e perciò
- la controtensione  $V_L$  è zero ( $V_L = 0$ ) e perciò ancora
- la corrente che attraversa  $R$  si annulla ( $I_R = 0$ ) in pratica  $L$  ha cortocircuitato  $R$ .

### CARICA DELL'INDUTTORE CON CORRENTE VARIABILE

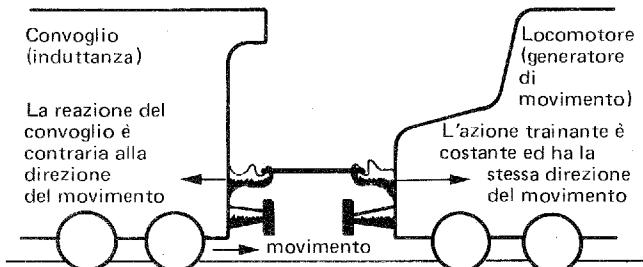
Una volta che si è afferrato il concetto di induttanza espresso al paragrafo 13.2, possiamo esaminare ciò che succede quando l'induttanza viene caricata con corrente che, invece di apparire tutta all'improvviso, viene iniziata gradualmente secondo una determinata legge.

Per semplificare il concetto, immagineremo che la legge con la quale faremo variare nel tempo la corrente sia lineare.  
 Cioè sia  $I = kt$

Torniamo ai soliti paragoni.

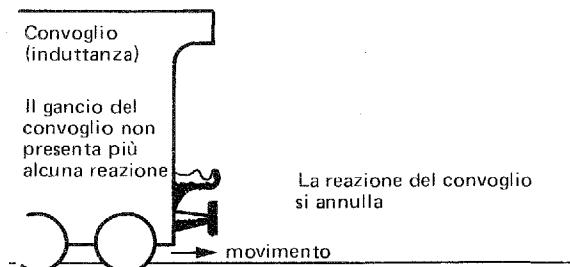
#### Fenomeno ferroviario

Se si traina un convoglio in modo che si provochi un aumento uniforme di velocità, occorre che al gancio si eserciti una forza di traino costante.

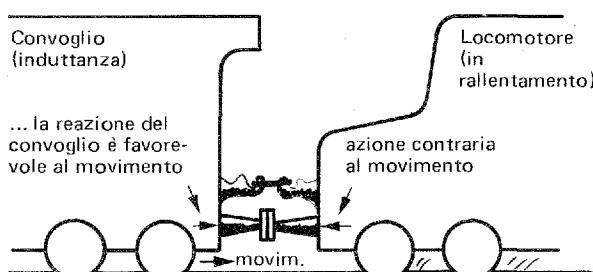


Finché il convoglio continua ad aumentare regolarmente la velocità, è segno che l'azione trainante si mantiene costante.

Se ad un certo momento si toglie il locomotore, la velocità del convoglio cessa di aumentare, cioè si mantiene costante al valore raggiunto al momento del distacco



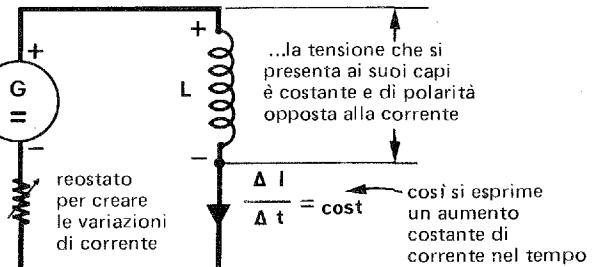
Se infine il locomotore si opponesse al movimento del convoglio in modo da fargli diminuire uniformemente la velocità...



...la reazione sarebbe identica anche se il movimento iniziasse a spinta sul convoglio fermo.

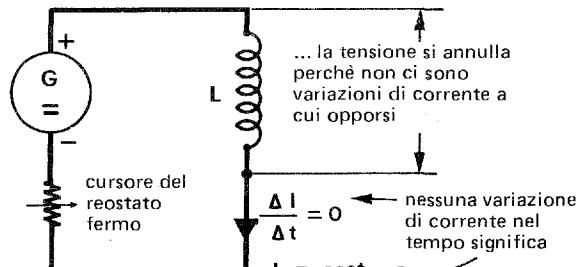
#### Fenomeno elettrico

Se si carica un'induttanza con una corrente uniformemente variabile...

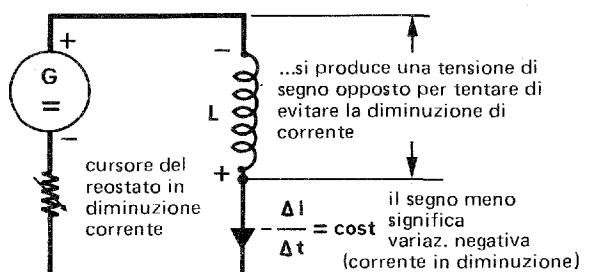


E' indispensabile che la corrente continui ad aumentare regolarmente se si vuole che la tensione si mantenga costante.

Se ad un certo momento non facciamo più aumentare la corrente e la manteniamo fissa ad un certo valore...



Se infine facessimo diminuire uniformemente la corrente nell'induttore...



La tensione sarebbe ugualmente di questo segno, se iniziasse la carica invertendo la polarità del generatore.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice *13.34*

Pagina *2*

Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del Circuito
Paragrafo : 13.3	Induttanza
Argomento : 13.34	Comportamento a regime variabile di corrente

### L'UNITÀ DI MISURA DELL'INDUTTANZA SOTTO L'ASPETTO DINAMICO

Dai fenomeni comparativi esaminati nella pagina precedente è evidente che:

#### Situazione ferroviaria

La forza che si sviluppa al traino come reazione alle variazioni di moto

$$F = -M \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

si oppone alle stesse variazioni di moto  
è proporzionale alla massa inerziale del convoglio  
è proporzionale alla rapidità di variazione della velocità (accelerazione)

Da questa relazione si può ricavare l'inerzia del convoglio (massa)

$$M = - \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta t}}$$

forza di reazione al traino  
conseguente variazione col tempo della velocità  
opposizione fra i due fattori

Questa inerzia in fisica si chiama **massa** e si misura in chilogrammi-massa ( $\text{kgM}$ ).

Si ha un chilogrammo-massa inerziale in un corpo quando ad una azione acceleratrice misurata in metri/sec<sup>2</sup> si contrappone in uguale misura una forza misurata in newton.

#### Situazione elettrica

La tensione che si crea ai morsetti come reazione alle variazioni di corrente

$$V = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

si oppone alla stessa variazione di corrente  
è proporzionale all'induttanza del circuito  
è proporzionale alla rapidità di variazione della corrente

Da questa relazione si può ricavare l'induttanza del circuito

$$L = - \frac{V}{\frac{\Delta I}{\Delta t}}$$

forza di reazione alla variazione di corrente  
variazione con il tempo della corrente  
opposizione fra i due fattori

Questa inerzia in elettrotecnica si chiama **induttanza** e si misura in henry (H).

Si ha un henry di induttanza in un circuito quando ad una variazione di corrente misurata in ampere/sec si contrappone in uguale misura una tensione misurata in volt.

In particolare si ha che:

$$1 \text{ henry} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \frac{\text{ampère}}{\text{secondo}}}$$

In altre parole ancora:

l'induttanza di 1 henry fa creare ai capi del circuito una tensione continua e costante di 1 volt se vi faccio passare una corrente uniformemente variabile in ragione di 1 amp/sec.

**Attenzione:** Le grandezze fisiche non sono omogenee con quelle elettriche: esse sono state messe in paragone solo per la loro sorprendente analogia intuitiva.

**Suggerimento:** Si confronti l'affascinante ed inevitabile identità con quanto descritto a pag. 13.20-2.

**Avvertenza:** Nella relazione  $V = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$  in molti testi non compare il segno meno.

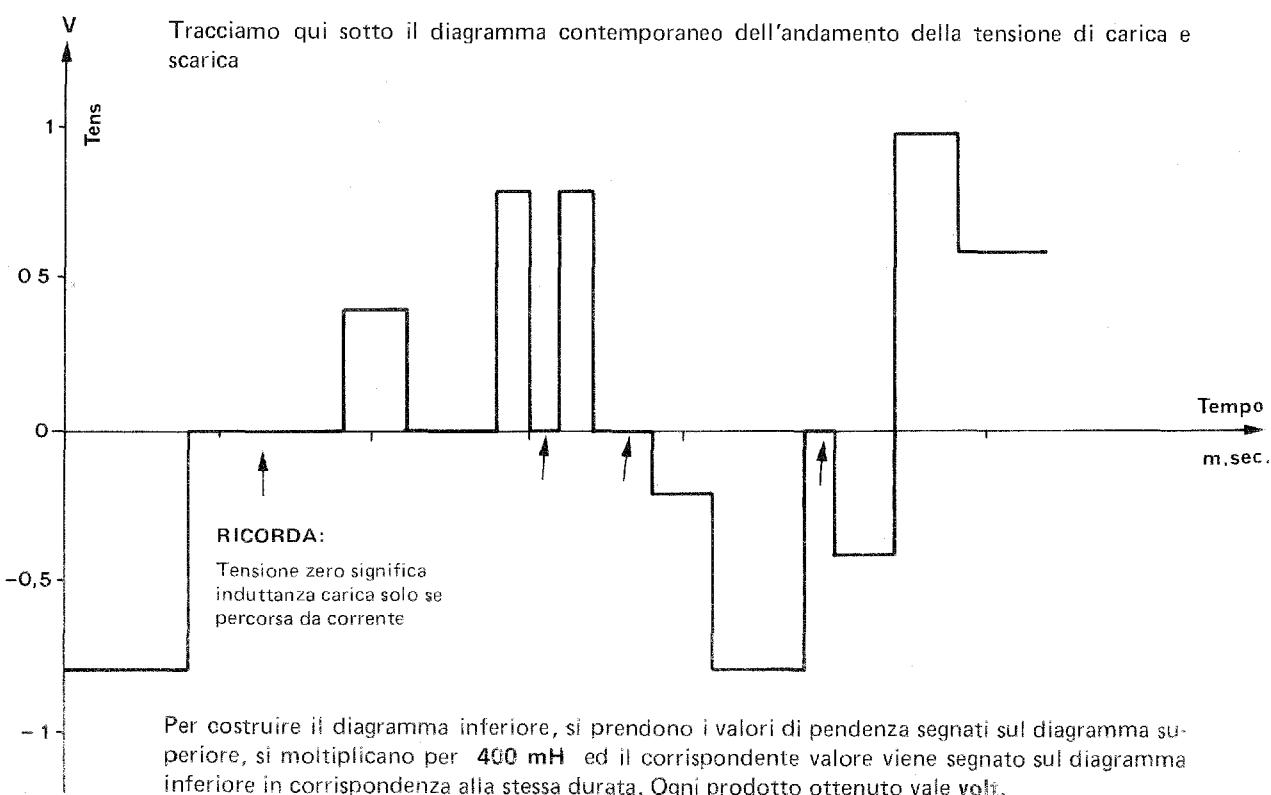
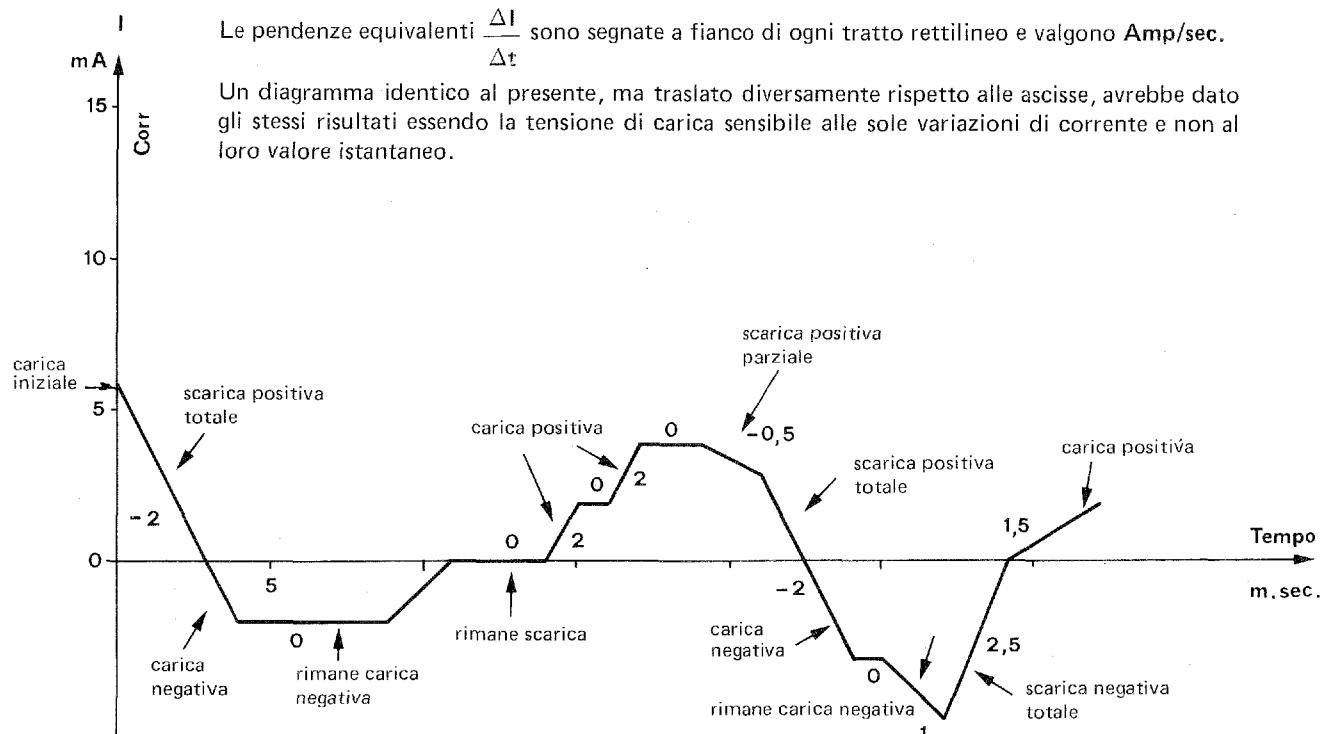
Ciò significa che convenzionalmente si è assunto come positivo il senso della corrente che entra nel polo positivo che si forma sull'induttore.

Anche noi, quando non sarà indispensabile il contrario, spesso trascureremo il segno meno.



### ESEMPIO DI INDUTTORE SOTTOPOSTO A VARIAZIONI LINEARI DI CORRENTE

Dato il seguente diagramma di variazione della corrente attraverso una induttanza di  $400 \text{ mH} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ H}$



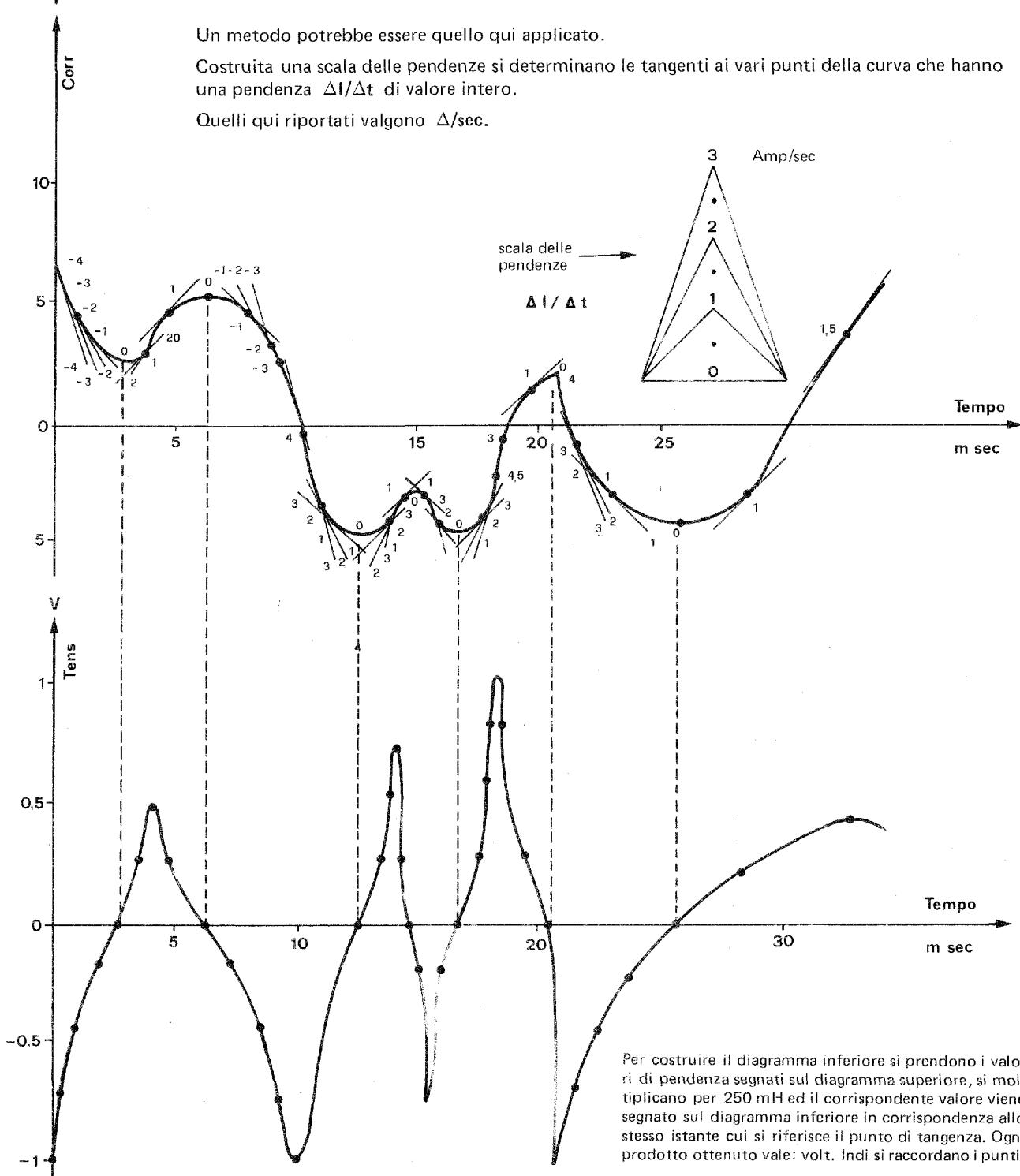


### ESEMPIO DI INDUTTORE SOTTOPOSTO A VARIAZIONI QUALSIASI DI CORRENTE

Dato il seguente diagramma della corrente attraverso una induttanza di  $250 \text{ mH} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

In questo caso gli intervalli di tempo in cui si verifica un determinato valore di  $\Delta I / \Delta t$  sono infinitesimi (istantanei), dato che anche le stesse variazioni cambiano ad ogni istante.

Intervalli di tempo finiti possono essere determinati sulle tangenti dei punti più significativi.



Sezione	:	1	Grandezze Fondamentali
Capitolo	:	13	Parametri del circuito
Paragrafo	:	13.4	Caratteristiche a regime alternato in generale
Argomento	:	13.40	Indice del paragrafo

APPUNTI  
DI ELETTRONICA

Codice	Pagina
13.40	1

## Paragrafo 13.4

# CARATTERISTICHE A REGIME ALTERNATO IN GENERALE

### Indice degli argomenti e delle pagine.

**arg. 13.41 — Resistenza e Conduttanza**

- pag. 1 — Tensione risultante su una resistenza sottoposta a corrente alternata
- pag. 2 — Relazioni matematiche fra tensione e correnti alternate.

**arg. 13.42 — Capacità**

- pag. 1 — Corrente risultante in una capacità sottoposta a tensione alternata
- pag. 2 — Relazioni matematiche fra tensione e correnti alternate.
- pag. 3 — Legge di Ohm — Reattanza capacitiva
- pag. 4 — Reattanza capacitiva — Osservazioni ed esempi.

**arg. 13.43 — Induttanza**

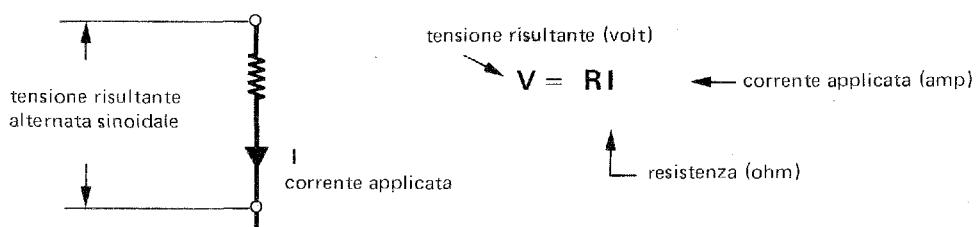
- pag. 1 — Tensione risultante su una induttanza sottoposta a corrente alternata
- pag. 2 — Relazioni matematiche fra corrente e tensione alternata
- pag. 3 — Legge di Ohm — Reattanza induttiva
- pag. 4 — Reattanza induttiva — Osservazioni ed esempi

## TENSIONE RISULTANTE SU UNA RESISTENZA SOTTOPOSTA A CORRENTE ALTERNATA

Il comportamento della resistenza in corrente alternata non è che un caso particolare di comportamento a regime variabile di corrente, il cui sviluppo assume importanza fondamentale in elettronica.

Infatti, quando una resistenza viene sotto-  
posta ad una corrente alternata sinoidale...

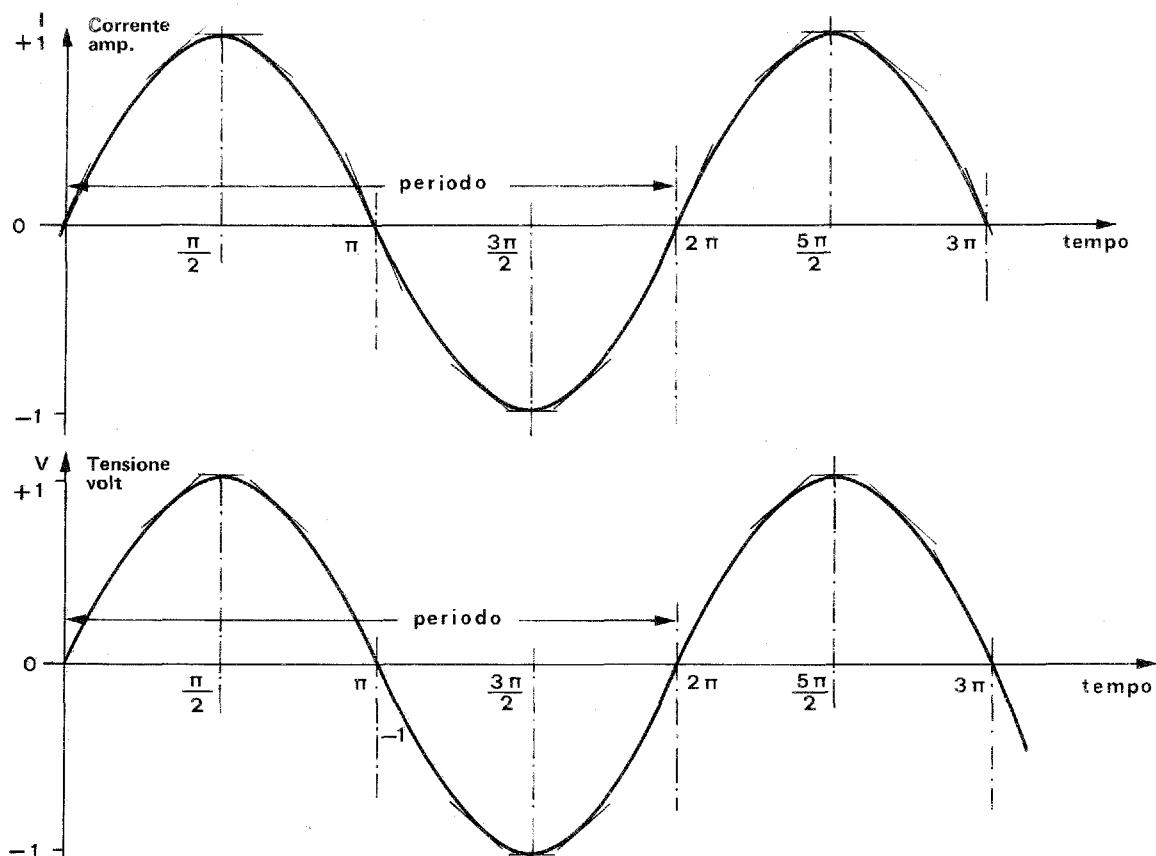
... la tensione che si stabilisce ai capi dell'elemento che la costituisce risponde sempre alla seguente equazione (legge di Ohm: v. 10.21)



In altre parole, il valore della tensione risultante dipende proporzionalmente in ogni istante

- dal valore della resistenza  $R$
- dal valore della corrente  $I$  in quell'istante

Esaminiamo una sonda che rappresenti l'andamento nel tempo di una corrente alternata di ampiezza unitaria (**1A**) applicata ad una resistenza di valore unitario ( **$1\Omega$** ) e studiamo graficamente il corrispondente andamento della tensione risultante



**Conclusione:** L'andamento della tensione è ancora sinoidale, di ampiezza unitaria (**1 V**) e perfettamente in fa-  
se con l'andamento della corrente.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
13.41	2	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.4	Caratteristiche a regime alternato in generale

**RELAZIONI MATEMATICHE FRA TENSIONI E CORRENTI ALTERNATE**

**Resistenza**

Riprendiamo i ragionamenti fatti nella pagina precedente sulla equazione che esprime l'andamento dei valori che la tensione assume in funzione dei valori assunti da una corrente alternata che attraversa una resistenza

In ogni istante è

$$v = RI \quad \begin{array}{l} \text{corrente impressa (volt)} \\ \text{tensione (volt) risultante} \end{array}$$

resistenza (ohm)

Se la corrente  $I$  varia col tempo secondo la seguente legge

$$i = I_M \sin \omega t \quad \begin{array}{l} \text{tempo (sec.)} \\ \text{(variabile indipendente)} \end{array}$$

valore istantaneo della corrente (amp.)

pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)

valore massimo della corrente (amp.)

La tensione risultante sarà

$$v = R I_M \sin \omega t$$

Per la legge di Ohm possiamo chiamare  $V_M$  il prodotto  $R I_M$  cioè

$$V_M = R I_M$$

per cui avremo

$$v = V_M \sin \omega t \quad \begin{array}{l} \text{tempo (sec.)} \\ \text{(variabile indipendente)} \end{array}$$

valore istantaneo della tensione risultante (volt)

pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)

valore massimo della tensione (volt)

Anche in questo modo si conferma essere la tensione risultante di tipo alternato sinusoidale come la corrente che attraversa la resistenza. Inoltre entrambe risultano in fase fra di loro.

**Conduttanza**

Anche per la corrente alternata il fenomeno è reversibile (legge di Ohm).

Infatti riprendiamo l'equazione

$$V = RI$$

e risolviamola rispetto a  $I$ , si avrà

$$I = \frac{1}{R} V \quad \frac{1}{R} = G$$

cioè (10.22)

$$I = GV \quad \begin{array}{l} \text{tensione applicata (volt)} \\ \text{corrente risultante (amp.)} \end{array}$$

conduttanza (siemens)

Se la tensione varia sinusoidalmente,

$$v = V_M \sin \omega t$$

analogamente al calcolo precedente si avrà:

$$i = GV_M \sin \omega t$$

e quindi

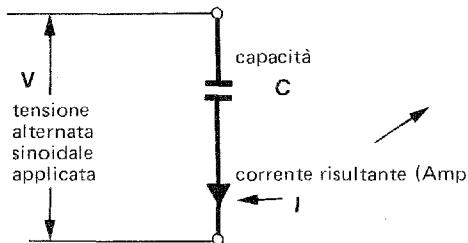
$$i = I_M \sin \omega t$$

## CORRENTE RISULTANTE IN UNA CAPACITÀ SOTTOPOSTA A TENSIONE ALTERNATA

Il comportamento della capacità in corrente alternata non è che un caso particolare di comportamento a regime variabile di tensione, il cui sviluppo assume una importanza fondamentale in elettronica.

Quando infatti una capacità viene sottoposta ad una tensione alternata sinoidale...

... la corrente di carica e scarica che ne deriva risponde sempre alla seguente equazione: (13.24-2)



$$I = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

← variaz. di tens. (V)  
 ← variaz. di tempo (S)

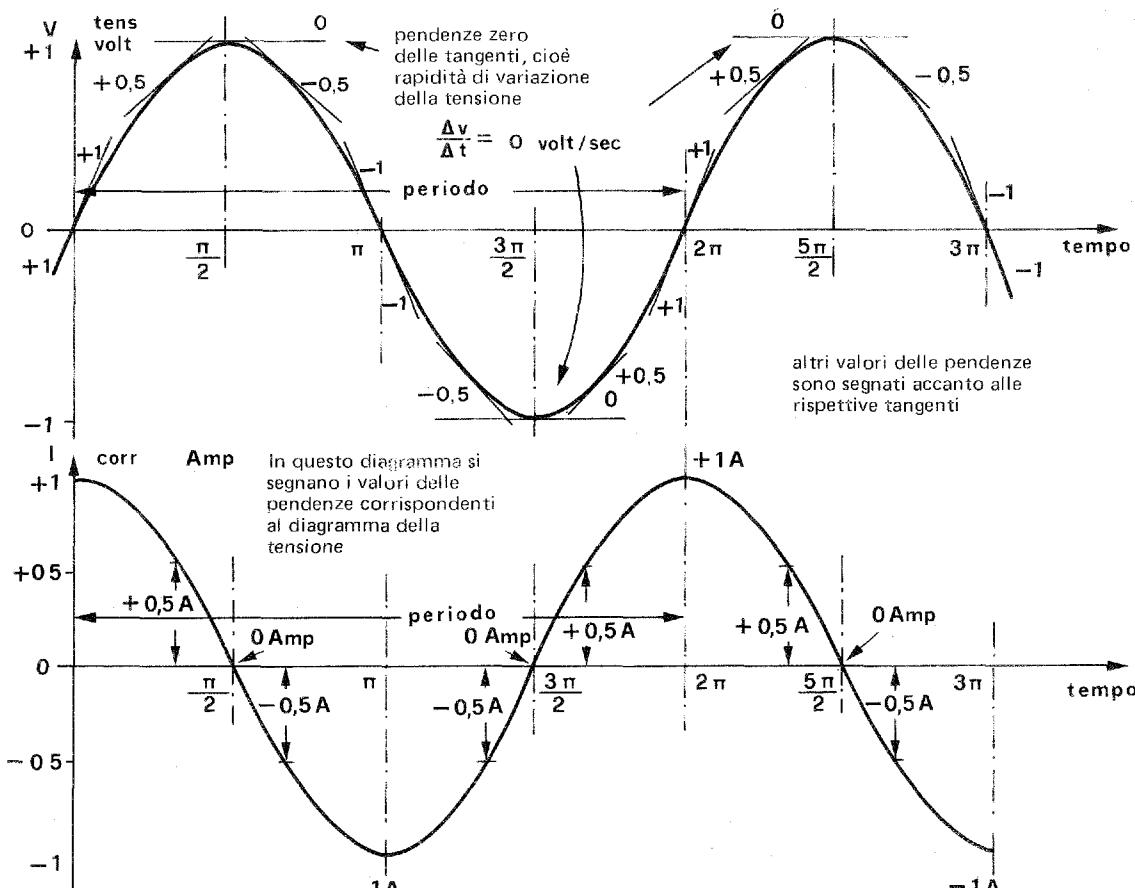
} rapidità di variazione della tensione (volt/sec)

capacità (in farad)

In altre parole, l'intensità della corrente risultante dipende proporzionalmente in ogni istante:

- dal valore della capacità  $C$
- dalla rapidità di variazione della tensione  $\frac{\Delta V}{\Delta t}$  in quell'istante

Esaminiamo una sinoide che rappresenti l'andamento nel tempo di una tensione alternata di ampiezza unitaria (1 V) applicata ad una capacità di valore unitario (1 F) e studiamo graficamente il corrispondente andamento della corrente risultante. (v. 13.24-4).



**Conclusione:** L'andamento della corrente è ancora sinoidale, di ampiezza unitaria (1 A), ma sfasato di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$ ) in anticipo (cosinoide) sull'andamento della tensione.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 13.42

Pagina 2

Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
Capitolo : 13	Parametri dei circuito
Paragrafo : 13.4	Caratteristiche a regime alternato in generale
Argomento : 13.42	Capacità



### RELAZIONI MATEMATICHE FRA TENSIONE E CORRENTI ALTERNATE

Riprendiamo i ragionamenti fatti nella pagina precedente sulla equazione che esprime l'andamento dei valori che la corrente di carica e scarica assume in funzione della rapidità di variazione della tensione.

$$I = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

corrente (Amp)       $\Delta V$  ← variazione di tensione (V)  
 → variazione di tempo (sec)  
 capacità (farad)

} rapidità di variazione della tensione (volt/sec)

Quando la tensione stessa si alterna nel tempo secondo la seguente legge:

$$v = V_M \operatorname{sen} \omega t$$

tensione istantanea (volt) dipendente da t       $V_M$  ← valore massimo della tensione (volt)  
 ← tempo (sec) (variabile indipendente)  
 pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)

#### Determinazione del valore massimo della corrente risultante

Abbiamo visto che il valore massimo della corrente si ha quando la tensione passa per il valore zero, perché in quel punto la inclinazione  $\Delta V/\Delta t$  della tangente alla sinoide è massima.

Con questo esempio grafico vogliamo dimostrare che la intensità della corrente è proporzionale anche:

- al valore della capacità
- all'ampiezza della tensione applicata
- alla frequenza della tensione applicata

Per quanto concerne l'influenza del valore della capacità, la proporzionalità risulta evidente dalla equazione stessa.

Per quanto concerne l'influenza della rapidità di variazione della tensione, essa dipende sia dall'ampiezza che dalla frequenza della tensione stessa.

Si sono paragonate pertanto le inclinazioni delle tangenti all'origine delle sinoidi di frequenza doppia o di ampiezza doppia rispetto a una singola presa come base di riferimento.

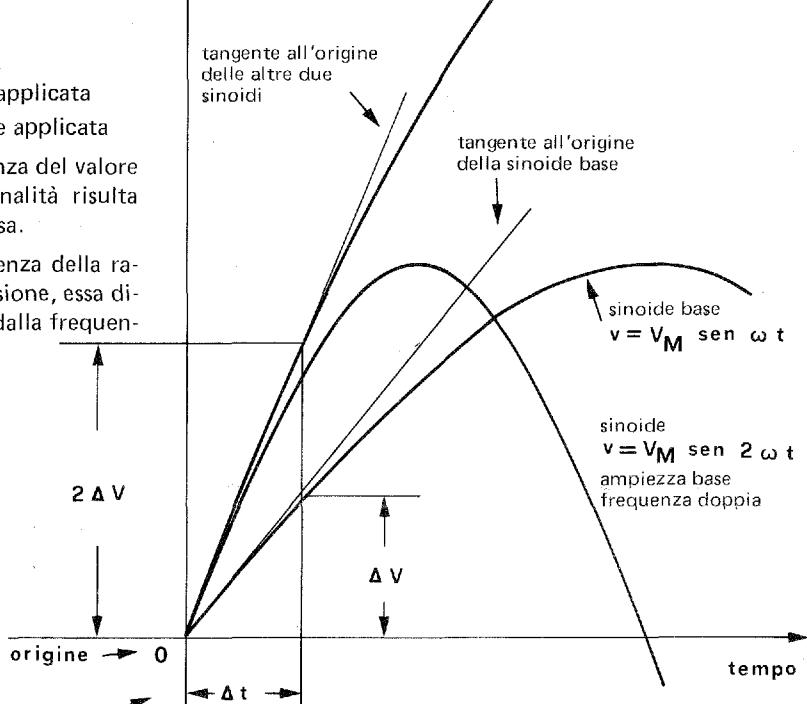
L'inclinazione delle tangenti all'origine delle varie sinoidi, determina il valore massimo delle varie correnti risultanti.

Per uno stesso intervallo di tempo la tangente comune alle due sinoidi, rispettivamente di frequenza doppia e di ampiezza doppia rispetto a quella base, è di inclinazione doppia rispetto alla tangente relativa alla sinoide di riferimento.

Confermato quanto volevamo dimostrare, possiamo scrivere che

$$I_{Mc} = \omega V_M C$$

corrente capacitiva (Amp)       $\omega$  ← pulsazione  $2\pi f$  (rad/sec)  
 ← capacità (farad)  
 ← tensione massima applicata (volt)



## LEGGE DI OHM – REATTANZA CAPACITIVA

Il rapporto

$$\text{si chiama reattanza capacitiva} \rightarrow X_C = \frac{V_M}{I_{Mc}} \quad \begin{array}{l} \text{valore massimo della tensione applicata} \\ \text{valore massimo della corrente risultante capacitiva} \end{array}$$

Come si vede, esso ha le stesse dimensioni di una resistenza e si misura in ohm.

Con il nome **reattanza** ci ricorderemo che:non si opera una dissipazione irriducibile di energia come con la resistenza, ma si opera uno scambio alternativo di energia fra generatore e capacità con sfasamento di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad) fra tensione e corrente.Con l'aggettivo **capacitiva** ricorderemo che (13.42-4):

la corrente risultante di carica e scarica della capacità è in anticipo sulla tensione.

## Relazione fra reattanza, capacità e frequenza (pulsazione)

Poiché in 13.42-2 abbiamo calcolato che la corrente  $I_{Mc} = \omega V_M C$ , possiamo operare una sostituzione nella equazione della reattanza capacitiva, cioè:

$$X_C = \frac{V_M}{I_{Mc}} = \frac{V_M}{\omega V_M C} = \frac{1}{\omega C}$$

Riassumendo:

$$\text{la reattanza capacitiva (in ohm reattivi)} \rightarrow X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \begin{array}{l} \text{è l'inverso di} \\ \text{capacità (in farad)} \\ \text{pulsazione} = 2\pi f \text{ (rad/sec)} \end{array}$$

Osservazioni sugli effetti della proporzionalità inversa

a) Frequenza: Aumentando la frequenza (e quindi la pulsazione  $\omega = 2\pi f$ ) diminuisce la reattanza capacitiva ed inversamente.In particolare, per  $f = 0$  (tensione continua) la reattanza capacitiva è infinita. Infatti, quando si applica una tensione continua ad una capacità, non si riscontra formazione di corrente, salvo un transitorio iniziale di carica o una eventuale presenza di conduzione occulta.

b) Capacità: Aumentando la capacità, diminuisce la reattanza capacitiva ed inversamente.

## Esempi:

a) Valore della reattanza relativa ad una capacità  $C = 2\mu F$  sottoposta ad una frequenza  $f = 12 \text{ k Hz}$ 

$$X_C = \frac{1}{\underbrace{6.28}_{2\pi} \cdot \underbrace{12.10^3}_{\text{Hz}} \cdot \underbrace{2.10^{-6}}_C} = \frac{10^3}{6.28 \cdot 24} = 6,6 \Omega \text{ reattivi}$$

b) Se mi serve una reattanza capacitiva  $X_C = 5 \text{ k } \Omega$  in un circuito dove sia presente una frequenza  $f = 8 \text{ k Hz}$ , quale valore di capacità devo inserire?

Modifico l'espressione della reattanza capacitiva in modo da mettere in evidenza la capacità e procedo nel calcolo:

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{\underbrace{6.28}_{2\pi} \cdot \underbrace{8.10^3}_{\text{Hz}} \cdot \underbrace{5.10^3}_{\Omega}} = \frac{10^{-6}}{6.28 \cdot 40} = 3.8 \text{ nF}$$

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
13.42	4	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.4 Caratteristiche a regime alternato in generale
		Argomento : 13.42 Capacità

### REATTANZA CAPACITIVA – OSSERVAZIONI ED ESEMPI

#### Reattanza capacitiva fra valori efficaci

E' evidente che la **reattanza capacitiva** finora intesa come rapporto fra i valori massimi di tensione e corrente relativi ad una capacità, vale anche come **rapporto fra i valori efficaci di tensione e corrente** dato l'identico coefficiente di proporzionalità fra valori massimi e valori efficaci sia per la tensione che per la corrente (vedi 11.51-1 e 11.61-1).

cioè:

$$X_C = \frac{V}{I}$$

In altre parole

- a) Se moltiplico una corrente massima per una reattanza, ottengo una tensione massima

$$I_M \cdot X_C = V_M$$

- b) Se moltiplico una corrente efficace per una reattanza, ottengo una tensione efficace

$$I \cdot X_C = V$$

#### Esempi

- a) Quale corrente efficace otterrò applicando ad una capacità  $C = 250 \text{ pF}$  una tensione efficace  $V = 12 \text{ mV}$  di frequenza  $f = 5 \text{ MHz}$

#### Calcolo

$$\text{Reattanza } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\frac{6,28}{2\pi} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{\text{Hz}} \cdot 250 \cdot 10^{-12}} = \frac{10^{-6}}{6,28 \cdot 1250} = 127 \Omega \text{ (reattivi)}$$

$$\text{Corrente } I = \frac{V}{X_C} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{127} \text{ (V)} = 94 \mu\text{A}$$

- b) Quale capacità mi occorre in un circuito dove è presente una frequenza  $f = 80 \text{ kHz}$  se voglio che ai suoi capi sia presente una tensione  $V = 200 \text{ V}$  e che sia attraversata da una corrente  $I = 50 \text{ mA}$

#### Calcolo

$$\text{Reattanza } X_C = \frac{V}{I} = \frac{200 \text{ (V)}}{50 \cdot 10^{-3} \text{ (A)}} = K\Omega \text{ (reattivi)}$$

$$\text{Capacità } C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{\frac{6,28}{2\pi} \cdot \frac{80 \cdot 10^3}{\text{Hz}} \cdot \frac{40 \cdot 10^3}{\Omega}} = \frac{10^{-6}}{6,28 \cdot 3200} = 4,98 \text{ pF}$$

- c) per quale frequenza una capacità del valore di  $2 \mu\text{F}$  sottoposta ad una tensione del valore di  $4 \text{ mV}$  mi provoca una corrente del valore di  $5 \mu\text{A}$

#### Calcolo

$$\text{Reattanza } X_C = \frac{V}{I} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-6}} \text{ (V)} = 0,8 \text{ k}\Omega \text{ (reattivi)}$$

$$\text{Pulsazione } \omega = \frac{1}{C X_C} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 10^{-6}}{\text{F}} \cdot \frac{0,8 \cdot 10^3}{\Omega}} = \frac{1}{1,6} = 625 \text{ rad/sec}$$

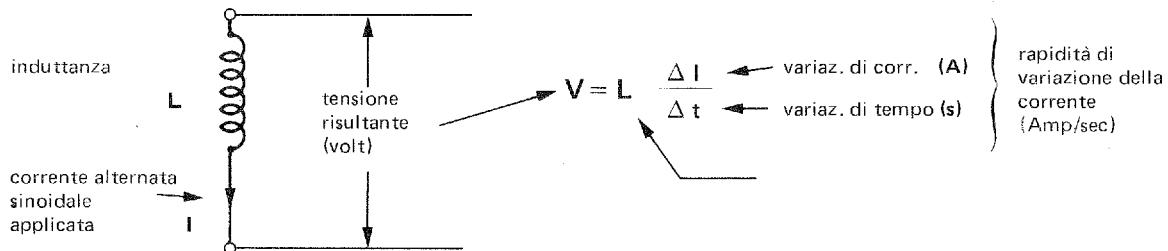
$$\text{Frequenza } f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{625}{6,28} = 99,5 \text{ Hz}$$

### TENSIONE RISULTANTE SU UNA INDUCTTANZA SOTTOPOSTA A CORRENTE ALTERNATA

Il comportamento della induttanza in corrente alternata non è che un caso particolare di comportamento a regime variabile di corrente, il cui sviluppo acquista una importanza fondamentale in elettronica.

Quando infatti una induttanza viene sottoposta ad una corrente alternata sinusoidale...

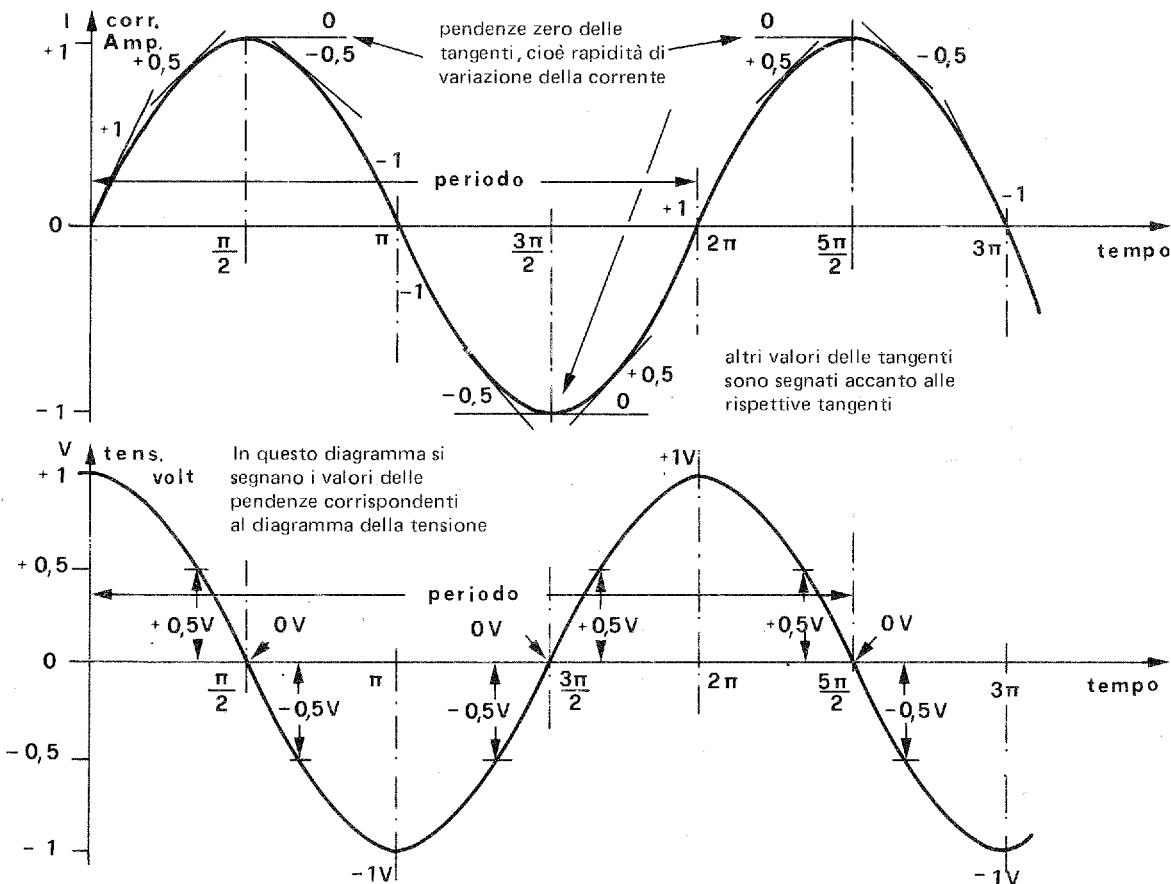
... la tensione di reazione alla carica e scarica che si crea ai suoi capi risponde sempre alla seguente equazione:



In altre parole, l'ampiezza della tensione risultante dipende proporzionalmente in ogni istante:

- dal valore della induttanza  $L$
- dalla rapidità di variazione della corrente  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  in quell'istante

Esaminiamo una sinode che rappresenti l'andamento nel tempo di una corrente alternata di intensità massima unitaria (1A) applicata in una induttanza del valore unitario (1H) e studiamo graficamente il corrispondente andamento della tensione risultante (v. 13.34-4).



**Conclusione:** L'andamento della tensione è ancora sinusoidale, di ampiezza unitaria (1V), ma sfasato di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad) in anticipo (consinuode) sull'andamento della corrente.



### RELAZIONI MATEMATICHE FRA CORRENTE E TENSIONE ALTERNATE

Riprendiamo i ragionamenti fatti nella pagina precedente sulla equazione che esprime l'andamento dei valori che la tensione di reazione alla carica e scarica assume in funzione della rapidità di variazione della corrente:

$$V = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

induttanza (henry)

variazione di corrente (A)      variazione di tempo (sec.)

rapidità di variazione della corrente (Amp/sec.)

quando la corrente stessa si alterna nel tempo secondo la seguente legge:

$$I = I_M \sin \omega t$$

corrente istantanea (Amp) dipendente da t

tempo (sec) (variabile indipendente)  
 pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)  
 valore massimo della corrente (Amp)

#### Determinazione del valore massimo della tensione risultante

Abbiamo visto che il valore massimo della tensione si ha quando la corrente passa per il valore zero, perché in quel punto l'inclinazione  $\Delta I/\Delta t$  della tangente alla sinusoide è massima.

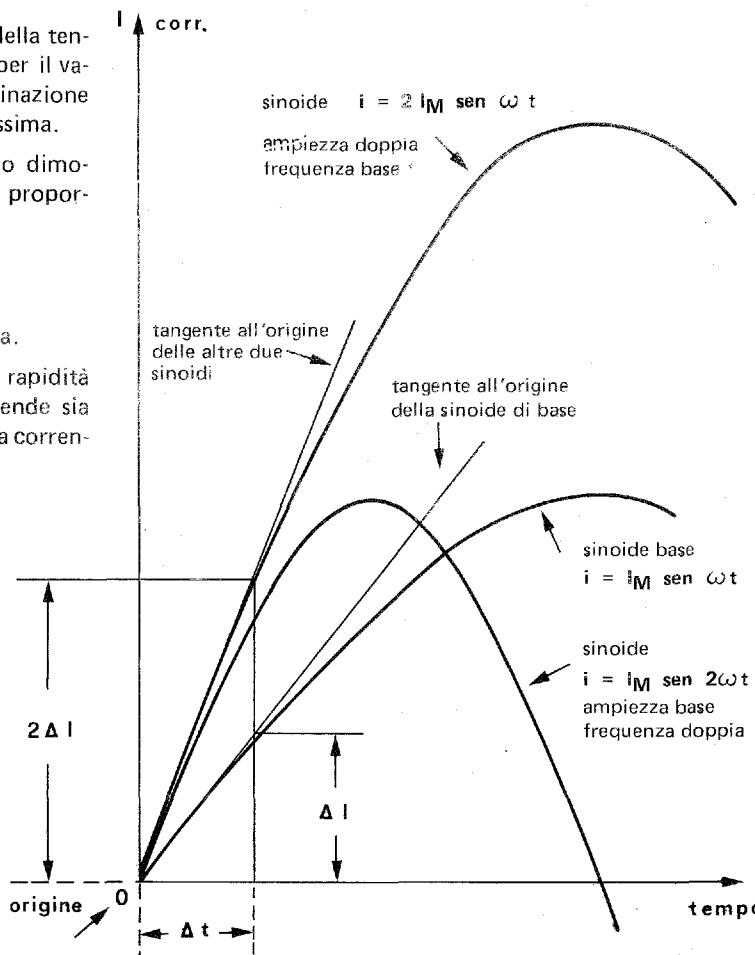
Con questo esempio grafico vogliamo dimostrare che l'ampiezza della tensione è proporzionale anche:

- al valore della induttanza
- alla intensità della corrente applicata
- alla frequenza della corrente applicata.

Per quanto concerne l'influenza della rapidità di variazione della corrente, essa dipende sia dalla intensità che dalla frequenza della corrente stessa.

Si sono paragonate pertanto le inclinazioni delle tangenti alla origine delle sinoidi di frequenza doppia o di ampiezza doppia rispetto ad una sinusoide presa come base di riferimento.

La inclinazione delle tangenti all'origine delle varie sinoidi, determina il valore massimo delle varie tensioni risultanti.



Per uno stesso intervallo di tempo la tangente comune alle due sinoidi, rispettivamente di frequenza doppia e di ampiezza doppia rispetto a quella base, è di inclinazione doppia rispetto alla tangente relativa alla sinusoide di riferimento.

Confermato quanto volevamo dimostrare, possiamo scrivere che:

$$V_{ML} = \omega I_M L$$

tensione induttiva (volt)

induttanza (henry)  
 corrente massima applicata (Amp)  
 pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)

## LEGGE DI OHM – REATTANZA INDUTTIVA

Il rapporto

$$X_L = \frac{V_{ML}}{I_M}$$

si chiama  
reattanza induttiva

valore massimo della tensione risultante induttiva  
valore massimo della corrente applicata

Come si vede, esso ha le stesse dimensioni di una resistenza e si misura in ohm

Col nome **reattanza** ricorderemo che:

non si opera una dissipazione irrecuperabile di energia come con la resistenza, ma si opera uno scambio alternativo di energia fra generatore e induttanza con sfasamento di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad) fra corrente e tensione.

Con l'aggettivo **induttiva** ricorderemo che 13.43-1):

la tensione risultante dalla reazione della induttanza è in anticipo sulla corrente.

## Relazione fra reattanza, induttanza e frequenza (pulsazione)

Poiché in 13.43-2 abbiamo calcolato che la tensione  $V_{ML} = \omega I_M L$  possiamo operare una sostituzione nella equazione della reattanza induttiva.

Cioè

$$X_L = \frac{V_{ML}}{I_M} = \frac{\omega I_M L}{I_M} = \omega L$$

Riassumendo

$$X_L = \omega L$$

la reattanza induttiva (in ohm reattivi)

è proporzionale a  
induttanza (in henry)  
pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)

Osservazioni sugli effetti della proporzionalità diretta.

a) Frequenza: Aumentando la frequenza (e quindi la pulsazione  $\omega = 2\pi f$ ) aumenta la reattanza induttiva ed inversamente. In particolare, per  $f = 0$  (corrente continua) la reattanza induttiva è nulla. Infatti, quando si applica una corrente continua ad una induttanza, non si riscontra formazione di tensione ai suoi capi, salvo un transitorio iniziale di reazione alla carica o una eventuale presenza di resistenza occulta.

b) Induttanza: Aumentando l'induttanza, aumenta la reattanza induttiva e inversamente.

## Esempi

a) Valore della reattanza relativa ad una induttanza  $L = 2 \mu H$

sottoposta ad una frequenza  $f = 12 \text{ kHz}$

$$X_L = \omega L = \frac{6,28}{2\pi} \cdot \frac{12 \cdot 10^3}{\text{Hz}} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\text{H}} = 6,28 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 0,151 \Omega \text{ "reattivi"}$$

b) Valore di induttanza da inserire per avere una reattanza induttiva  $X_L = 5 \text{ k}\Omega$

in un circuito dove sia presente una frequenza  $f = 8 \text{ kHz}$

Modifico l'espressione della reattanza induttiva in modo da mettere in evidenza l'induttanza e procedo nel calcolo

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{5 \cdot 10^3}{6,19 \cdot 8 \cdot 10^3} = \frac{0,625}{6,28} = 99,5 \text{ mH}$$

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
13.43	4	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.4	Caratteristiche a regime alternato in generale
		Argomento : 13.43	Induttanza

**REATTANZA INDUTTIVA — OSSERVAZIONI ED ESEMPI**

**Reattanza induttiva fra valori efficaci**

E' evidente che la **reattanza induttiva** finora intesa come rapporto fra i valori massimi di tensione e corrente relativi ad una induttanza, vale anche come **rapporto fra i valori efficaci di tensione e corrente** dato l'identico coefficiente di proporzionalità fra valori massimi ed efficaci sia per la tensione che per la corrente (vedi 11.51-1 e 11.61-1).

cioè

$$X_L = \frac{V}{I}$$

In altre parole

a) Se moltiplico una corrente massima per una reattanza, ottengo una tensione massima

$$I_M \cdot X_L = V_M$$

b) Se moltiplico una corrente efficace per una reattanza, ottengo una tensione efficace

$$I \cdot X_L = V$$

**Esempi**

a) Quale corrente efficace otterrò, applicando ad una induttanza  $L = 250 \mu\text{H}$

una tensione efficace  $V = 12 \text{ mV}$

di frequenza  $f = 5 \text{ MHz}$

**calcolo**

reattanza  $X_L = \omega L = \frac{6,28 \cdot 5 \cdot 10^6}{2\pi} \cdot \frac{250 \cdot 10^{-6}}{H} = 6,28 \cdot 1250 = 7,81 \text{k}\Omega$  (reattivi)

corrente  $I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{12 \cdot 10^{-3} (\text{V})}{7,81 \cdot 10^3 (\Omega)} = 15,35 \mu\text{A}$

b) Quale induttanza mi occorre in un circuito dove è presente una frequenza  $f = 80 \text{ kHz}$   
se voglio che ai suoi capi sia presente una tensione  $V = 200 \text{ V}$   
e che sia attraversata da una corrente  $I = 50 \text{ mA}$

**calcolo**

reattanza  $X_L = \frac{V_L}{I} = \frac{200 (\text{V})}{50 \cdot 10^{-3} (\text{A})} = 40 \text{k}\Omega$  (reattivi)

induttanza  $L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{40 \cdot 10^3 (\Omega)}{6,28 \cdot 80 \cdot 10^3 (\text{rad/sec})} = \frac{0,5}{6,28} = 79,5 \text{ mH}$

c) Per quale frequenza una induttanza  $L = 2 \mu\text{H}$  sottoposta ad  
una tensione  $V = 4 \text{ mV}$  mi provoca  
una corrente  $I = 5 \mu\text{A}$

**calcolo**

reattanza  $X_L = \frac{V_L}{I} = \frac{4 \cdot 10^{-3} (\text{V})}{5 \cdot 10^{-6} (\text{A})} = 0,8 \text{k}\Omega$  (reattivi)

pulsazione  $\omega = \frac{X_L}{L} = \frac{0,8 \cdot 10^3 (\Omega)}{2 \cdot 10^{-6} (\text{H})} = 400 \text{ M rad/sec}$

frequenza  $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{400 \cdot 10^6 (\text{rad/sec})}{6,28 (\text{rad/ciclo})} = 63,6 \text{ M Hz}$

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze Fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 13	Parametri del circuito
<b>Paragrafo</b>	: 13.5	Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
<b>Argomento</b>	: 13.50	Indice del paragrafo

<b>APPUNTI DI ELETTRONICA</b>	
<b>Codice</b>	<b>Pagina</b>
<b>13.50</b>	<b>1</b>

## Paragrafo 13.5

# CARATTERISTICHE A REGIME ALTERNATO

### GRANDEZZE IN SERIE

#### Indice degli argomenti e delle pagine

- arg. 13.51 — **Resistenza**
  - pag. 1 — Premesse sul concetto di resistenza
  - pag. 2 — Definizione di resistenza
- arg. 13.52 — **Reattanza capacitiva**
  - pag. 1 — Premessa sul concetto di reattanza capacitiva
  - pag. 2 — Definizione di reattanza capacitiva
- arg. 13.53 — **Reattanza induttiva**
  - pag. 1 — Premessa sul concetto di reattanza induttiva
  - pag. 2 — Definizione di reattanza induttiva
- arg. 13.54 — **Composizione di reattanze**
  - pag. 1 — Segno e somma di tensioni reattive
  - pag. 2 — Segno e somma di reattanze
  - pag. 3 — Somma nulla di reattanze — Risonanza
  - pag. 4 — Frequenza di risonanza
- arg. 13.55 — **Impedenza**
  - pag. 1 — Definizione di impedenza
  - pag. 2 — Angolo di sfasamento e modulo dell'impedenza
  - pag. 3 — Composizione vettoriali e circuituali diverse
  - pag. 4 — Rappresentazione del valore delle tensioni in funzione della frequenza
  - pag. 5 — Rappresentazione delle grandezze serie al variare della frequenza
  - pag. 6 — Tabulazione dei calcoli

**Sezione** : 1      Grandezze Fondamentali  
**Capitolo** : 13      Parametri del circuito  
**Paragrafo** : 13.5      Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie  
**Argomento** : 13.51      Resistenza

**Codice**      **Pagina**  
**13.51**      **1**

### **PREMESSE SUL CONCETTO DI RESISTENZA**

Abbiamo visto come tensioni e correnti possono variare mantenendosi proporzionali fra di loro quando interessano una resistenza (10.21).

Abbiamo visto anche come questo concetto di rigida proporzionalità secondo il fattore  $R$  che si chiama appunto resistenza (legge di Ohm) coincida con il concetto di mantenimento in fase della tensione con la corrente, quando si ha a che fare con fenomeni ciclici come sono le grandezze alternate (13.41).

D'ora in poi, per ordinare bene le idee e per non fare confusione nei calcoli, quando diciamo **resistenza** dobbiamo pensare unicamente ad una grandezza caratteristica dei **circuiti serie**, in quanto, al denominatore, comune con le grandezze reattive che seguono in questa trattazione (reattanze), troviamo la corrente, grandezza pure comune agli elementi che si trovano in serie fra di loro.

Questa parola è di uso più comune del suo reciproco, la conduttanza, che è una grandezza caratteristica dei circuiti parallelo (10.61).

I resistori e perfino i conduttori inoltre vengono classificati secondo la loro resistenza e questo purtroppo non contribuisce a schiarire le idee.

Spesso il principiante non concepisce immediatamente la differenza concettuale e trova difficoltà nel fare i calcoli.

Vogliamo avvertire inoltre che la comprensione chiara dei concetti espressi in questo paragrafo e nei successivi eviterà anche di tenere inutilmente a memoria formule di secondaria importanza, che sono sempre derivate da poche espressioni fondamentali.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 13.51

Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
Pagina : 2	Capitolo : 13 Parametri del circuito
	Paragrafo : 13.5 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
	Argomento : 13.51 Resistenza

### DEFINIZIONE DI RESISTENZA

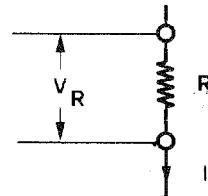
Come abbiamo ripetutamente visto altrove, la resistenza è determinata così:

$$R = \frac{V_R}{I}$$

← tensione in fase risultante ai capi (volt)  
← corrente che attraversa la resistenza (Amp)

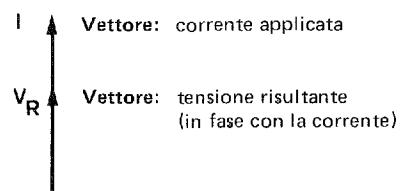
Essa è anche l'inverso della conduttanza (vedi 13.61-2)

$$(ohm) \rightarrow R = \frac{1}{G} \quad \leftarrow (\text{Siemens})$$



#### Rappresentazione vettoriale di tensione e corrente

Poichè la tensione risultante è in fase con la corrente, i due vettori risultano sovrapposti (10.31-2)(10.32-1).



### RESISTENZE IN SERIE

#### Resistenza totale

Il valore di due o più resistenze in serie, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole resistenze (10.32-1).

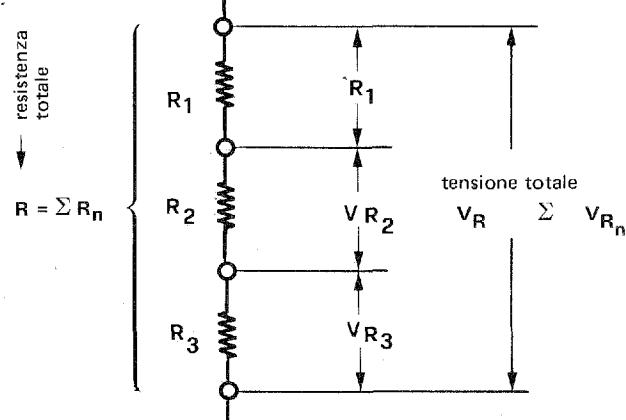
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

#### Tensione totale

Il valore della tensione che si presenta ai capi estremi di due o più resistenze in serie, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole tensioni.

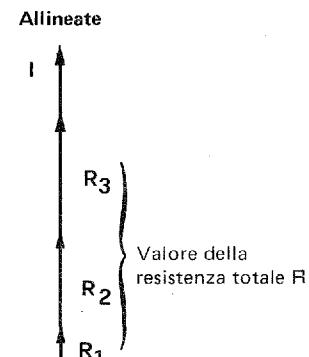
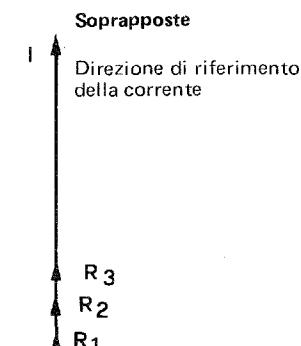
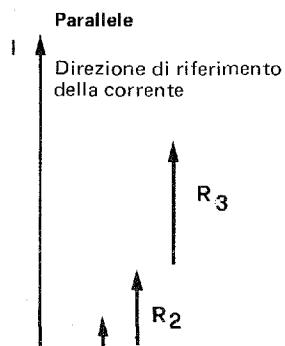
Anche essa sarà in fase con la corrente come le componenti.

$$R = V_{R_1} + V_{R_2} + V_{R_3} + \dots + V_{R_n}$$



#### Rappresentazione vettoriale di resistenze

Poichè le resistenze in serie stanno fra loro come le rispettive tensioni, esse possono essere rappresentate come le tensioni stesse e in vari modi, purchè sempre parallele o sovrapposte alla direzione di riferimento della corrente.



Sezione	:	1	Grandezze Fondamentali
Capitolo	:	13	Parametri del circuito
Paragrafo	:	13.5	Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
Argomento	:	13.52	Reattanza capacitiva

Codice **13.52** Pagina **1**

### PREMESSA SUL CONCETTO DI REATTANZA CAPACITIVA

In precedenza (13.42) abbiamo introdotto il concetto di reattanza capacitiva come rapporto fra i valori massimi (o tra i valori efficaci) della tensione alternata che si forma ai terminali di una capacità rispetto alla corrente alternata di carica e scarica che attraversa i suoi terminali.

Malgrado in ogni medesimo istante i valori di tensione non si mantengano proporzionali ai rispettivi valori di corrente (13.42), abbiamo potuto appurare invece che i valori massimi (o i valori efficaci) si mantengono rigorosamente proporzionali secondo il fattore **Xc** che si è chiamato appunto "reattanza capacitiva".

In questo modo si sono potute assimilare alla legge di Ohm (10.21) per le resistenze, anche le grandezze reattive a frequenza costante, purchè non si dimentichi il fenomeno fondamentale che vede nella reattanza capacitiva la tensione sfasata di  $90^\circ$  in ritardo sulla corrente (13.42).

D'ora in poi, per ordinare bene le idee e per non fare confusioni nei calcoli, quando diciamo **reattanza capacitiva**, dobbiamo pensare unicamente ad una grandezza caratteristica dei **circuiti serie** (v. 13.51-1).

Constaterà il lettore che questa parola è di uso più comune del suo reciproco, la **suscettanza capacitiva** che è una grandezza caratteristica dei circuiti parallelo che vedremo (13.62).

Vale la pena di ricordare comunque che i condensatori non possono essere classificati secondo il valore della loro reattanza capacitiva perchè questa, per un dato valore di capacità, dipende unicamente dalla frequenza dell'energia elettrica alternata cui il condensatore stesso verrà sottoposto.

Spesso il principiante non concepisce immediatamente la differenza concettuale e trova difficoltà nel fare i calcoli.

Vogliamo avvertire inoltre che la comprensione chiara dei concetti espressi in questo paragrafo e nei successivi eviterà anche di tenere inutilmente a memoria formule di secondaria importanza, che sono sempre derivate da poche espressioni fondamentali.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze Fondamentali
13.52	2	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.5 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
		Argomento : 13.52 Reattanza capacitiva

### DEFINIZIONE DI REATTANZA CAPACITIVA

Come abbiamo ripetutamente visto (13.42), la reattanza capacitiva è determinata così:

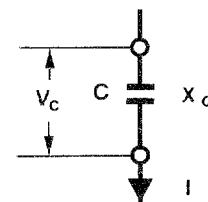
$$\text{reattanza capacitiva } \rightarrow \quad X_C = \frac{V_C}{I} \quad \begin{array}{l} \text{tensione in ritardo di } 90^\circ \text{ rispetto alla} \\ (\Omega \text{ reattivi}) \end{array}$$

Essa è anche l'inverso della suscettanza capacitiva (vedi)

$$(\text{ohm}) \quad X_C = \frac{1}{B_C} \quad (\text{siemens})$$

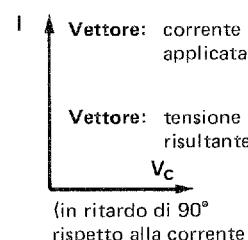
Essa dipende anche dalla capacità e dalla frequenza:

$$(\text{ohm}) \quad X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \begin{array}{l} \text{(farad)} \\ (2\pi f) \end{array}$$



### Rappresentazione vettoriale di tensione e corrente

Poiché la tensione risultante è in ritardo di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad) rispetto alla corrente, la rappresentazione vettoriale è questa (10.32-1) (10.42-1)



### REATTANZE CAPACITIVE IN SERIE

#### Reattanza capacitiva totale

Il valore totale di due o più reattanze capacitive in serie, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole reattanze capacitive.

$$X_C = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \dots + X_{Cn}$$

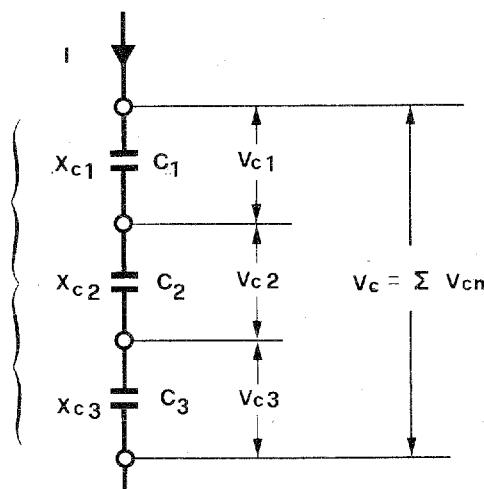
#### Tensione capacitiva totale

$$X_C = \sum X_{Cn}$$

Il valore totale della tensione che si presenta ai capi estremi di due o più reattanze capacitive in serie corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole tensioni capacitive.

Anche essa sarà sfasata in ritardo di  $90^\circ$  rispetto alla corrente, come le componenti.

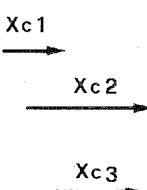
$$V_C = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + \dots + V_{Cn}$$



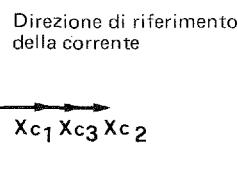
#### Rappresentazione vettoriale di più reattanze capacitive

Poiché le reattanze capacitive in serie stanno fra loro come le rispettive tensioni, esse possono essere rappresentate come le tensioni stesse e in vari modi, purché sempre sfocate di  $90^\circ$  in ritardo rispetto alla direzione di riferimento della corrente.

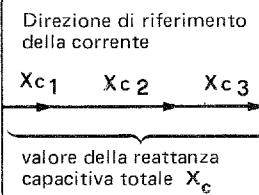
##### Parallele fra loro



##### Sovraposte



##### Allineate



Sezione : 1 Grandezze Fondamentali  
Capitolo : 13 Parametri del circuito  
Paragrafo : 13.5 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie  
Argomento : 13.53 Reattanza induttiva

Codice Pagina  
**13.53** **1**

### PREMESSA SUL CONCETTO DI REATTANZA INDUTTIVA

In precedenza (13.43) abbiamo introdotto il concetto di reattanza induttiva come rapporto fra i valori massimi (o fra i valori efficaci) della tensione di reazione che si forma ai terminali di una induttanza rispetto ad una corrente alternata che l'attraversa.

Malgrado in ogni medesimo istante i valori di tensione non si mantengano proporzionali ai rispettivi valori di corrente (13.43), abbiamo potuto appurare invece che i valori massimi (o i valori efficaci) si mantengano rigorosamente proporzionali secondo il fattore  $X_L$  che si è chiamato appunto "reattanza induttiva".

In questo modo si sono potute assimilare alla legge di Ohm anche le grandezze reattive a frequenza costante, purché non si dimentichi il fenomeno fondamentale che vede nella reattanza induttiva la tensione sfasata di  $90^\circ$  in anticipo sulla corrente. (13.43).

D'ora in poi, per ordinare bene le idee e per non fare confusioni nei calcoli, quando diciamo **reattanza induttiva**, dobbiamo pensare unicamente ad una grandezza caratteristica dei **circuiti serie** (v. 13.51-1).

Constaterà il lettore che questa parola è di uso più comune del suo reciproco, la **suscettanza induttiva** è una grandezza caratteristica dei circuiti parallelo come vedremo (13.63).

Vale la pena di ricordare comunque che gli induttori non possono essere classificati secondo il valore della loro reattanza induttiva perché questo per un dato valore di induttanza dipende unicamente dalla frequenza della energia elettrica alternata cui l'induttore stesso verrà sottoposto.

Spesso il principiante non concepisce immediatamente la differenza concettuale e trova difficoltà nel fare i calcoli.

Vogliamo avvertire inoltre che la comprensione chiara dei concetti espressi in questo paragrafo e nei successivi eviterà anche di tenere inutilmente a memoria formule di secondaria importanza, che sono sempre derivate da poche espressioni fondamentali.

# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
13.53	2	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.5	Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie

Argomento : 13.53 Reattanza induttiva

## DEFINIZIONE DI REATTANZA INDUTTIVA

Come abbiamo visto (13.43), la reattanza induttiva è determinata così:

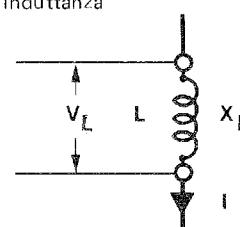
$$\text{reattanza induttiva } \rightarrow X_L = \frac{V_L}{I} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{tensione in anticipo di } 90^\circ \text{ rispetto alla} \\ (\Omega \text{ reattivi}) \qquad \qquad \qquad \leftarrow \text{corrente che attraversa l'induttanza} \end{array}$$

Essa è anche l'inverso della suscettanza induttiva (vedi)

Essa dipende anche dalla induttanza e dalla frequenza

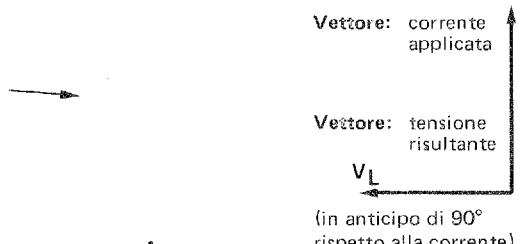
$$(\text{ohm}) \rightarrow X_L = \frac{1}{B_L} \quad \begin{array}{l} \leftarrow (\text{siemens}) \end{array}$$

$$(\text{ohm}) \rightarrow X_L = \omega L \quad \begin{array}{l} \leftarrow (\text{henry}) \\ (2\pi f) \end{array}$$



### Rappresentazione vettoriale di tensione e corrente

Poiché la tensione risultante è in anticipo di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad) rispetto alla corrente, la rappresentazione vettoriale è questa (10.32-1) (10.43-1)

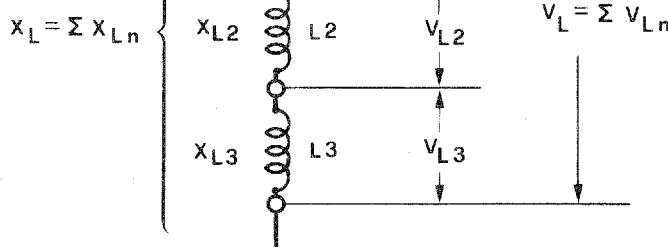


## REATTANZE INDUTTIVE IN SERIE

### Reattanza induttiva totale

Il valore totale di due o più reattanze induttive in serie, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole reattanze induttive.

$$X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \dots + X_{Ln}$$



### Tensione induttiva totale

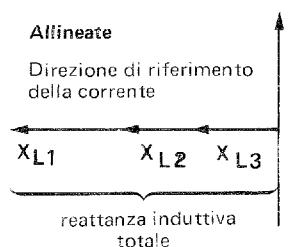
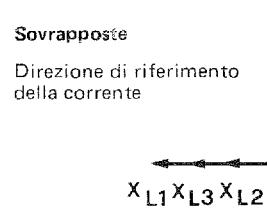
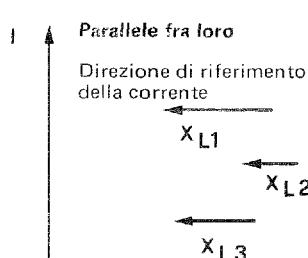
Il valore totale della tensione che si presenta ai capi estremi di due o più reattanze induttive in serie, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole tensioni induttive.

Anch'essa sarà sfasata in anticipo di  $90^\circ$  rispetto alla corrente, come le componenti.

$$V_L = V_{L1} + V_{L2} + V_{L3} + \dots + V_{Ln}$$

### Rappresentazione vettoriale di più reattanze induttive

Poiché le reattanze induttive in serie stanno fra loro come le rispettive tensioni, esse possono essere rappresentate come le tensioni stesse e in vari modi, ma sempre sfuse di  $90^\circ$  in anticipo rispetto alla direzione di riferimento della corrente.



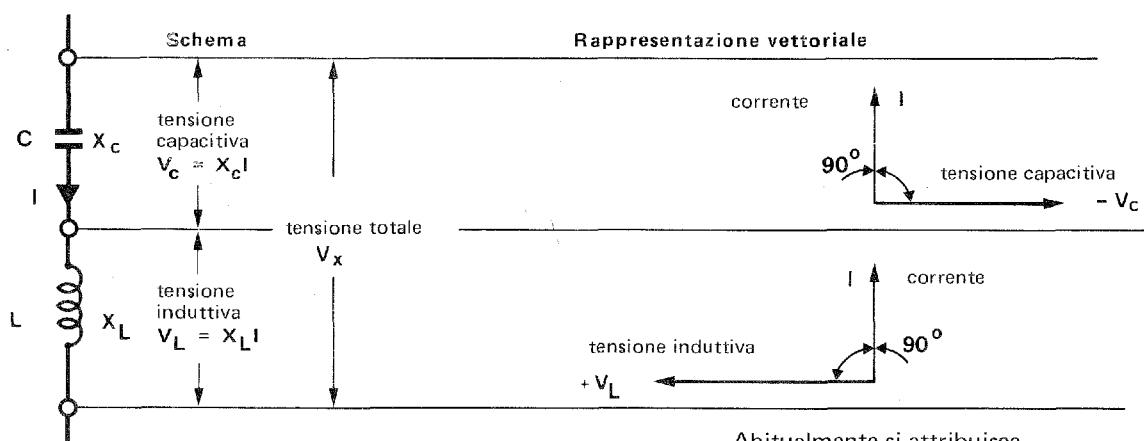
### SEGO E SOMME DI TENSIONI REATTIVE

Si abbiano, collegate in serie, una reattanza induttiva ed una reattanza capacitiva.

Esse sono attraversate dalla medesima corrente, mentre le rispettive tensioni hanno, ciascuna, sfasamento di  $90^\circ$  opposto, rispetto alla direzione della corrente stessa.

Ciò significa che le due tensioni sono allineate, ma hanno direzioni opposte.

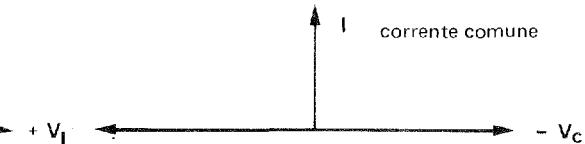
Pertanto, a ciascuna tensione si può attribuire un segno algebrico e quindi la somma di due tensioni in opposizione di fase sarà algebrica.



Abitualmente si attribuisce

- il segno negativo alla tensione capacitativa
- ↔ il segno positivo alla tensione induttiva

La rappresentazione vettoriale delle due tensioni rispetto alla corrente, può essere sintetizzata in questo modo



Molti autori preferiscono disegnare in orizzontale la direzione della corrente di riferimento ed in questo modo ci uniformeremo nel grafico seguente.

#### Rappresentazione vettoriale della tensione reattiva totale

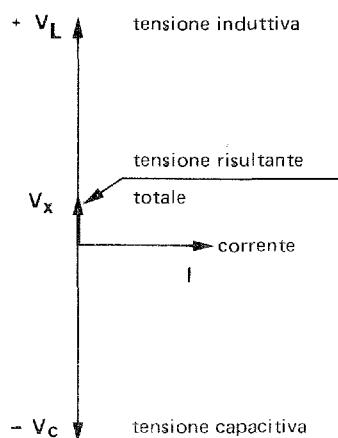
La somma algebrica delle due tensioni, che, in modulo, equivale alla loro differenza, corrisponde al valore della tensione totale che si verifica agli estremi liberi del circuito.

Questa tensione reattiva risultante sarà di tipo capacitivo o induttivo (cioè negativa o positiva) a seconda di quale delle due grandezze prevale.

Nell'esempio qui a fianco prevale la tensione induttiva.

Algebricamente l'espressione è la seguente:

$$V_x = V_L - V_c$$



**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice 13.54

Pagina 2

Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.5	Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
Argomento : 13.54	Composizione di reattanze

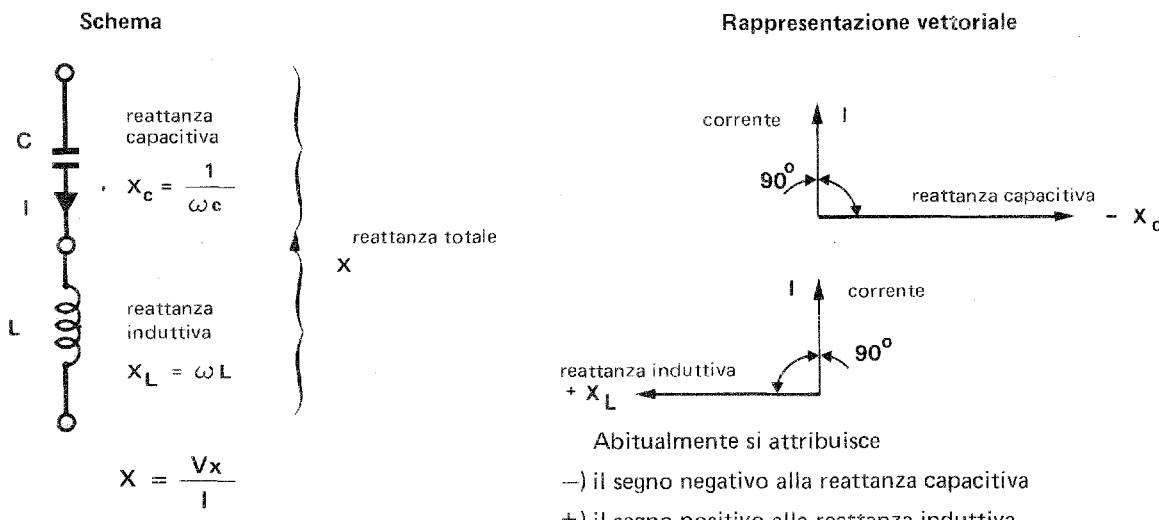
### SEGO E SOMMA DI REATTANZE

Poichè, come abbiamo già visto, anche le reattanze sono grandezze vettoriali rispetto ad una grandezza comune (la corrente), esse possono sommarsi vettorialmente come le rispettive tensioni.

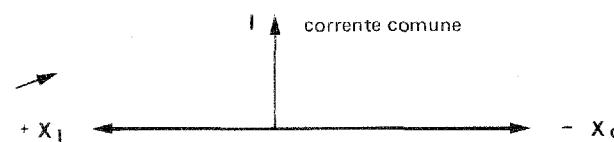
Perciò anche i vettori che rappresentano la reattanza capacitiva e la reattanza induttiva, saranno rappresentati da parti opposte sfasati di  $90^\circ$  rispetto alla direzione del vettore che rappresenta la corrente.

Ciò significa che le due reattanze sono allineate, ma hanno direzioni opposte.

Pertanto a ciascuna reattanza si può attribuire un segno algebrico e quindi la somma di due reattanze in opposizione di fase sarà algebrica.



La rappresentazione vettoriale delle due reattanze, rispetto alla corrente, può essere sintetizzata in questo modo.



Molti autori preferiscono disegnare in orizzontale la direzione delle correnti di riferimento e nel grafico seguente ci uniformiamo senz'altro.

### Rappresentazione vettoriale della reattanza totale

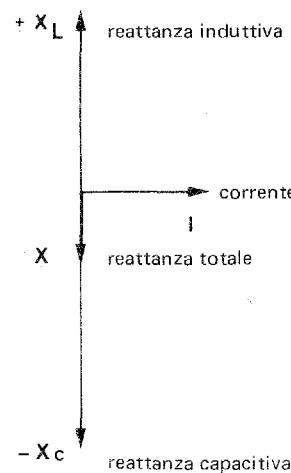
La somma algebrica delle due reattanze che, in modulo, equivale alla loro differenza, corrisponde al valore della reattanza totale che si verifica agli estremi liberi del circuito.

Questa reattanza totale sarà di tipo capacitivo o induttivo (cioè negativa o positiva) a seconda di quale delle due grandezze prevale.

Nell'esempio qui a fianco prevale la reattanza capacitativa.

Algebricamente l'espressione è la seguente:

$$X = X_L - X_C$$



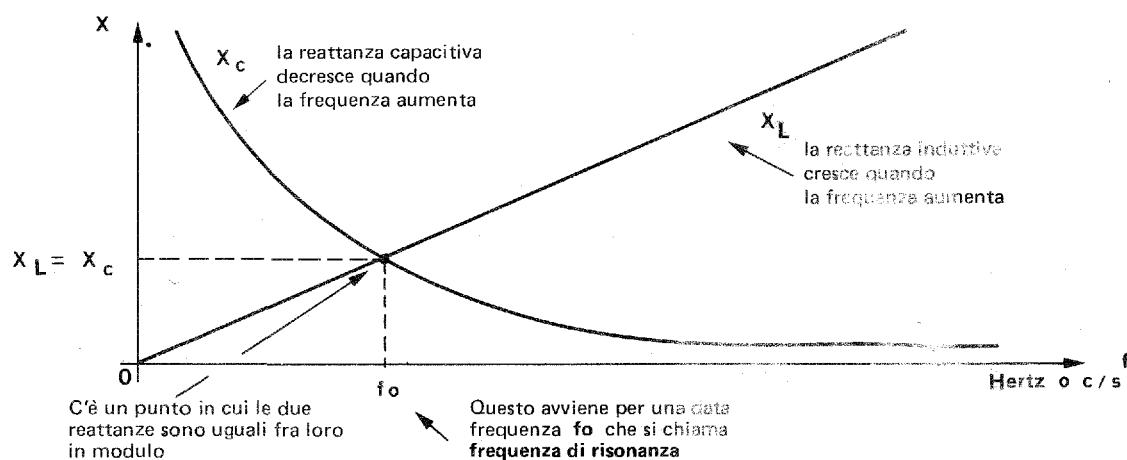
## SOMMA NULLA DI REATTANZE. RISONANZA

Abbiamo visto quanto segue; in valore assoluto.

$$\text{reattanza capacitiva (ohm)} \rightarrow X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{capacità (farad)} \\ \text{pulsazione} = 2\pi f \text{ (rad/sec)} \end{matrix}$$

$$\text{reattanza induttiva (ohm)} \rightarrow X_L = \omega L \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{induttanza (henry)} \end{matrix}$$

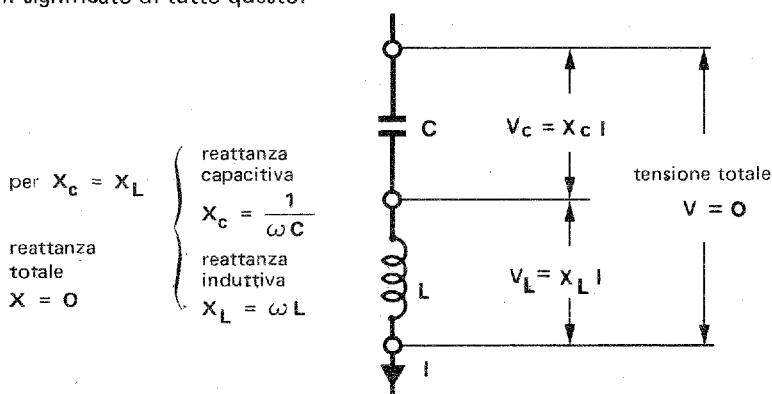
Rappresentiamo graficamente i valori delle due reattanze in funzione della frequenza (valori assoluti)



Anche se uguali fra loro in modulo, le due reattanze hanno vettorialmente direzioni opposte; cioè le tensioni che si formano ai loro capi sono in opposizione di fase fra loro.

La somma di due siffatte reattanze è uguale a zero, così come è uguale a zero in ogni istante la somma delle tensioni ai loro capi.

Vediamo il significato di tutto questo.



**Nota** La tensione totale è uguale a zero anche se passa corrente nel circuito, mentre le due tensioni capacitive e induttive hanno un valore ben definito.

**Avvertenza** Bisogna fare bene attenzione quando si alimenta con una tensione alternata un circuito serie in risonanza perché, non potendosi generare ai suoi capi una tensione uguale a quella di alimentazione, esso si comporta come un corto circuito con aumento infinito della corrente e con conseguenze che dipendono dalle potenze in gioco.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice **13.54** Pagina **4**

Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.5	Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
Argomento : 13.54	Composizione di reattanze

### FREQUENZA DI RISONANZA

Conoscendo la capacità **C** (farad) e l'induttanza **L** (henry), è possibile determinare per quale frequenza **f** (hertz) il circuito serie, comprendente le due grandezze, entra in risonanza

Essendo

$$\left. \begin{array}{l} \text{la reattanza capacitiva } X_C = \frac{1}{\omega C} \\ \text{la reattanza induttiva } X_L = \omega L \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{l'uguaglianza } X_C = X_L \text{ delle reattanze} \\ \text{porta alla uguaglianza corrispondente} \\ \frac{1}{\omega C} = \omega L \end{array}$$

Sviluppando si ha

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

da cui

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Essendo inoltre  $\omega = 2\pi f$  e sostituendo, si ha

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Questa relazione è identica a quella descritta per il circuito parallelo (vedi 13.81-1).

Ciò significa che le due grandezze risuonano, sia se collegate in serie, sia se collegate in parallelo.

### Altri problemi

Lo sviluppo della relazione tra frequenza, capacità e induttanza, permette la soluzione di altri analoghi problemi.

a) conoscendo la capacità **C** (farad) e la frequenza **f** (hertz), si può calcolare il valore della induttanza serie che manda in risonanza il circuito stesso.

Esso sarà

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

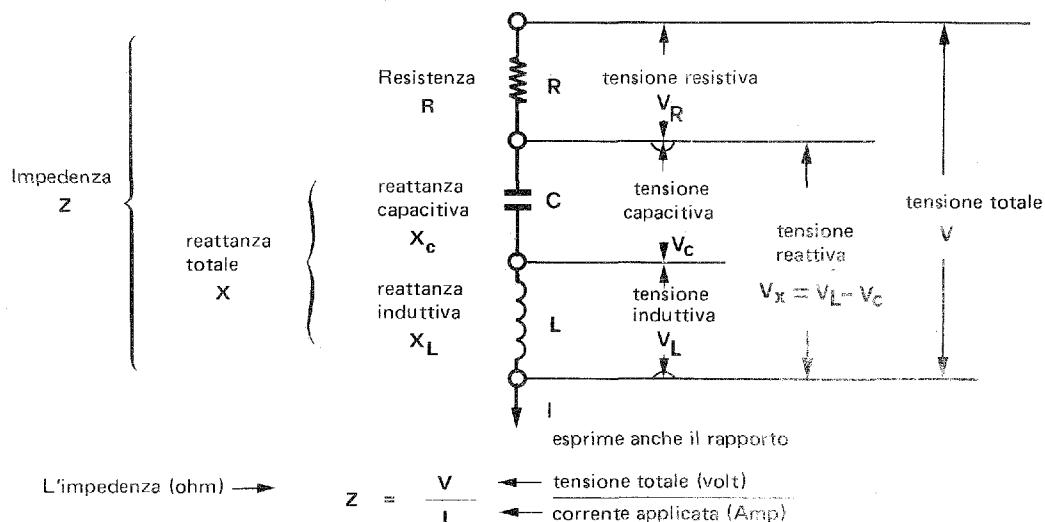
b) conoscendo l'induttanza **L** (henry) e la frequenza **f** (hertz), si può calcolare il valore della capacità serie che manda in risonanza il circuito stesso.

Esso sarà

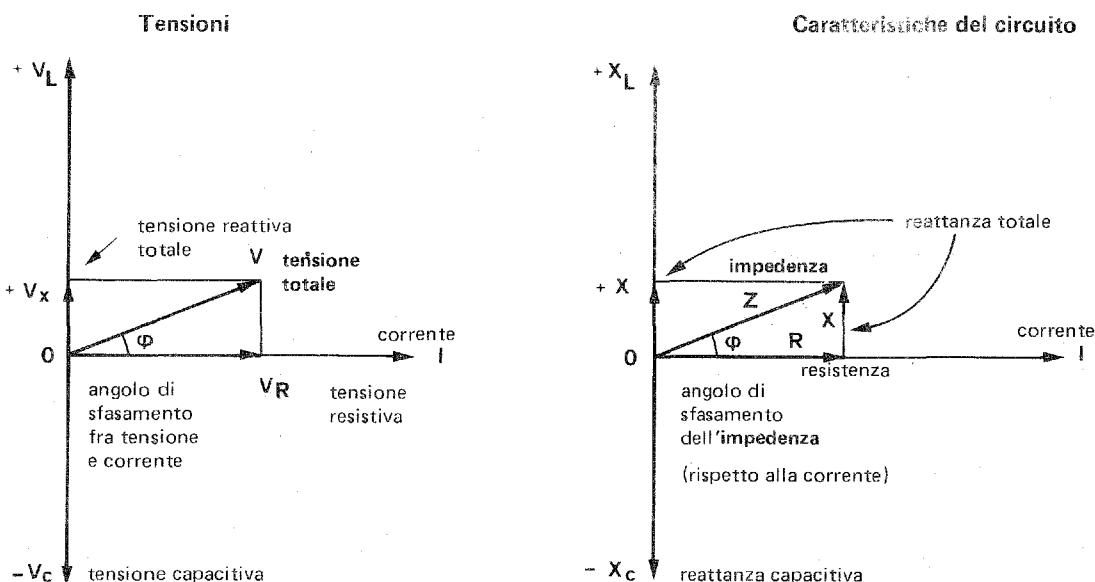
$$C = \frac{1}{\omega^2 L}$$

### DEFINIZIONE DI IMPEDENZA

Quando una resistenza si trova in serie ad una o più reattanze, si ottiene una impedenza



#### Rappresentazioni vettoriali



#### Definizione generale

Si chiama **impedenza** di un circuito il rapporto fra la tensione ai capi di un dispositivo o di un circuito e la corrente che lo

$$Z = \frac{V}{I}$$

Questo valore non può da solo definire l'impedenza, se non è associato all'**angolo di sfasamento** fra tensione e corrente

$$\varphi = \arctg \frac{V_x}{V_R} = \arctg \frac{X}{R}$$

In altre parole, è l'angolo espresso dalla pendenza di un lato (impedenza) rispetto all'altro (corrente o resistenza) qui in orizzontale.

La pendenza è determinata dal rapporto  $\tan \varphi = \frac{V_x}{V_R}$  o dall'ugual rapporto  $\tan \varphi = \frac{X}{R}$

L'impedenza è anche l'inverso dell'ammettenza (vedi 13.65)  $Z = \frac{1}{Y}$

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze Fondamentali
13.55	2	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.5 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
		Argomento : 13.55 Impedenza

### ANGOLO DI SFASAMENTO E MODULO DELL'IMPEDENZA

#### Angolo di sfasamento

Come già visto, la definizione del solo modulo

$$\text{Impedenza } (\Omega) \rightarrow Z = \frac{V}{I} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{tensione (V)} \\ \leftarrow \text{corrente (A)} \end{matrix}$$

non è sufficiente a definire l'impedenza.

Infatti, ci sono infiniti angoli di sfasamento cui compete lo stesso modulo (v. figura).

Pertanto è indispensabile che al valore del modulo sia associato l'angolo di sfasamento fra tensione e corrente.

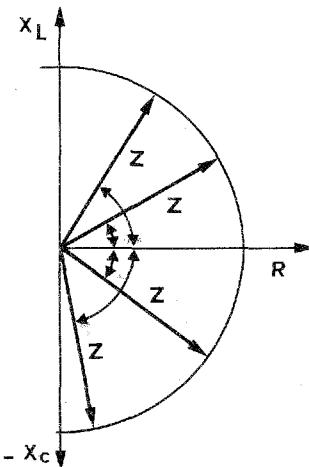
Poiché l'impedenza consta di due grandezze vettoriali fra loro ortogonali:

la reattanza  $X$

la resistenza  $R$

l'angolo di sfasamento può essere determinato da una delle seguenti funzioni trigonometriche:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}$$



#### Modulo

Conoscendo l'angolo di sfasamento, si possono determinare le grandezze vettoriali che formano l'impedenza stessa. Infatti:

$$\text{la reattanza } X = Z \sin \varphi$$

$$\text{la resistenza } R = Z \cos \varphi$$

Conoscendo inoltre

$$\text{la reattanza } X$$

$$\text{la resistenza } R$$

è possibile determinare il modulo della

$$\text{impedenza } Z$$

anche mediante il teorema di Pitagora

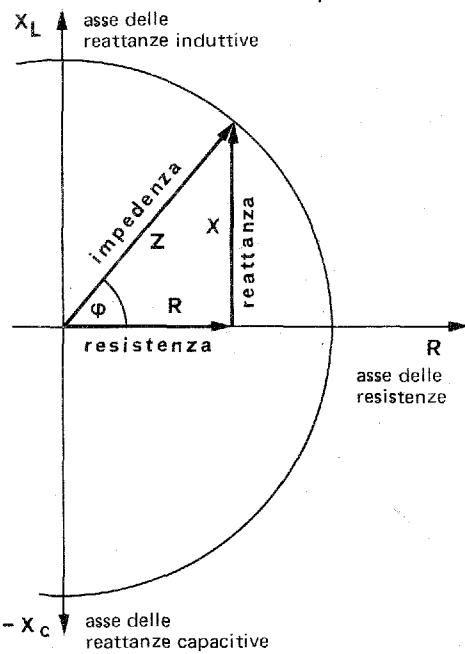
$$Z = \sqrt{X^2 + R^2}$$

In ogni caso è sufficiente conoscere due delle tre grandezze per determinare la terza.

Infatti:

$$R = \sqrt{Z^2 - X^2}$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$



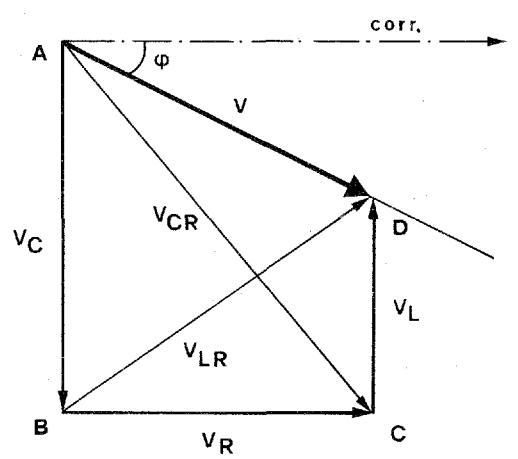
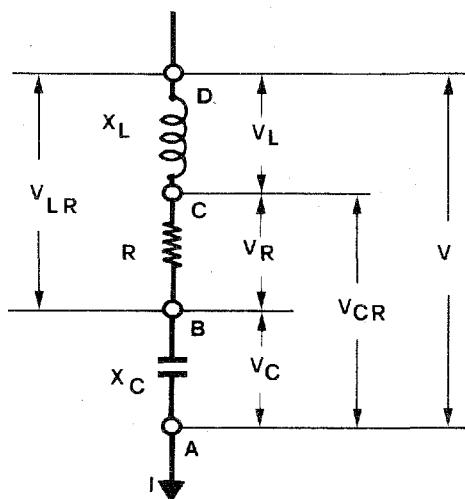
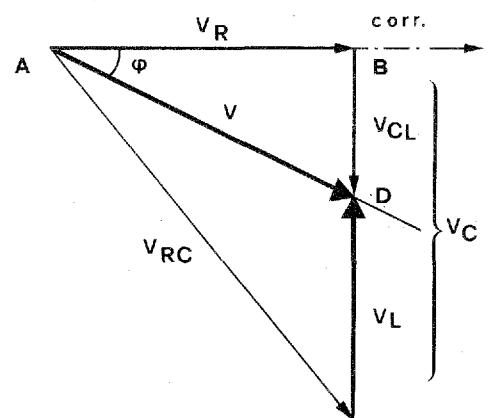
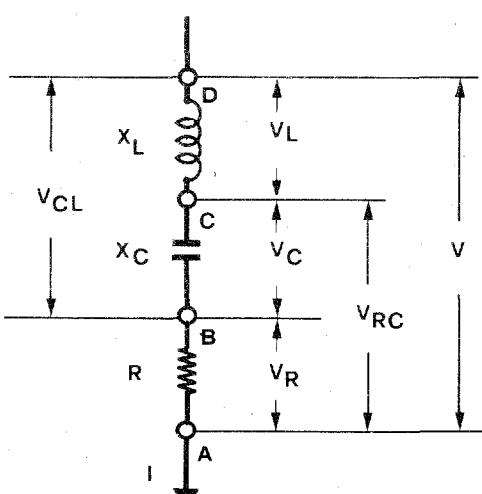
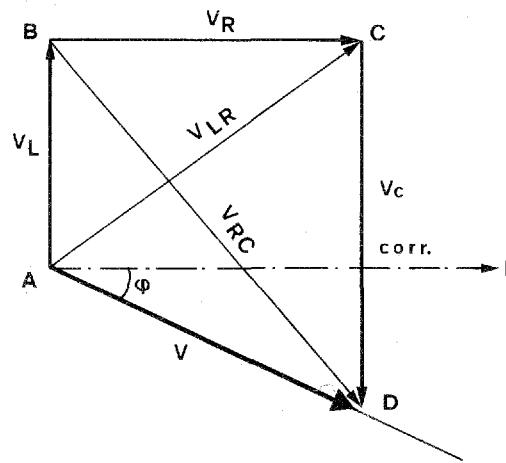
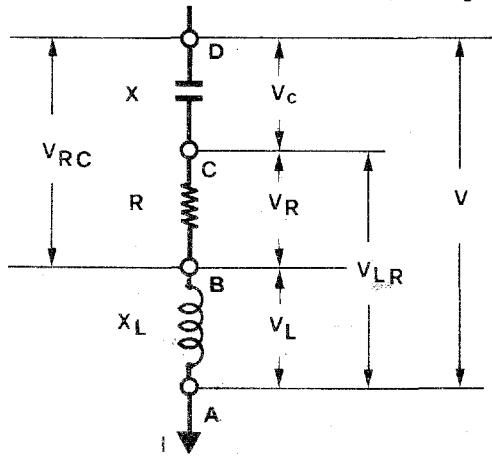
Sezione : 1 Grandezze Fondamentali  
 Capitolo : 13 Parametri del circuito  
 Paragrafo : 13.5 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie  
 Argomento : 13.55 Impedenza

### COMPOSIZIONI CIRCUITALI E VETTORIALI DIVERSE

Le stesse costanti del circuito, disposte diversamente, possono dar luogo a svariate combinazioni che qui sono illustrate schematicamente e vettorialmente.

I L'angolo di fase è quello che ciascun vettore forma con l'orizzontale che è stata presa come riferimento (correnti e resistenze).

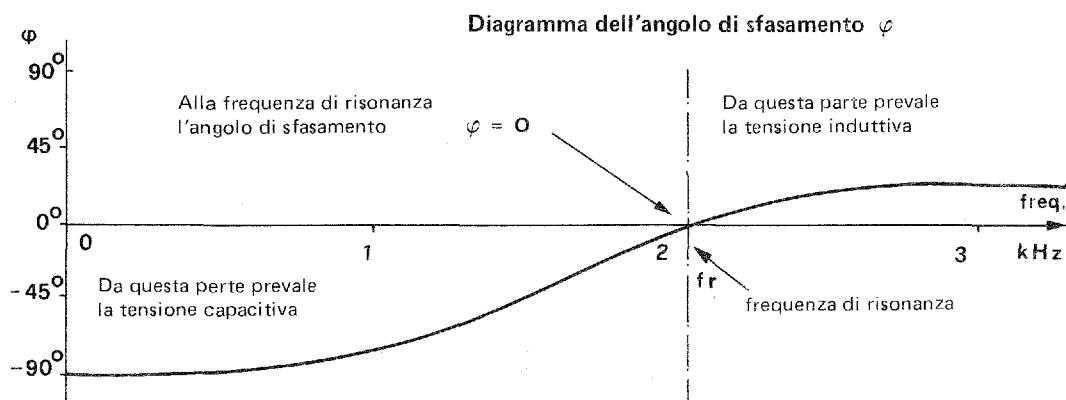
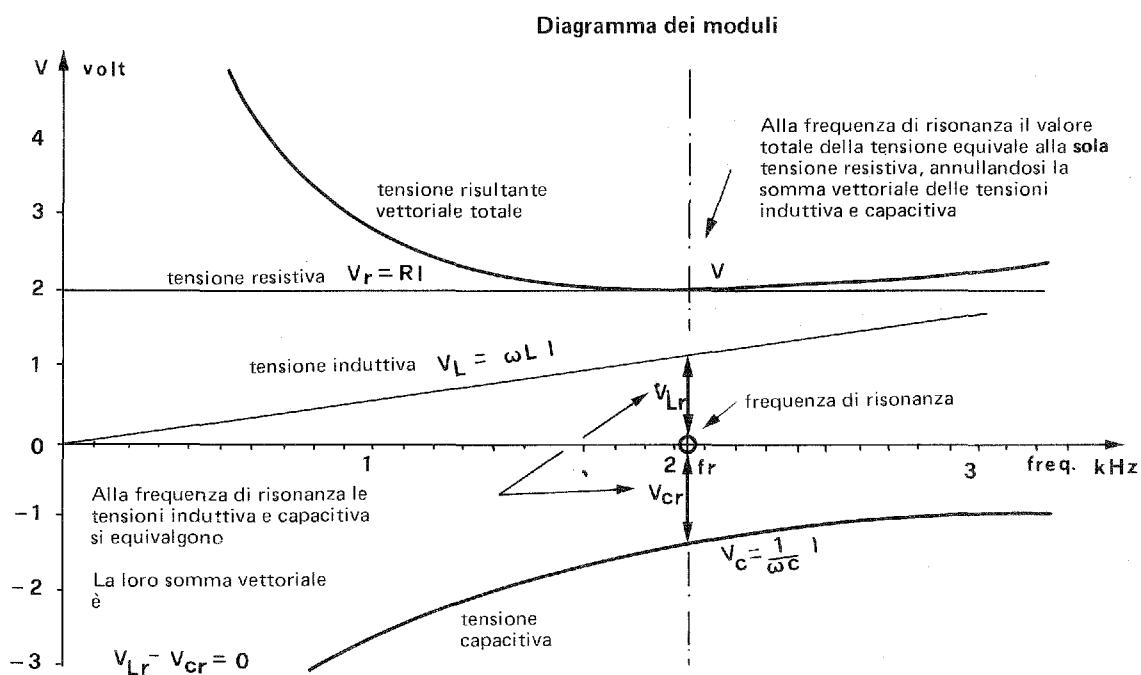
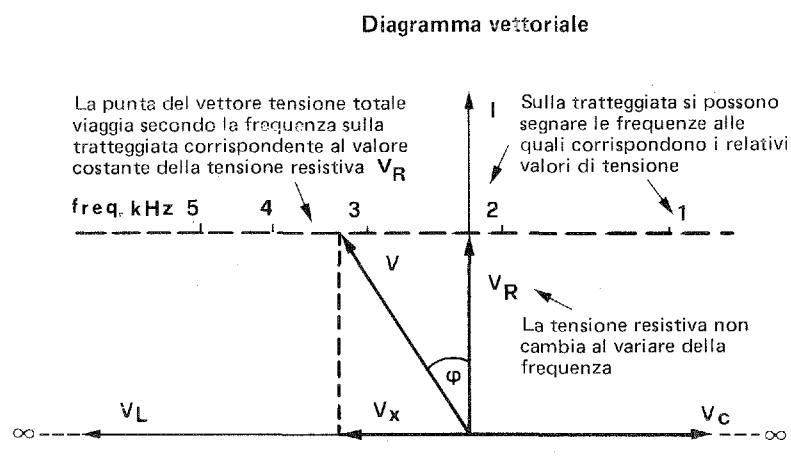
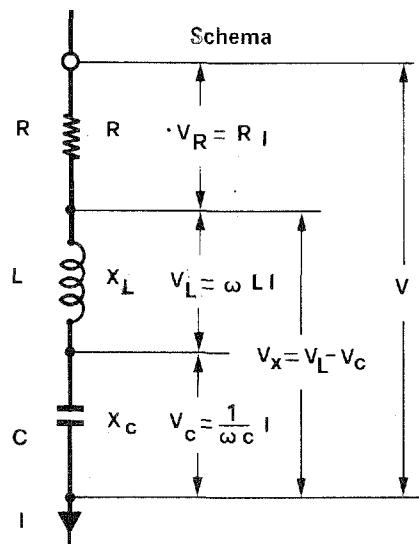
N.B. - Le tensioni omologhe sono uguali in modulo e fase. Comunque si dispongono le componenti, purché messe in serie fra loro, ottengono la medesima risultante in modulo e fase.



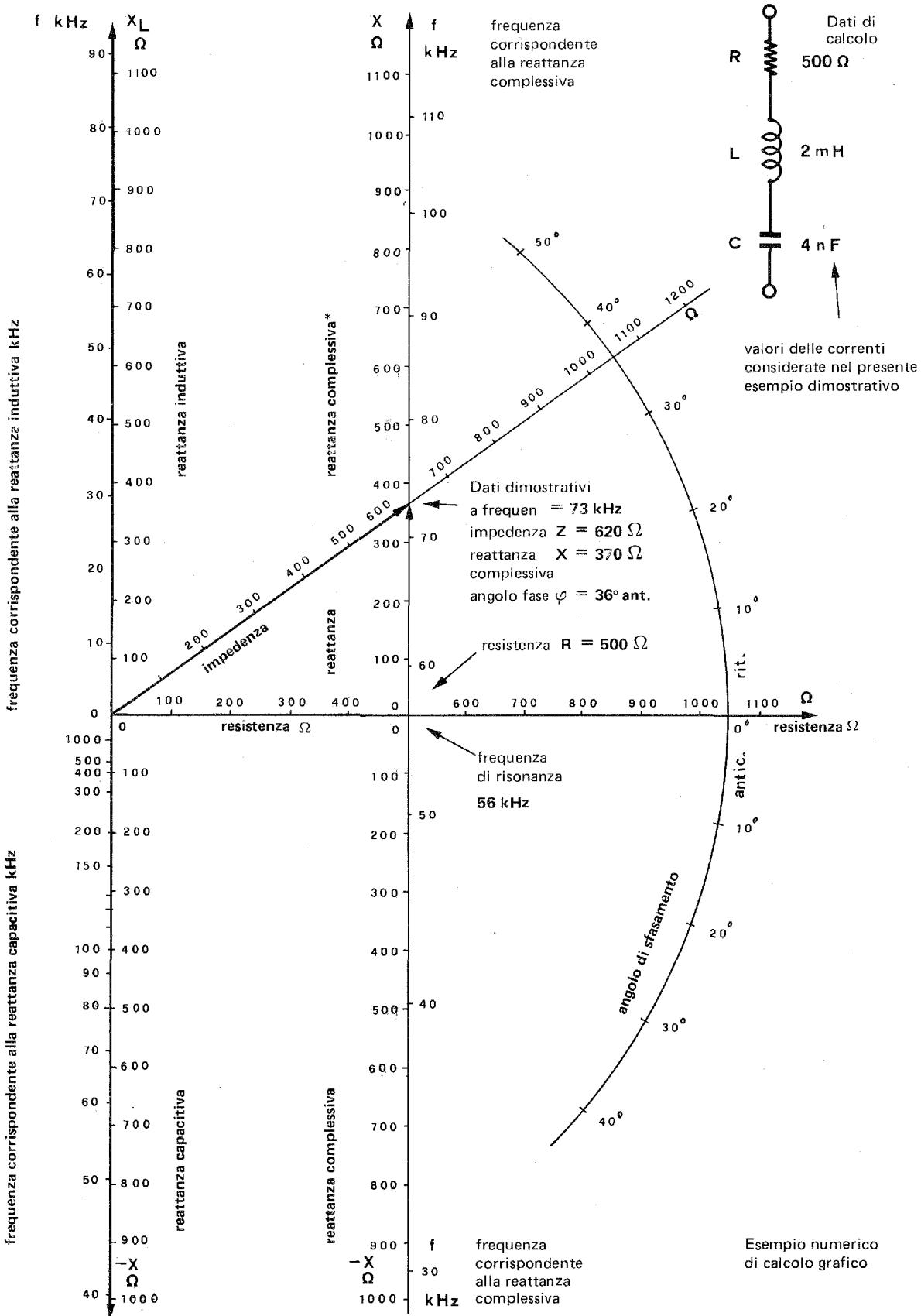
**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
13.55	4	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.5	Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in serie
		Argomento : 13.55	Impedenza

RAPPRESENTAZIONE DEL VALORE DELLE TENSIONI IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA

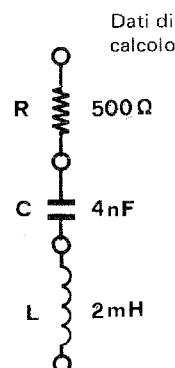


## RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE DELLE GRANDEZZE AL VARIARE DELLA FREQUENZA



## TABULAZIONE DEI CALCOLI

Per chi, malgrado tutto, non fosse ancora avvezzo alla lettura di un diagramma, abbiamo calcolato e messo in tabella i risultati che si ottengono quando la frequenza varia da 0 a 100 kHz con parametri disposti come in figura e con i valori a fianco indicati (sono gli stessi della pagina precedente)



parametro			L	C	R		
valore	variabile		2 mH	4 nF	500 Ω		
grandezza	f	ω	X <sub>L</sub>	X <sub>C</sub>	X	Z	φ
elementi di calcolo	—	2πf	ωL	ωC	X <sub>L</sub> — X <sub>C</sub>	$\sqrt{R^2+X^2}$	$\arctg \frac{X}{R}$
unità di misura	10 <sup>3</sup> Hz	10 <sup>3</sup> rad/sec	Ω	Ω	Ω	Ω	°
		0	0	∞	∞	∞	-90°
		10	62.8	125.6	3980.9	-3856.9	-82°.6
		20	125.6	251.2	1990.4	-1739.2	-75°.8
		30	188.5	377	1326.3	-949.3	-72°.2
		40	251.3	502.6	994.8	-492.2	-64°.5
		50	314.1	628.3	795.9	-167.6	-18°.5
	condizioni di risonanza →	56.2	353.5	707.2	707.2	0	0°
		60	377.0	754	663.1	90.9	+10°.3
		70	439.8	879.6	568.4	311.2	+31°.8
		80	502.6	1005.2	497.4	507.8	+45°.4
		90	565.5	1131	442.1	688.9	+54°.02
		100	628.3	1256.6	397.9	858.7	+59°.7

Osservazioni Si noti in particolare

a frequenza  $f = 0$  Hz la reattanza capacitiva  $X_C$  è infinita,  
 la reattanza induttiva  $X_L$  si annulla

alla frequenza  $f = 56,27$  kHz le reattanze capacitiva  $X_C$  e induttiva  $X_L$  sono uguali  
 la reattanza totale  $X$  si annulla  
 l'impedenza  $Z$  diventa uguale alle resistenze  $R$   
 l'angolo di fase  $\varphi$  si annulla

al crescere della frequenza  $f =$  la reattanza induttiva cresce  
 la reattanza capacitiva diminuisce  
 l'impedenza diminuisce fino al valore della resistenza (500Ω) condizioni di risonanza e poi riprende a crescere.

## Paragrafo 13.6

# CARATTERISTICHE A REGIME ALTERNATO

### GRANDEZZE IN PARALLELO

#### Indice degli argomenti e delle pagine

arg. 13.61 — **Conduttanza**

- pag. 1 — Premessa sul concetto di conduttanza
- pag. 2 — Definizione di conduttanza

arg. 13.62 — **Suscettanza capacitiva**

- pag. 1 — Premessa sul concetto di suscettanza capacitiva
- pag. 2 — Definizione di suscettanza capacitiva

arg. 13.63 — **Suscettanza induttiva**

- pag. 1 — Premesse sul concetto di suscettanza induttiva
- pag. 2 — Definizione di suscettanza induttiva

arg. 13.64 — **Composizione di suscettanza**

- pag. 1 — Segno e somma di correnti reattive
- pag. 2 — Segno e somma di suscettanza
- pag. 3 — Somma nulla di suscettanza. Risonanza
- pag. 4 — Frequenza di risonanza

arg. 13.65 — **Ammettenze**

- pag. 1 — Definizione di ammettenza
- pag. 2 — Angolo di sfasamento e modulo dell'ammettenza
- pag. 3 — Composizioni circuitali e vettoriali diverse
- pag. 4 — Rappresentazione del valore delle correnti in funzione della frequenza
- pag. 5 — Rappresentazione delle grandezze parallele al variare della frequenza
- pag. 6 — Tabulazione dei calcoli

Sezione : 1 Grandezze Fondamentali  
Capitolo : 13 Parametri del circuito  
Paragrafo : 13.6 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in parallelo  
Argomento : 13.61 Conduttanza

Codice Pagina  
**13.61** 1

### PREMESSA SUL CONCETTO DI CONDUTTANZA

Abbiamo visto come correnti e tensioni possono variare mantenendosi proporzionali fra di loro quando interessano una conduttanza (10.22) al pari della resistenza che è però una grandezza tipica dei circuiti serie (10.51).

Abbiamo visto anche come questo concetto di rigida proporzionalità secondo il fattore  $G$ , che si chiama appunto conduttanza, coincida con il concetto di mantenimento in fase della tensione con la corrente quando si ha a che fare con fenomeni ciclici come sono le grandezze alternate (13.41).

D'ora in poi, per ordinare bene le idee e per non fare confusione nei calcoli, quando diciamo **conduttanza** dobbiamo pensare unicamente ad una grandezza caratteristica dei **circuiti parallelo** in quanto al denominatore comune anche con le grandezze reattive che seguono (suscettanze), troviamo la tensione, grandezza pure comune agli elementi che si trovano in parallelo fra di loro.

Questa parola non è di uso così comune come il suo reciproco, la resistenza, che è una grandezza caratteristica dei circuiti serie (10.51).

Spesso il principiante non concepisce immediatamente la differenza concettuale e trova difficoltà nel fare i calcoli.

Vogliamo avvertire inoltre che la comprensione chiara dei concetti espressi in questo paragrafo e nei successivi eviterà anche di tenere inutilmente a memoria formule di secondaria importanza che sono sempre derivate da poche espressioni fondamentali.

#### Avvertenza

Buoni motivi con i neofiti ci suggeriscono di insistere che

- nelle disposizioni in serie si sommano le resistenze,
- nelle disposizioni in parallelo si sommano le conduttanze

e che

- una somma di resistenza dà una resistenza totale
- una somma di conduttanze dà una conduttanza totale.

Resterà poi nella facoltà e nella convenienza dello studioso trasformare quest'ultima in resistenza calcolando il reciproco del valore.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze Fondamentali
13.61	2	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.6 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in parallelo
		Argomento : 13.61 Conduttanza

### DEFINIZIONE DI CONDUTTANZA

Come abbiamo ripetutamente visto altrove, la conduttanza è determinata così:

$$\text{conduttanza} \rightarrow G = \frac{I_G}{V}$$

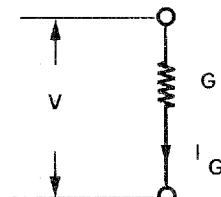
(S attivi)

← corrente in fase risultante (Amp)  
← tensione applicata ai capi (volt)

Essa è anche l'inverso della resistenza (vedi 13.51-2)

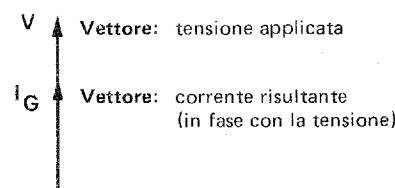
$$(\text{siemens}) \rightarrow G = \frac{1}{R}$$

(ohm)



### Rappresentazione vettoriale di tensione e corrente

Poiché la corrente risultante è in fase con la tensione, i due vettori risultano sovrapposti.



### CONDUTTANZE IN PARALLELO

#### Conduttanza totale

Il valore totale di due o più conduttanze in parallelo, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole conduttanze.

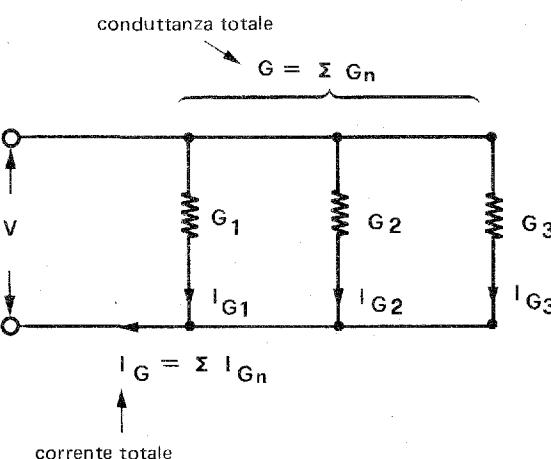
$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

#### Corrente totale

Il valore della corrente totale di due o più conduttanze in parallelo, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole correnti.

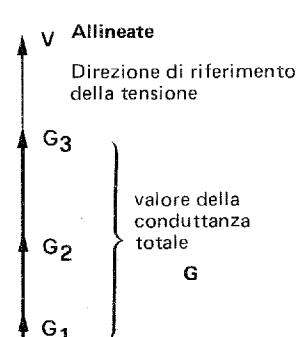
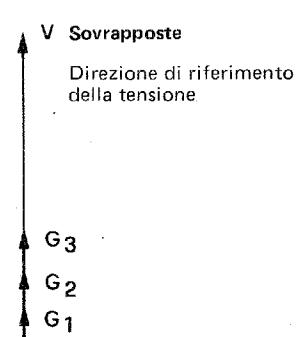
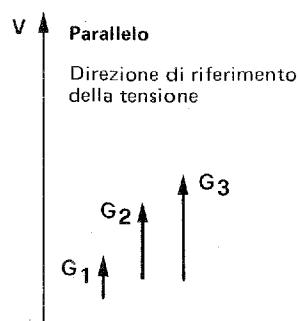
Anch'essa sarà in fase con la tensione, come le singole componenti.

$$I_G = I_{G_1} + I_{G_2} + I_{G_3} + \dots + I_{G_n}$$



### Rappresentazione vettoriale di conduttanze

Poiché le conduttanze in parallelo stanno fra loro come le rispettive correnti, esse possono essere rappresentate come le correnti stesse e in vari modi, purché sempre parallele o sovrapposte alla direzione di riferimento del vettore tensione.



### PREMESSE SUL CONCETTO DI SUSCETTANZA CAPACITIVA

In precedenza (13.42) abbiamo introdotto soltanto il concetto di reattanza capacitiva, grandezza tipica dei soli circuiti serie (13.52) più comunemente in uso.

Per poter sommare le medesime grandezze disposte in parallelo è indispensabile introdurre il concetto reciproco di suscettanza capacitiva.

Infatti, come gli elementi del circuito disposti in parallelo hanno in comune la tensione, così le grandezze che li rappresentano avranno a denominatore comune il valore di tale tensione.

Perciò, d'ora in poi, per ordinare bene le idee e per non fare confusioni nei calcoli, quando diciamo **suscettanza capacitiva** dobbiamo pensare unicamente ad una grandezza caratteristica dei **circuiti parallelo**.

La suscettanza capacitiva ha per simbolo  $B_c$  e rispetta la seguente relazione con la reattanza capacitiva  $B_c = \frac{1}{X_c}$

In questo modo si sono potuti assimilare alla legge di Ohm (10.22) per le conduttanze anche le grandezze suscettive a frequenza costante, purchè non si dimentichi il fenomeno fondamentale che vede nella suscettanza capacitiva la corrente sfasata di  $90^\circ$  in anticipo sulla tensione (13.42).

Constaterà il lettore comunque quanto la suscettanza capacitiva sia una grandezza meno consueta della reattanza capacitiva: ma non si lascerà più ingannare nei calcoli dalle dannose consuetudini se egli avrà chiari i concetti finora espressi.

Vogliamo inoltre avvertire che la comprensione chiara dei concetti espressi in questo paragrafo e nei successivi eviterà anche di tenere inutilmente a memoria formule di secondaria importanza, che sono sempre derivate da poche espressioni fondamentali.

#### **Avvertenza**

Buoni motivi di esperienza con i neofiti ci suggeriscono di insistere che:

- nelle disposizioni in serie si sommano le reattanze capacitive
- nelle disposizioni in parallelo si sommano le suscettanze capacitive

e che

- una somma di reattanze capacitive dà in totale ancora una reattanza capacitiva
- una somma di suscettanze capacitive dà in totale ancora una suscettanza capacitiva

Resterà poi alla facoltà e alla convenienza dello studioso trasformare quest'ultima in reattanza capacitiva calcolando il reciproco del suo valore.

# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze Fondamentali
13.62	2	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.6 Caratteristiche a regime alternato. Grandezze in parallelo

Argomento : 13.62 Suscettanza capacitiva

## DEFINIZIONE DI SUSCETTANZA CAPACITIVA

Come abbiamo visto anche altrove, la suscettanza capacitiva è determinata così:

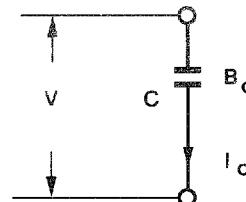
$$\text{suscettanza capacitiva (S reattivi)} \rightarrow B_c = \frac{I_c}{V} \quad \begin{array}{l} \text{corrente in anticipo di } 90^\circ \text{ rispetto alla} \\ \text{tensione applicata alla capacità} \end{array}$$

Essa è anche l'inverso della reattanza capacitiva (vedi)

$$(\text{ohm}) \quad B_c = \frac{1}{X_c} \quad (\text{siemens})$$

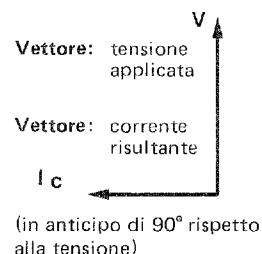
Essa dipende anche dalla capacità e dalla frequenza

$$(\text{ohm}) \quad B_c = \omega C \quad \begin{array}{l} \text{(farad)} \\ (2\pi f) \end{array}$$



### Rappresentazione vettoriale di tensione e corrente

Poichè la corrente risultante è in anticipo di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad) rispetto alla tensione, la rappresentazione vettoriale è questa.



## SUSCETTANZE CAPACITIVE IN PARALLELO

### Suscettanza capacitiva totale.

Il valore totale di due o più suscettanze capacitive in parallelo, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole suscettanze capacitive.

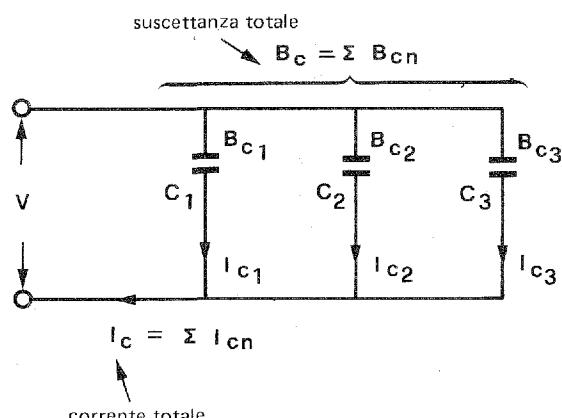
$$B_c = B_{c1} + B_{c2} + B_{c3} + \dots + B_{cn}$$

### Corrente capacitiva totale

Il valore della corrente totale di due o più suscettanze capacitive in parallelo, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole correnti capacitive.

Anch'essa sarà sfasata in anticipo di  $90^\circ$  rispetto alla tensione, come le componenti.

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + \dots + I_{cn}$$



### Rappresentazione vettoriale di più suscettanze capacitive

Poichè le suscettanze capacitive in parallelo stanno fra loro come le rispettive correnti, esse possono essere rappresentate come le correnti stesse e in vari modi, purchè sempre sfocate di  $90^\circ$  in anticipo rispetto alla direzione di riferimento del vettore tensione.

#### Parallele fra loro

Direzione di riferimento della tensione

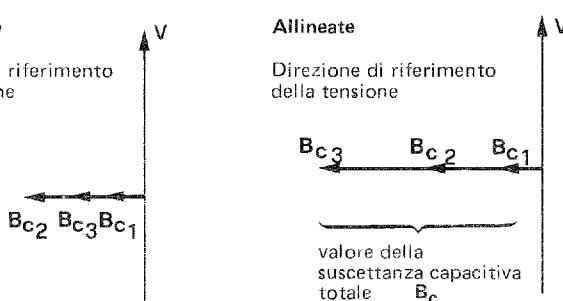
$$-B_{c1}$$

$$-B_{c2}$$

$$-B_{c3}$$

#### Sovraposte

Direzione di riferimento della tensione



#### Allineate

Direzione di riferimento della tensione

$$B_{c3} \quad B_{c2} \quad B_{c1}$$

valore della suscettanza capacitativa totale  $B_c$

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 13	Parametri del circuito
<b>Paragrafo</b>	: 13.6	Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo
<b>Argomento</b>	: 13.63	Suscettanza induttiva

### PREMESSE SUL CONCETTO DI SUSCETTANZA INDUTTIVA

In precedenza (13.43) abbiamo introdotto soltanto il concetto di reattanza induttiva, grandezza tipica dei soli circuiti serie (13.53) più comunemente in uso.

Per poter sommare le medesime grandezze disposte in parallelo è indispensabile introdurre il concetto reciproco di suscettanza induttiva.

Infatti, come gli elementi del circuito disposti in parallelo hanno in comune la tensione, così le grandezze che li rappresentano avranno a denominatore comune il valore di tale tensione.

Perciò, d'ora in poi, per ordinare bene le idee e per non fare confusione nei calcoli, quando diciamo **suscettanza induttiva** dobbiamo pensare ad una grandezza caratteristica dei **circuiti parallelo**.

La suscettanza induttiva ha per simbolo  $B_L$  e rispetta la seguente relazione con la reattanza induttiva.

$$B_L = \frac{1}{X_L}$$

In questo modo si sono potute assimilare alla legge di Ohm (10.22) per le conduttanze anche le grandezze suscettive a frequenza costante, purchè non si dimentichi il fenomeno fondamentale che vede nelle suscettanze induttive la corrente sfasata di  $90^\circ$  in ritardo rispetto alla tensione (13.43).

Constaterà il lettore comunque quanto la suscettanza induttiva sia una grandezza meno consueta della reattanza induttiva, ma non si lascerà più ingannare nei calcoli dalle dannose consuetudini, se avrà ben chiari i concetti finora esposti.

Vogliamo avvertire inoltre che la comprensione chiara dei concetti espressi in questo paragrafo e nei successivi eviterà anche di tenere inutilmente a memoria formule di secondaria importanza, che sono sempre derivate da poche espressioni fondamentali.

#### Avvertenza

Buoni motivi di esperienza con i neofiti ci suggeriscono di insistere che

nelle disposizioni in serie si sommano le reattanze induttive  
nelle disposizioni in parallelo si sommano le suscettanze induttive

e che

una somma di reattanze induttive dà in totale ancora una reattanza induttiva  
una somma di suscettanze induttive dà in totale ancora una suscettanza induttiva.

Resterà poi alla facoltà e alla convenienza dello studioso trasformare quest'ultimo in reattanza induttiva calcolando il reciproco del suo valore.

# APPUNTI DI ELETTRONICA

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
13.63	2	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.6	Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo

Argomento : 13.63 Suscettanza induttiva

## DEFINIZIONE DI SUSCETTANZA INDUTTIVA

Come abbiamo visto anche altrove, la suscettanza induttiva è determinata così:

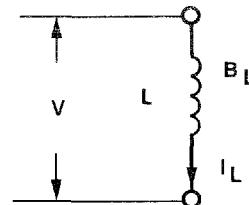
$$\text{suscettanza induttiva} \quad \rightarrow \quad B_L = \frac{I_L}{V} \quad \begin{array}{l} \text{corrente in ritardo di } 90^\circ \text{ rispetto alla} \\ \text{tensione applicata alla induttanza} \end{array}$$

Essa è anche l'inverso della reattanza induttiva (vedi)

$$(\text{ohm}) \quad B_L = \frac{1}{X_L} \quad (\text{siemens})$$

Essa dipende anche dalla capacità e dalla frequenza

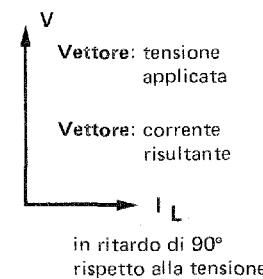
$$(\text{ohm}) \quad B_L = \frac{1}{\omega L} \quad \begin{array}{l} \text{(henry)} \\ (2\pi f) \end{array}$$



### Rappresentazione vettoriale di tensione e corrente

Poiché la corrente risultante è in ritardo di  $90^\circ$

( $\frac{\pi}{2}$  rad) rispetto alla tensione, la rappresentazione vettoriale è questa →



## SUSCETTANZE INDUTTIVE IN PARALLELO

### Suscettanza induttiva totale

Il valore totale di due o più suscettanze induttive in parallelo, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole suscettanze induttive.

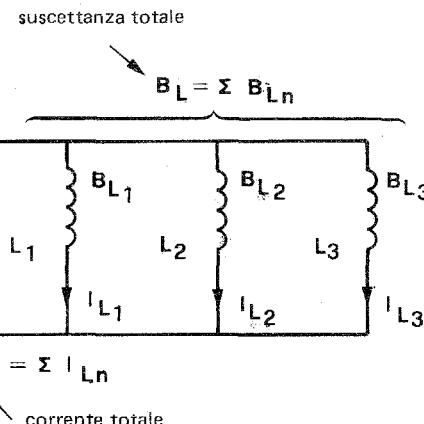
$$B_L = B_{L1} + B_{L2} + B_{L3} + \dots + B_{Ln}$$

### Corrente induttiva totale

Il valore della corrente totale di due o più suscettanze induttive in parallelo, corrisponde alla somma aritmetica dei valori delle singole correnti capacitive.

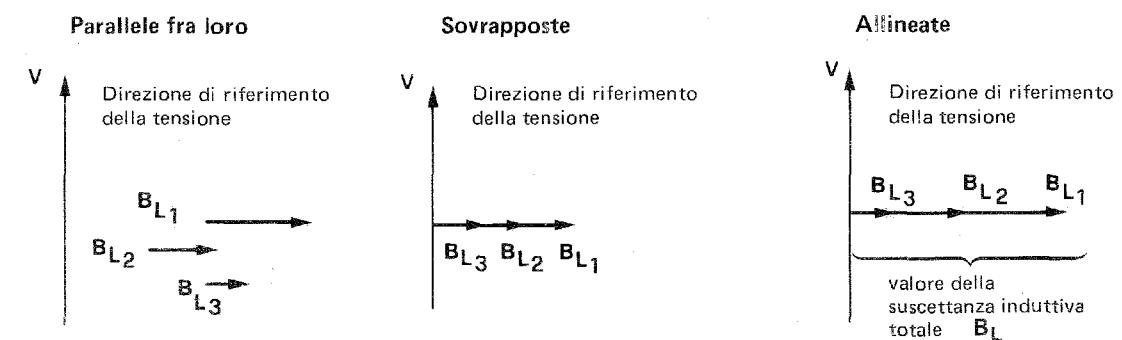
Anch'essa sarà sfasata in ritardo di  $90^\circ$  rispetto alla tensione, come le componenti.

$$I_L = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + \dots + I_{Ln}$$



### Rappresentazione vettoriale di più suscettanze induttive

Poiché le suscettanze induttive in parallelo stanno fra loro come le rispettive correnti, esse possono essere rappresentate come le correnti stesse e in vari modi, purché sempre sfasate di  $90^\circ$  in ritardo rispetto alla direzione di riferimento del vettore tensione.



## SEGNO E SOMMA DI CORRENTI REATTIVE

Si abbiano, collegate in parallelo, una suscettanza induttiva ed una suscettanza capacitiva.

Esse sono alimentate dalla medesima tensione, mentre le rispettive correnti hanno, sfasamento di  $90^\circ$ , ciascuna da parte opposta, rispetto alla direzione della tensione stessa.

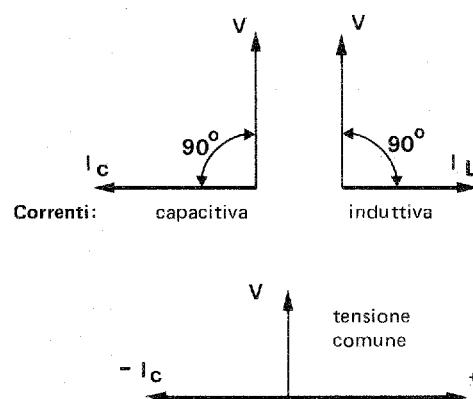
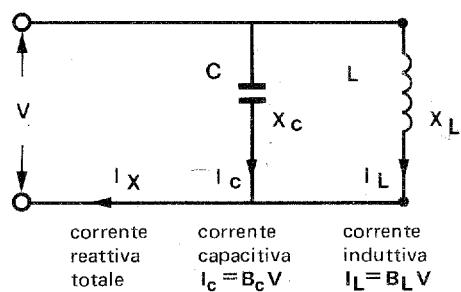
Ciò significa che i vettori delle due correnti sono allineati, ma hanno direzioni opposte.

Pertanto, a ciascuna corrente si può attribuire un segno algebrico e quindi la somma di due correnti in opposizione di fase sarà algebrica.

Abitualmente si attribuisce

- ) il segno negativo alla corrente induttiva
- +) il segno positivo alla corrente capacitiva.

Schema



La rappresentazione vettoriale delle due correnti, rispetto alla tensione, può essere sintetizzata in questo modo.

Molti autori preferiscono disegnare in orizzontale la direzione della tensione di riferimento e in questo modo ci uniformeremo nel grafico seguente.

## Rappresentazione vettoriale della corrente reattiva totale

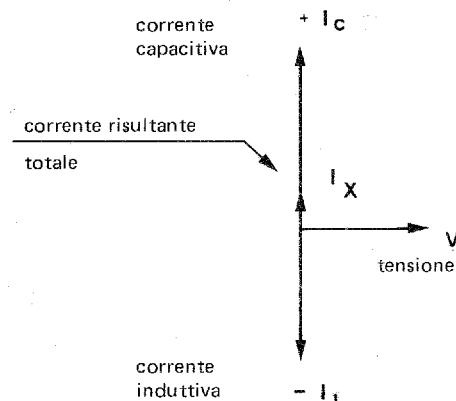
La somma algebrica delle due correnti che, in modulo, equivale alla loro differenza, corrisponde al valore della corrente totale.

Questa corrente reattiva risultante, sarà di tipo capacitivo o induttivo (cioè positivo o negativo), a seconda di quale delle due grandezze prevale.

Nell'esempio qui a fianco prevale la tensione capacitativa.

Algebricamente l'espressione è la seguente

$$I_x = I_c - I_L$$



**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
13.64	2	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.6 Caratteristiche a regime alternato grandezze in parallelo
		Argomento : 13.64 Composizione di suscettanze

**SEGO E SOMMA DI SUSCETTANZE**

Poiché, come abbiamo già visto, anche le suscettanze sono grandezze vettoriali con angolo di fase relativo ad una grandezza comune (la tensione), esse possono sommarsi vettorialmente come le rispettive correnti.

Perciò, anche i vettori che rappresentano

- la suscettanza capacitiva e
- la suscettanza induttiva

saranno rappresentati da parti opposte sfasati di  $90^\circ$  (in anticipo e in ritardo) rispetto alla direzione del vettore che rappresenta la tensione.

Ciò significa che i vettori delle due suscettanze sono allineati ma hanno direzioni opposte.

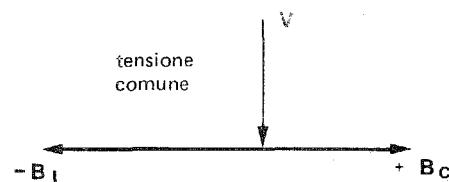
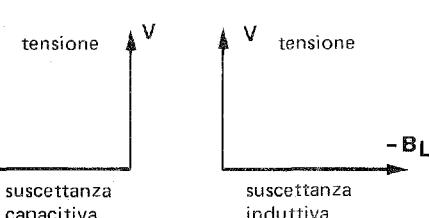
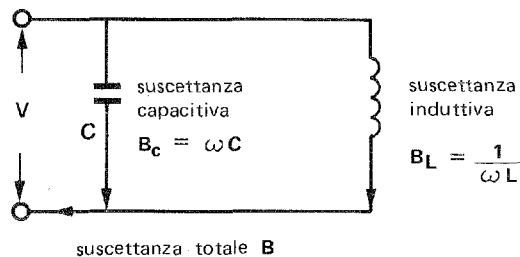
Pertanto, a ciascuna suscettanza si può attribuire un segno algebrico e quindi la somma di due suscettanze in opposizione di fase sarà algebrica.

Abitualmente si attribuisce

- ) il segno negativo alla suscettanza induttiva
- +) il segno positivo alla suscettanza capacitiva.

La rappresentazione vettoriale delle due suscettanze, rispetto alla tensione, può essere sintetizzata in questo modo

**Schema**



Molti autori preferiscono disegnare in orizzontale la direzione della tensione di riferimento e nel grafico seguente ci uniformeremo senz'altro.

**Rappresentazione vettoriale della suscettanza totale**

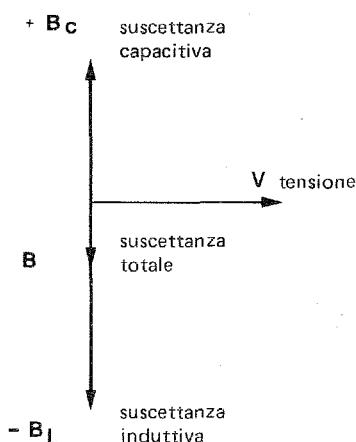
La somma algebrica delle due suscettanze che, in modulo, equivale alla loro differenza, corrisponde al valore della suscettanza totale.

Questa suscettanza totale sarà di tipo capacitivo o induttivo (cioè positiva o negativa), a seconda di quale delle due grandezze prevale.

Nell'esempio qui a fianco prevale la suscettanza induttiva.

Algebricamente l'espressione è la seguente

$$B = B_c - B_L$$



Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.6	Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo
Argomento : 13.64	Composizione di suscettanze

Codice 13.64 Pagina 3

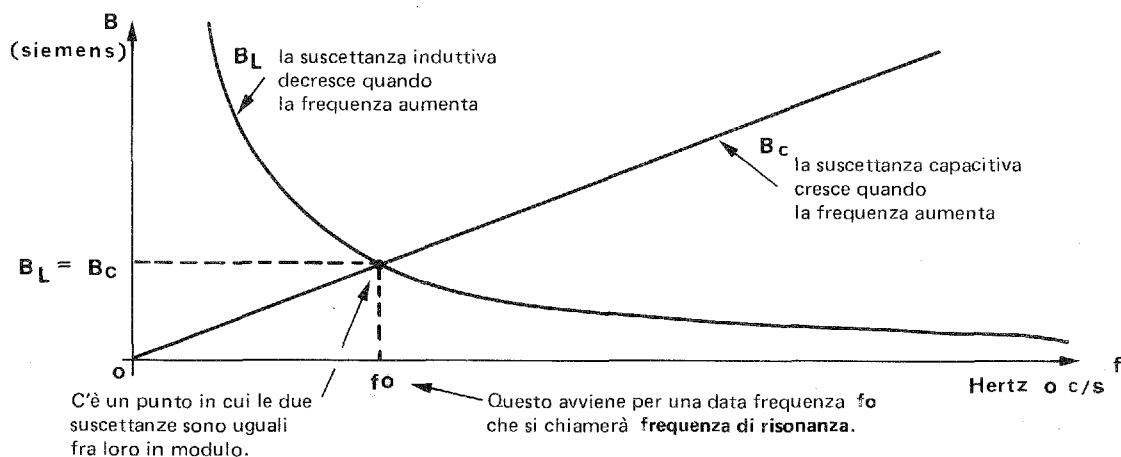
## SOMMA NULLA DI SUSCETTANZE – RISONANZA

Abbiamo visto quanto segue, in valore assoluto

$$\text{suscettanza capacitiva (siemens)} \rightarrow B_C = \frac{\omega C}{\text{capacità (farad)}} \quad \text{posizione} = 2\pi f \text{ (rad/s)}$$

$$\text{suscettanza induttiva (siemens)} \rightarrow B_L = \frac{1}{\omega L} \quad \text{induttanza (henry)} \quad \text{pulsazione} = 2\pi f \text{ (rad/s)}$$

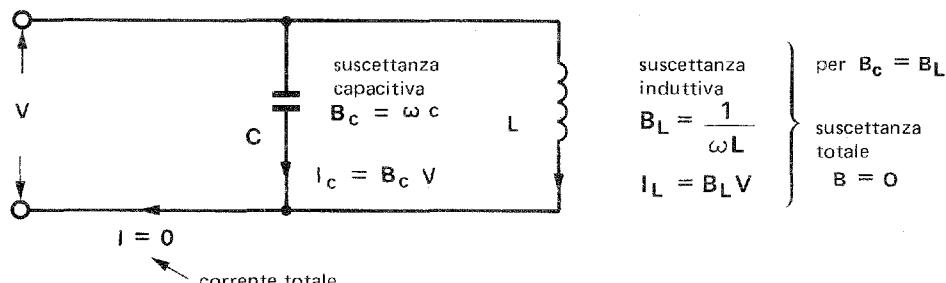
Rappresentiamo graficamente i valori delle due suscettanze in funzione della frequenza (valori assoluti).



Anche se uguali fra loro in modulo, le due suscettanze hanno vettorialmente direzioni opposte; cioè le correnti che si sommano al nodo, sono in opposizione di fase fra loro.

La somma di due siffatte suscettanze è uguale a zero, così come è uguale a zero in ogni istante la somma delle correnti.

Vediamo il significato di tutto questo.



**Nota:** La corrente totale è uguale a zero anche se c'è tensione nel circuito, mentre le due correnti capacitativa e induttiva hanno un valore ben definito.

Ciò significa che l'induttanza e la capacità si scambiano reciprocamente la loro energia al ritmo della frequenza relativa alla tensione di alimentazione senza richiamare altra energia dal generatore.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
13.64	4	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.6 Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo
		Argomento : 13.64 Composizione di suscettanze

### FREQUENZA DI RISONANZA

Conoscendo la capacità **C (farad)** e l'induttanza **L (henry)**, è possibile determinare per quale frequenza **f (hertz)** il circuito parallelo, comprendente le due grandezze, entra in risonanza.

Essendo

$$\text{la suscettanza capacitiva } B_C = \omega C$$

$$\text{la suscettanza induttiva } B_L = \frac{1}{\omega L}$$

l'uguaglianza  $B_C = B_L$  delle suscettanze porta all'uguaglianza corrispondente

$$\omega C = \frac{1}{\omega L}$$

Sviluppando si ha

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

da cui

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

↑                              ↓  
pulsazione di risonanza    capacità (farad)  
(rad/sec)                    induttanza (henry)

Essendo inoltre  $\omega = 2\pi f$  e sostituendo, si ha

$$\xrightarrow{\text{frequenza di risonanza (in hertz o cicli/sec)}} f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

↑                              ↓  
                                  capacità (farad)  
                                  induttanza (henry)

Questa relazione è identica a quella descritta per il circuito serie (vedi. 13.74-1).

Ciò significa che le due grandezze risuonano sia se collegate in serie, sia se collegate in parallelo.

#### Altri problemi

Lo sviluppo della relazione tra frequenza, capacità e induttanza, permette la soluzione di altri analoghi problemi.

a) Conoscendo la capacità **C (farad)** e la frequenza **f (hertz)**, si può calcolare il valore della induttanza parallelo, che manda in risonanza il circuito stesso.

Essa sarà

$$\xrightarrow{\text{induttanza (henry)}} L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

↑                              ↓  
                                  pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)

b) Conoscendo l'induttanza **L (henry)** e la frequenza **f (hertz)**, si può calcolare il valore della capacità parallelo, che manda in risonanza il circuito stesso.

Essa sarà

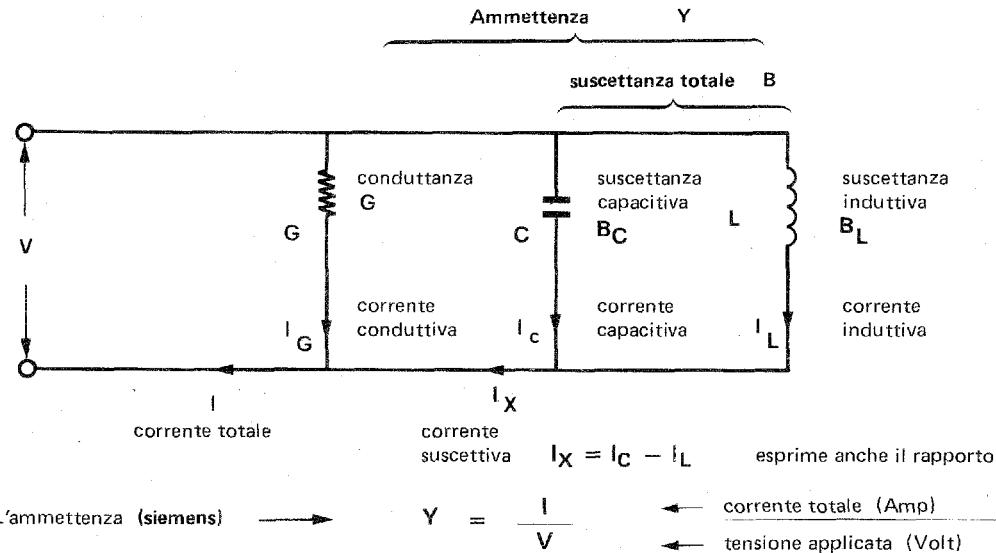
$$\xrightarrow{\text{capacità (farad)}} C = \frac{1}{\omega^2 L}$$

↑                              ↓  
                                  pulsazione =  $2\pi f$  (rad/sec)

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.6	Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo
Argomento : 13.65	Ammettenza

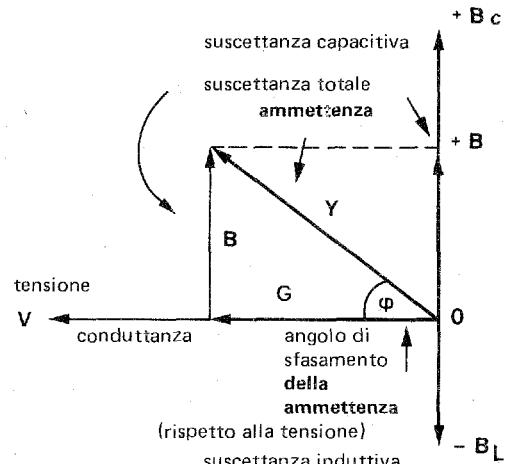
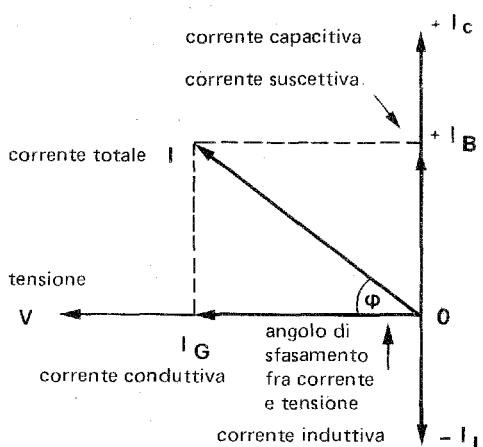
### DEFINIZIONE DI AMMETTENZA

Quando una conduttanza si trova in parallelo ad una o più suscettanze, si ottiene una ammettenza.



### RAPPRESENTAZIONI VETTORIALI

#### Correnti



#### Definizione generale

Si chiama **ammittenza** di un circuito il rapporto fra la corrente che lo attraversa e la tensione ai suoi capi.

Questo valore non può da solo definire l'ammittenza, se non è associato all'**angolo di sfasamento** fra corrente e tensione.

$$\varphi = \arctan \frac{I_B}{I_G} = \arctan \frac{B}{G}$$

In altre parole, è l'angolo espresso dalla pendenza di un lato (ammittenza) rispetto all'altro (tensione o conduttanza) qui in orizzontale.

La pendenza è determinata dal rapporto  $\tan \varphi = \frac{I_B}{I_G}$  o dall'ugual rapporto  $\tan \varphi = \frac{B}{G}$

L'ammittenza è anche l'inverso dell'impedenza (vedi. 13.55-1).  $Y = \frac{1}{Z}$

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
13.65	2	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.6	Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo
		Argomento : 13.65	Ammettenza

### ANGOLO DI SFASAMENTO E MODULO DELL'AMMETTENZA

#### Angolo di sfasamento

Come già visto, la definizione del solo modulo

$$\text{ammettenza } Y = \frac{I}{V} \quad \begin{array}{l} \xleftarrow{\text{corrente}} \\ \xleftarrow{\text{tensione}} \end{array}$$

non è sufficiente a definire l'ammettenza.

Infatti, ci sono infiniti angoli di sfasamento cui compete lo stesso modulo.

Pertanto è indispensabile che al valore del modulo sia associato l'angolo di sfasamento fra corrente e tensione.

Poiché l'ammettenza consta di due grandezze vettoriali, fra loro ortogonali:

- la suscettanza  $B$
- la conduttanza  $G$

L'angolo di sfasamento può essere determinato da una delle seguenti funzioni trigonometriche:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B}{G} \quad \cos \varphi = \frac{G}{Y} \quad \sin \varphi = \frac{B}{Y}$$

#### Modulo

Conoscendo l'angolo di sfasamento, si possono determinare le grandezze vettoriali che formano l'impedenza stessa.

Infatti:

- la suscettanza  $B = Y \sin \varphi$
- la conduttanza  $G = Y \cos \varphi$

Conoscendo inoltre

- la suscettanza  $B$
- e la conduttanza  $G$

è possibile determinare il modulo

della ammettenza  $Y$

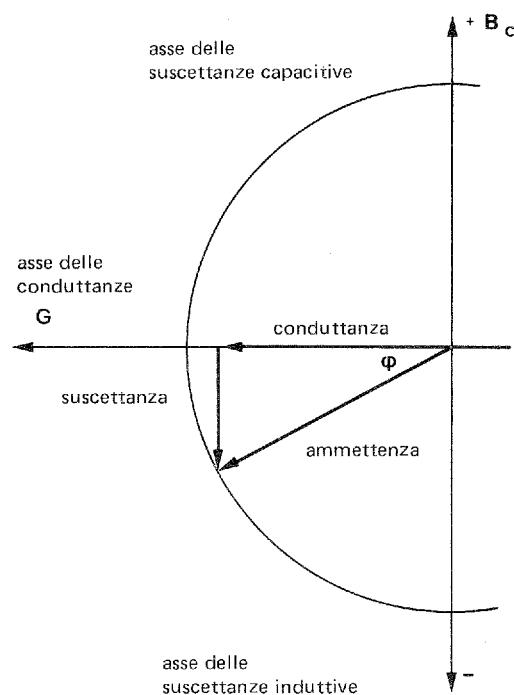
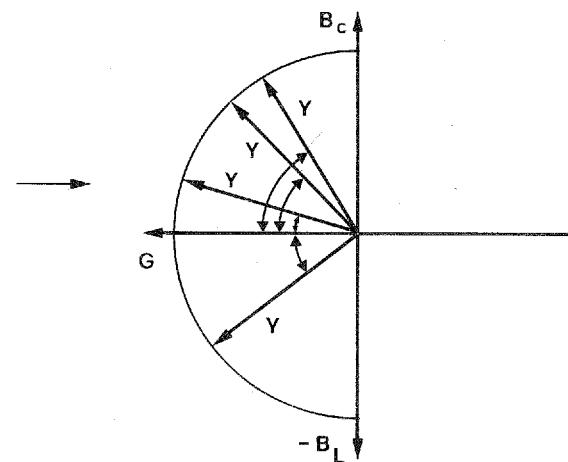
anche mediante il teorema di Pitagora

$$Y = \sqrt{B^2 + G^2}$$

In ogni caso è sufficiente conoscere due delle tre grandezze per determinare la terza

$$G = \sqrt{Y^2 - B^2}$$

$$B = \sqrt{Y^2 - G^2}$$



Sezione : 1 Grandezze fondamentali

Capitolo : 13 Parametri del circuito

Paragrafo : 13.6 Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo

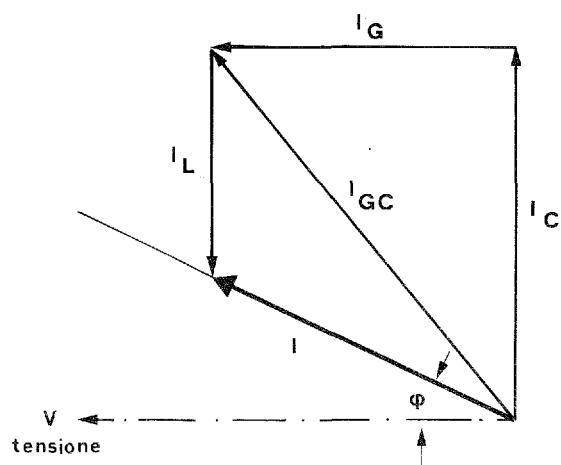
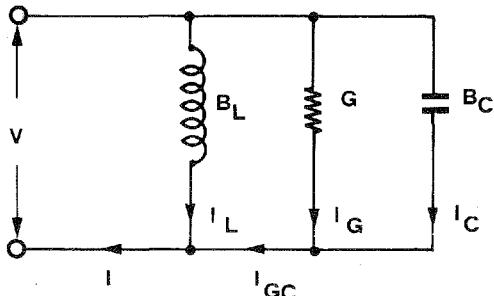
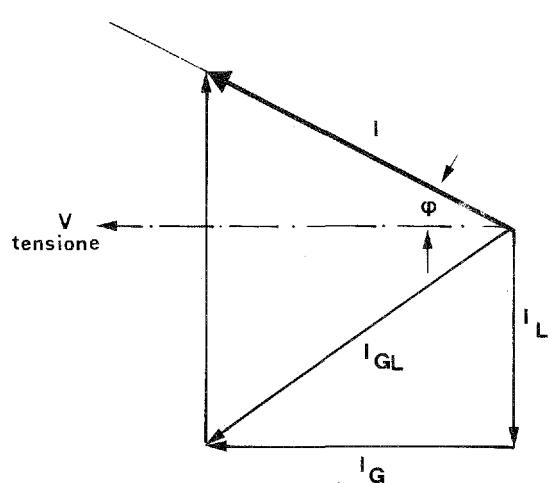
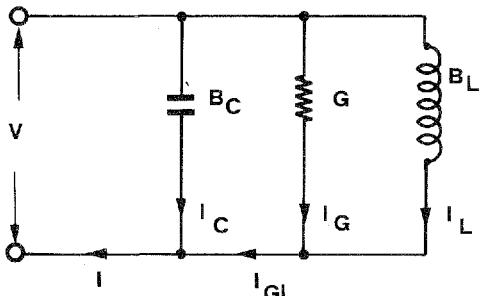
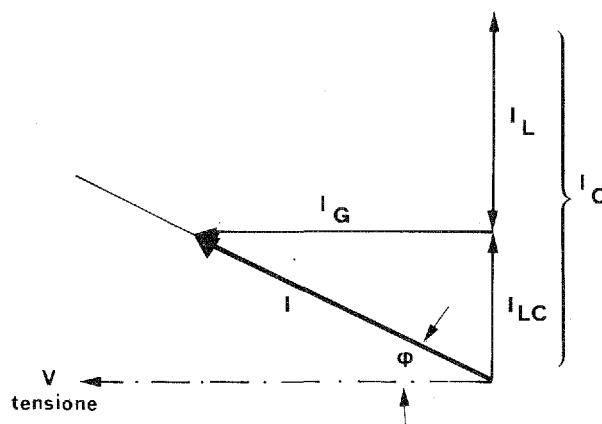
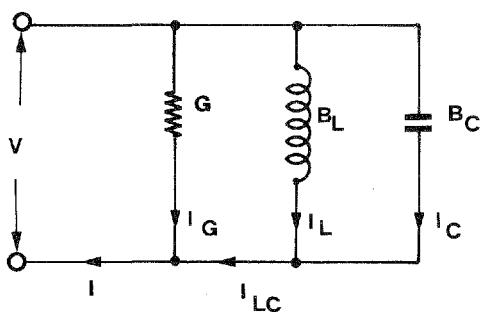
Argomento : 13.65 Ammettenza

### COMPOSIZIONI CIRCUITALI E VETTORIALI DIVERSE

Le stesse costanti del circuito, disposte diversamente, possono dar luogo a svariate combinazioni che qui sono illustrate schematicamente e vettorialmente.

L'angolo di fase è quello che ciascun vettore forma con l'orizzontale che è stata presa come riferimento (tensioni e conduttanze).

N.B. — Le correnti omologhe sono uguali in modulo e fase o in altre parole comunque si dispongano le componenti, purchè sempre in parallelo fra loro, danno sempre la medesima risultante, in modulo e fase.

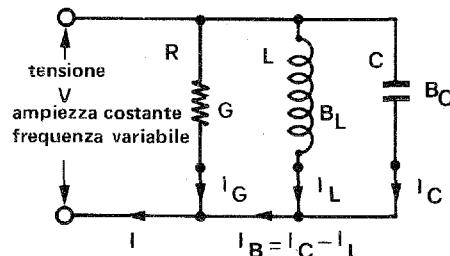


**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1 Grandezze fondamentali
13.65	4	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.6 Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo
		Argomento : 13.65 Ammettenza

**RAPPRESENTAZIONE DEL VALORE DELLE CORRENTI IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA**

Schema



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

$$B_C = C$$

$$B_L = \frac{1}{L}$$

Diagramma vettoriale

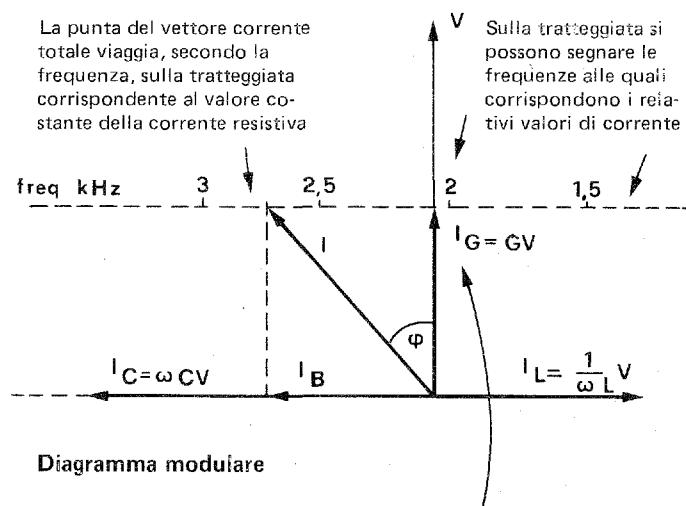
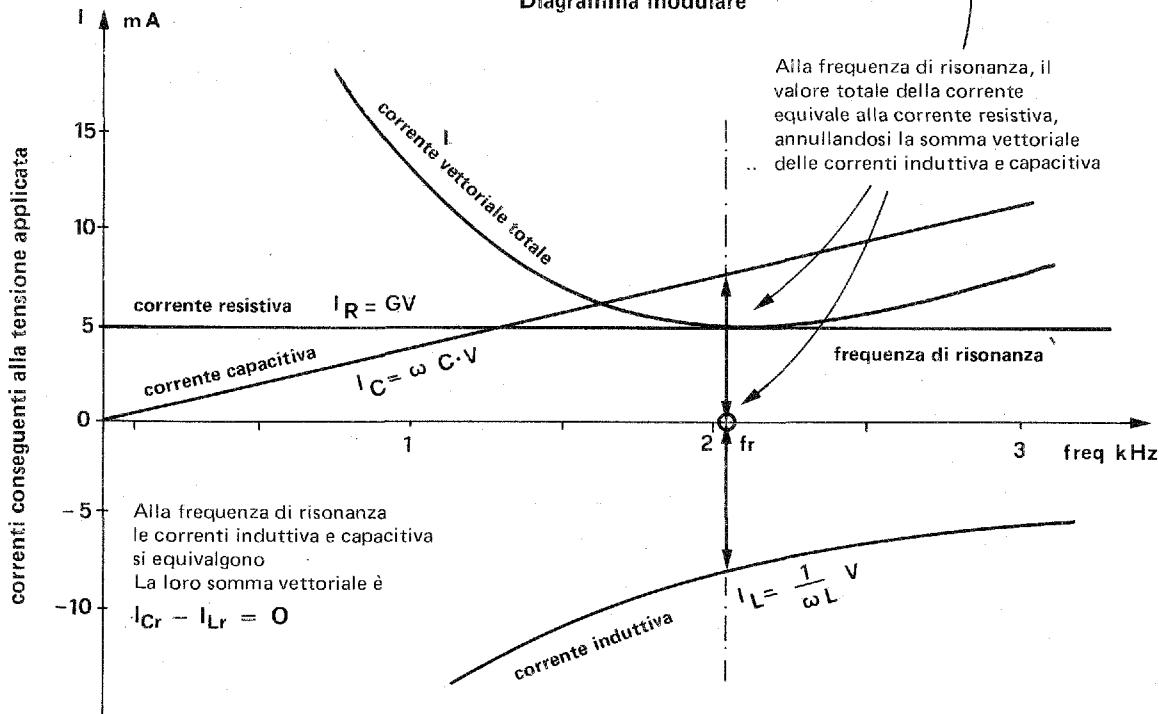
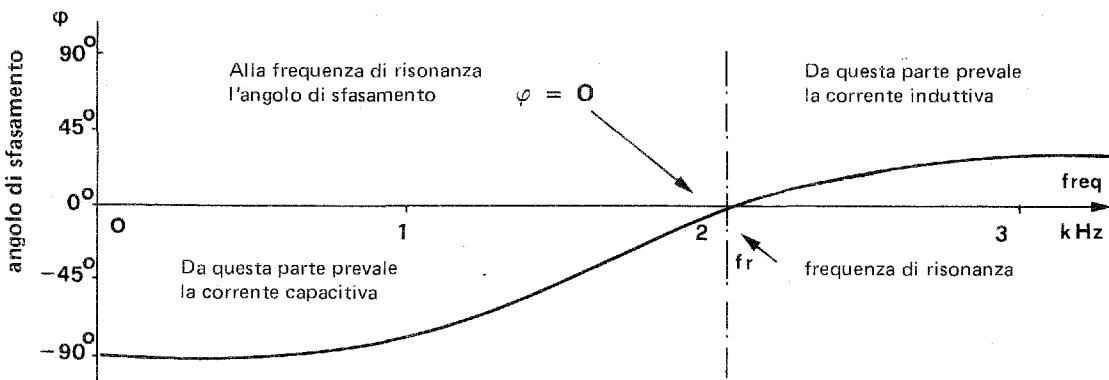


Diagramma modulare

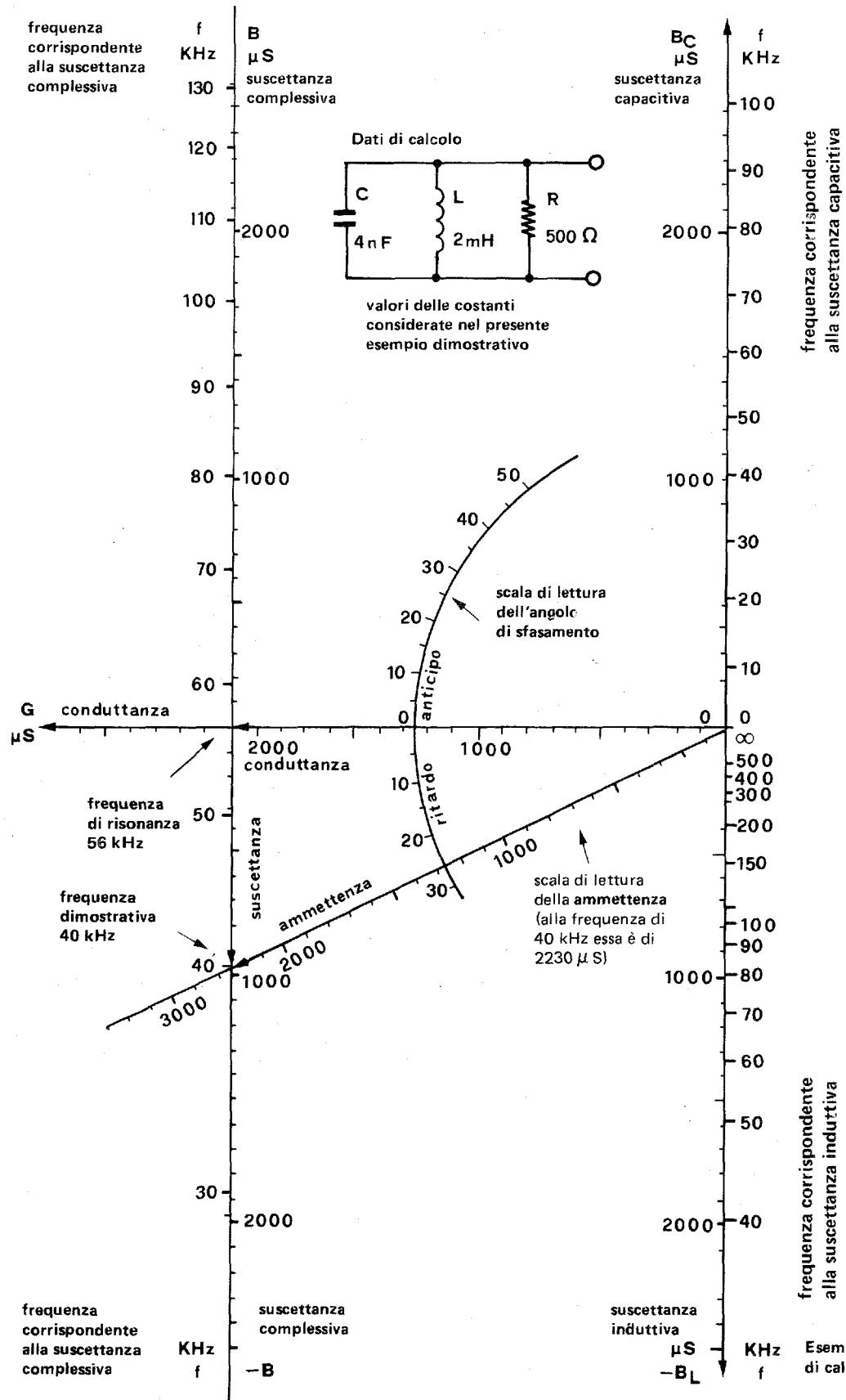


Alla frequenza di risonanza, il valore totale della corrente equivale alla corrente resistiva, annullandosi la somma vettoriale delle correnti induttiva e capacitativa

Diagramma dell'angolo di sfasamento  $\varphi$



RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE DELLE GRANDEZZE AL VARIARE DELLA FREQUENZA



**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

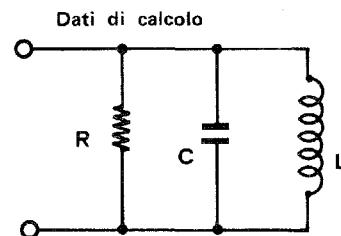
Codice **13.65**

Pagina **6**

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 13	Parametri del circuito
Paragrafo : 13.6	Caratteristiche a regime alternato: grandezze in parallelo
Argomento : 13.65	Ammettenza

**TABULAZIONE DEI CALCOLI**

Per chi, malgrado tutto, non fosse ancora avvezzo alla lettura di un diagramma, abbiamo calcolato e messo in tabella i risultati che si ottengono quando la frequenza varia da 0 a 100 kHz con parametri disposti come in figura e con i valori a fianco indicati (sono gli stessi della pagina precedente).



parametri	variabile		L	C	G = $\frac{1}{R}$			Z
valori	f	$\omega$	2 mH	4 nF	2 mS	$\varphi$	B	$\frac{1}{Y}$
grandezze	kHz	$10^3 \text{ rad/sec}$	BL	Bc	Y	arc tg	$\frac{B}{G}$	$\Omega$
elementi di calcolo			$\frac{1}{\omega L}$	$\omega C$	$X_C - X_L$	$\sqrt{G^2 + B^2}$		
unità di misura			mS	mS	mS	mS		
			0	0	$\infty$	0	$\infty$	0
			10	62.8	7.95	0.25	-7.7	7.95
			20	125.6	3.97	0.50	-3.47	4.01
			30	188.5	2.65	0.75	-1.9	2.75
			40	251.3	1.98	1.01	-0.96	2.22
			50	314.1	1.59	1.26	-0.33	2.02
			56.2	363.5	1.41	1.41	0.	2.00
			60	377.0	1.32	1.51	0.18	2.01
			70	439.8	1.13	1.76	0.63	2.09
			80	502.6	0.95	2.01	1.06	2.26
			90	565.5	0.88	2.26	1.38	2.43
			100	628.3	0.79	2.51	1.72	2.64

impedenza  
equivalente

**Osservazioni:**

Si noti in particolare e si confronti con 13.55-6.

a frequenza  $f = 0 \text{ Hz}$

la suscettanza capacitiva  $B_c$  si annulla

la suscettanza  $B_l$  è infinità

a frequenza  $f = 56.27 \text{ kHz}$

le suscettanze capacitiva  $B_c$  e induttiva  $B_l$  sono uguali

la suscettanza  $B$  si annulla

l'ammettenza  $Y$  diventa uguale alla conduttanza  $G$

l'angolo di fase si annulla

Al crescere della frequenza

la suscettanza induttiva diminuisce

la suscettanza capacitiva cresce

l'ammettenza diminuisce fino al valore della conduttanza (2 mS) (in condizioni di risonanza) e poi riprende a crescere.

Abbiamo voluto aggiungere anche i corrispondenti valori della impedenza equivalente per mostrare, come, in paragone a 13.55-6, l'impedenza assume valori inferiori (infatti qui le grandezze sono in parallelo) per crescere fino al valore della resistenza  $R$  in condizioni di risonanza (annullamento della suscettanza totale  $B$ ) e poi riprende a diminuire.

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 13	Parametri del circuito
<b>Paragrafo</b>	: 13.7	Caratteristiche a regime alternato. Equivalenze serie e parallelo
<b>Argomento</b>	: 13.70	Indice del paragrafo

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**  
**Codice**            **Pagina**  
**13.70**            **1**

## Paragrafo 13.7

# CARATTERISTICHE A REGIME ALTERNATO

### EQUIVALENZE SERIE PARALLELO

#### Indice degli argomenti e delle pagine

**arg. 13.71 — Confronti fra i valori in serie e in parallelo**

- pag. 1 — Due resistenze
- pag. 2 — Resistenza e capacità
- pag. 3 — Resistenza e induttanza
- pag. 4 — Capacità e induttanza

**arg. 13.72 — Valori equivalenti a frequenza costante**

- pag. 1 — Premesse sull'argomento
- pag. 2 — Definizione di disposizione equivalente
- pag. 3 — Geometria dimensionale delle grandezze equivalenti
- pag. 4 — Resistenza, Reattanza induttiva, Reattanza capacitiva, Induttanza
- pag. 5 — Resistenze equivalenti
- pag. 6 — Resistenza e induttanza equivalenti
- pag. 7 — Resistenza e capacità equivalenti
- pag. 8 — Induttanza e capacità equivalenti

**arg. 13.73 — Valori equivalenti a frequenza variabile**

- pag. 1 — Premessa sull'argomento
- pag. 2 —  $R + L + C$  (parallelo). Comportamento dei valori equivalenti serie
- pag. 3 —  $R \parallel L \parallel C$  (serie): Comportamento dei valori equivalenti parallelo
- pag. 4 —  $R \parallel (R + L + C)$ : Comportamento dei valori equivalenti

## DUE RESISTENZE

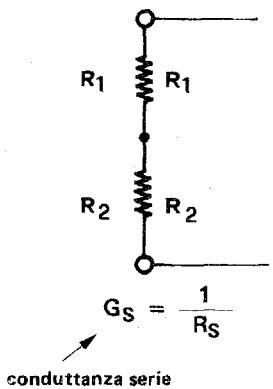
Le stesse resistenze, quando sono collegate in serie, non presentano la medesima resistenza globale che si ottiene quando sono collegate in parallelo, come è facile immaginare.

Ovviamente, sia la resistenza globale serie, che la resistenza equivalente parallelo, hanno sempre le dimensioni di una resistenza, quindi non creano alcuno sfasamento fra tensione e corrente.

Cioè l'angolo di fase  $\varphi = 0$

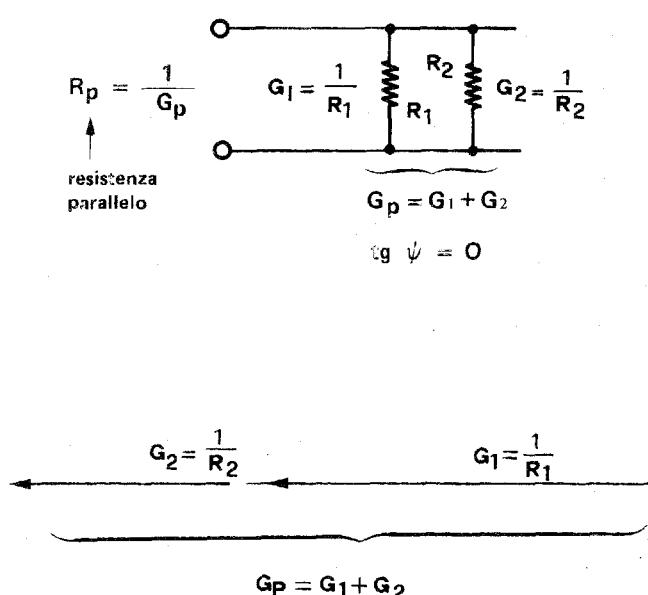
### DISPOSIZIONE SERIE

Nella disposizione serie si sommano le resistenze (13.51).



### DISPOSIZIONE PARALLELO

Nella disposizione parallelo si somma le conduttanze (13.61).



Per fare un confronto più diretto dei moduli che rappresentano la resistenza globale serie  $R_s$  e la resistenza equivalente parallelo  $R_p$ , trasformiamo la  $R_p$  in modo che compaiano le stesse grandezze che si trovano in  $R_s$ .

Cioè

$$R_s = R_1 + R_2$$

*resistenza globale serie*

$$R_p = \frac{1}{G_p} = \frac{1}{G_1 + G_2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

*resistenza equivalente parallelo*

Confrontare come, per quanti sforzi si faccia, i due valori non potranno mai essere uguali.

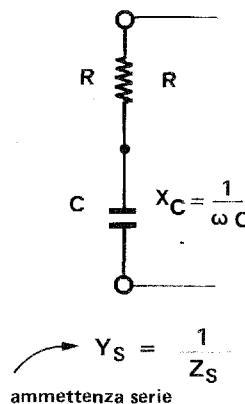
### RESISTENZA E CAPACITÀ'

Le stesse costanti del circuito, quando sono collegate in serie, non solo non presentano la medesima impedenza che si ottiene quando sono collegate in parallelo, come è facile immaginare, ma non presentano nemmeno il medesimo angolo di sfasamento fra tensione e corrente.

Dimostreremo che la tangente trigonometrica dell'angolo di fase serie è reciproca della tangente trigonometrica dell'angolo di fase parallelo.

#### DISPOSIZIONE SERIE

Nella disposizione serie la resistenza si somma vettorialmente con la reattanza capacitiva per dare una impedenza (13.55).

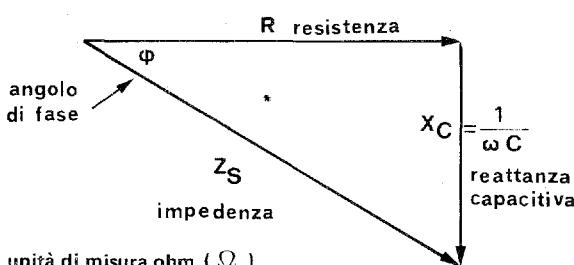


$$Z_S = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{\frac{1}{\omega C}}{R} \\ &= \frac{1}{\omega CR} \end{aligned}$$

confrontare  
impedenza parallelo

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\operatorname{tg} \psi}$$



$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ reattanza capacitiva}$$

Per fare un confronto più diretto dei moduli, ripetiamo le rispettive espressioni e trasformiamo la  $Z_p$  in modo che compaiano le stesse grandezze che si trovano in  $Z_s$ .

Cioè

$$\begin{aligned} Z_S &= \sqrt{R^2 + X_C^2} \\ \text{impedenza serie} \end{aligned}$$

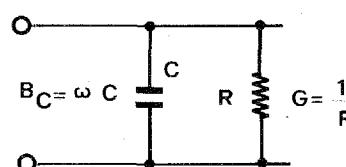
$$Z_p = \frac{1}{Y_p} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B_C^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}}} =$$

Confrontare come, per quanti sforzi si faccia, i due valori non potranno mai essere uguali

$$\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}} = \sqrt{\frac{R^2 X_C^2}{R^2 + X_C^2}}$$

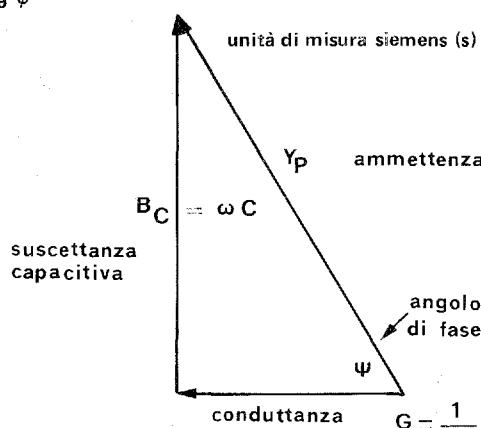
#### DISPOSIZIONE PARALLELO

Nella disposizione parallelo la conduttanza si somma vettorialmente con la suscettanza capacitativa per dare una ammettenza (13.65).



$$Y_p = \sqrt{G^2 + B_C^2}$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega C}{G} = \frac{R}{\frac{1}{\omega C}} = \omega CR$$



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

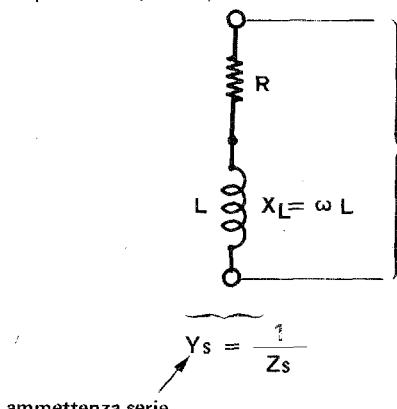
### RESISTENZA E INDUTTANZA

Le stesse costanti del circuito, quando sono collegate in serie, non solo non presentano la medesima impedenza che si ottiene quando sono collegate in parallelo, come è facile immaginare, ma non presentano nemmeno il medesimo angolo di sfasamento fra tensione e corrente.

Dimostreremo che la tangente trigonometrica dell'angolo di sfasamento serie è reciproca della tangente trigonometrica dell'angolo di fase parallelo.

#### DISPOSIZIONE SERIE

Nella disposizione serie la resistenza si somma vettorialmente con la reattanza induttiva per dare una impedenza (13.55).

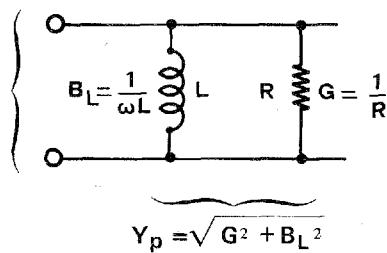


$$Z_s = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

#### DISPOSIZIONE PARALLELO

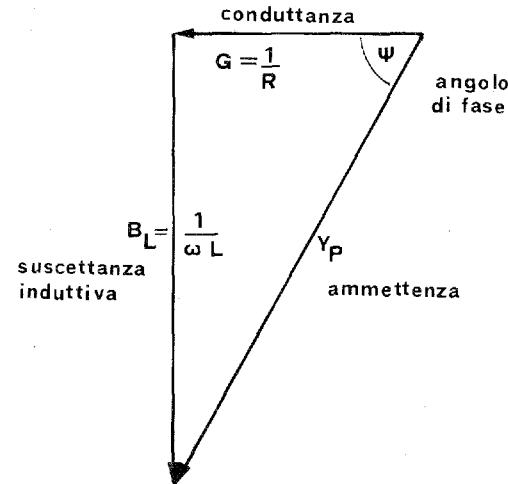
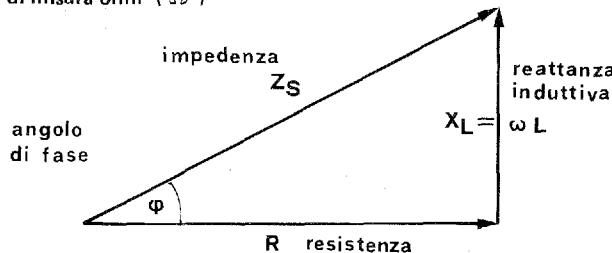
Nella disposizione parallelo la conduttanza si somma vettorialmente con la suscettanza induttiva per dare una ammettenza (13.65).



$$Y_p = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{1}{\frac{\omega L}{G}} = \frac{R}{\omega L}$$

unità di misura ohm ( $\Omega$ )



Per fare un confronto più diretto dei moduli, ripetiamo le rispettive espressioni e trasformiamo la  $Z_p$  in modo che compaiano le stesse costanti che si trovano in  $Z_s$ .

Cioè

$$Z_s = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Confrontare come, per quanti sforzi si faccia, i due valori non potranno mai essere uguali

$$Z_p = \frac{1}{Y_p} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B_L^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}} = \sqrt{\frac{R^2 X_L^2}{R^2 + X_L^2}}$$

Era ovvio, ma queste cose è sempre meglio metterle bene in chiaro.

Nessuno mette in dubbio infatti che due resistenze collegate in serie o collegate in parallelo, presentano due valori globali ben diversi.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
13.71	4	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.7	Caratteristiche a regime alternato: Equivalenze serie e parallelo
		Argomento : 13.71	Confronti fra i valori in serie e in parallelo

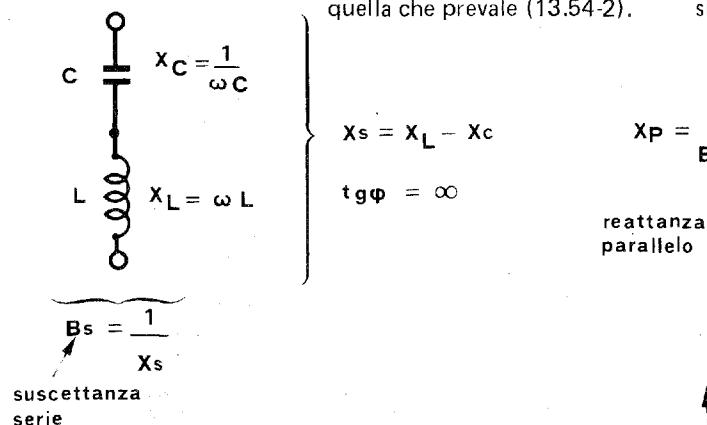
**CAPACITA' E INDUCTANZA**

Le stesse costanti reattive del circuito, quando sono collegate in serie, non presentano la stessa reattanza globale che si ottiene quando sono collegate in parallelo, come è facile immaginare.

Ovviamente, sia la reattanza globale serie, che la reattanza equivalente parallelo, hanno sempre le dimensioni di una resistenza, e perciò mantengono lo sfasamento di  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  rad) fra tensione e corrente.

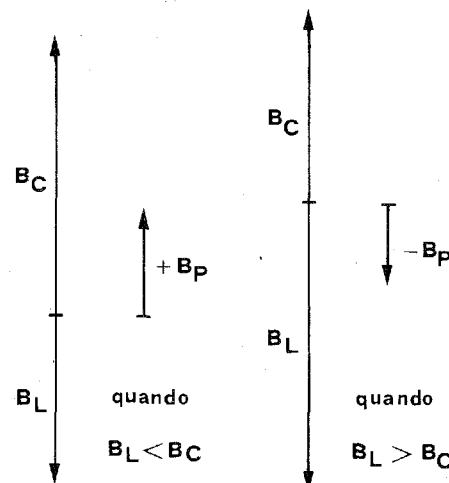
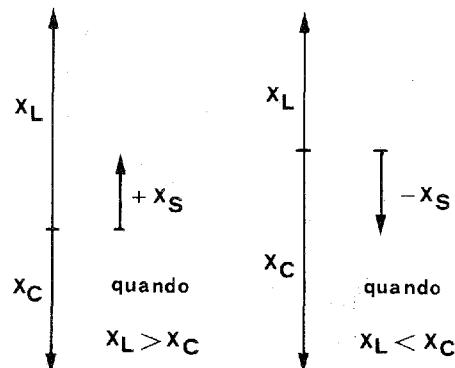
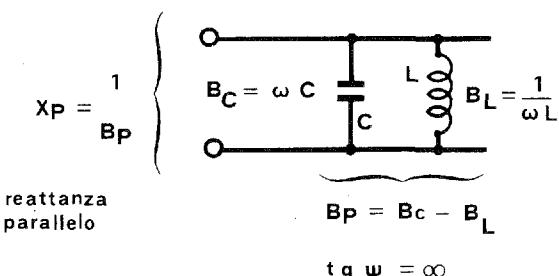
**DISPOSIZIONE SERIE**

Nella disposizione serie la differenza fra le reattanze capacitive e induttiva da una reattanza simile a quella che prevale (13.54-2).



**2 DISPOSIZIONE PARALLELO**

Nella disposizione parallelo la differenza fra le suscettanze capacitive e induttiva da una suscettanza simile a quella che prevale (13.64-2)



Per fare un confronto diretto dei moduli che rappresentano la reattanza globale serie  $X_s$  e la reattanza equivalente parallelo  $X_p$ , trasformiamo la  $X_p$  in modo che vi compaiano le stesse grandezze che si trovano in  $X_s$ .

Cioè

$$X_s = X_L - X_C$$

$$X_p = \frac{1}{B_p} = \frac{1}{B_C - B_L} = \frac{1}{\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}} =$$

reattanza globale serie

$$X_p = \frac{X_C - X_L}{X_L - X_C}$$

Caso particolare: **Risonanza**

reattanza globale parallelo

Si ottiene quando

$$X_L = X_C$$

In questo caso il circuito risuona sia collegato in serie che in parallelo, ma con la seguente differenza:

- con il collegamento in serie presenta reattanza  $X_s = 0$  (suscettanza  $B_s = \infty$ )
- con il collegamento in parallelo presenta reattanza  $X_p = \infty$  (suscettanza  $B_p = 0$ )

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 13	Parametri del circuito
<b>Paragrafo</b>	: 13.7	Caratteristiche a regime alternato. Equivalenze serie e parallelo
<b>Argomento</b>	: 13.72	Valori equivalenti a frequenza costante <span style="float: right;">★</span>

### PREMESSE SULL'ARGOMENTO

Incominciamo a tirare le somme per un momento sullo svolgimento degli argomenti precedenti.

Nei paragrafi precedenti abbiamo imparato a calcolare il valore corrispondente all'insieme delle grandezze disposte in serie e di grandezze disposte in parallelo.

Nel paragrafo precedente, ci siamo limitati a fare dei confronti fra il valore risultante di grandezze disposte in serie con il valore delle medesime grandezze disposte in parallelo e abbiamo sottolineato l'enorme differenza fra i valori risultanti.

In questo argomento analizzeremo invece il problema inverso. Avendo grandezze disposte in serie, come si deve modificare il valore se le voglio disporre in parallelo in modo da ottenere il medesimo risultato e, avendo grandezze disposte in parallelo, come si deve modificarne il valore se le voglio disporre in serie senza modificargli il valore complessivo.

Il buon apprendimento di questa tecnica operativa è indispensabile quando si devono calcolare i valori equivalenti di grandezze complessamente disposte cioè dove siano presenti contemporaneamente grandezze disposte sia in serie che in parallelo.

E' evidente che se ho due grandezze in parallelo, che si trovano in serie ad altre, è indispensabile che quelle siano trasformate in equivalenti serie se le voglio comporre con queste e viceversa.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
13.72	2	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.7	Grandezze a regime alternato. Equivalenze serie e parallelo

Argomento : 13.72 Valori equivalenti a frequenza costante



**DEFINIZIONE DI DISPOSIZIONE EQUIVALENTE**

Due disposizioni si dicono equivalenti quando presentano la medesima impedenza, comunque siano disposte le grandezze nel loro interno.

E' evidente per definizione, che se presentano la medesima impedenza, presentano anche la medesima ammettenza essendo

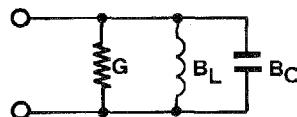
$$\text{L'ammettenza (in siemens)} \quad Y = \frac{1}{Z} \quad \text{L'inverso dell'impedenza (in ohm)}$$

Casi particolari interessanti si hanno quando si deve passare da un circuito serie ad uno equivalente parallelo e viceversa.

E' comodo per fare i calcoli e per fissare i concetti, l'uso del seguente

**DIAGRAMMA VETTORIALE DEI CIRCUITI EQUIVALENTI**

**DISPOSIZIONI PARALLELO**



**Semipiano delle ammettenze**

Unità di misura: **siemens (S)**  
(di cui si stabilisce una scala conveniente)

In questo quadrante  
giacciono i vettori che  
rappresentano le  
**ammettenze**  
**le suscettanze capacitive**  
**e le conduttanze**

$$Y = \frac{1}{Z}$$

ammettenza

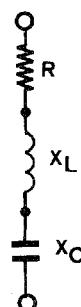
- G

**Le conduttanze**  
giacciono su questa  
semiretta o in direzione ad essa  
parallela per comporre le  
ammettenze  
da questa parte

In questo quadrante  
giacciono i vettori che  
rappresentano le  
**ammettenze**  
**le suscettanze induttive**  
**e le conduttanze**

+ B<sub>C</sub>      + B<sub>L</sub>

**DISPOSIZIONI SERIE**



**Semipiano delle impedenze**

Unità di misura: **ohm ( $\Omega$ )**  
(di cui si stabilisce una scala conveniente)

In questo quadrante  
giacciono i vettori che  
rappresentano le  
**impedenze**  
**le reattanze induttive**  
**e le resistenze**

Da questa parte  
Giacciono su questa  
semiretta o in direzioni  
ad essa parallele per  
comporre le impedenze  
e le resistenze

$$\text{impedenza}$$

$$Z = \frac{1}{Y}$$

R

Da questa parte  
Giacciono su questa semiretta  
o in direzione ad essa parallela  
per comporre le ammettenze  
e le suscettanze capacitive

Le reattanze induttive  
Giacciono su questa  
semiretta o in direzione  
ad essa parallela per  
comporre le impedenze  
da questa parte

Da questa parte  
Giacciono su questa semiretta  
o in direzione ad essa  
parallela per comporre le  
impedenze da questa parte

Le reattanze capacitive  
Giacciono su questa semiretta  
o in direzione ad essa  
parallela per comporre le  
impedenze da questa parte

- B<sub>L</sub>      - X<sub>C</sub>



### GEOMETRIA DIMENSIONALE DELLE GRANDEZZE EQUIVALENTI

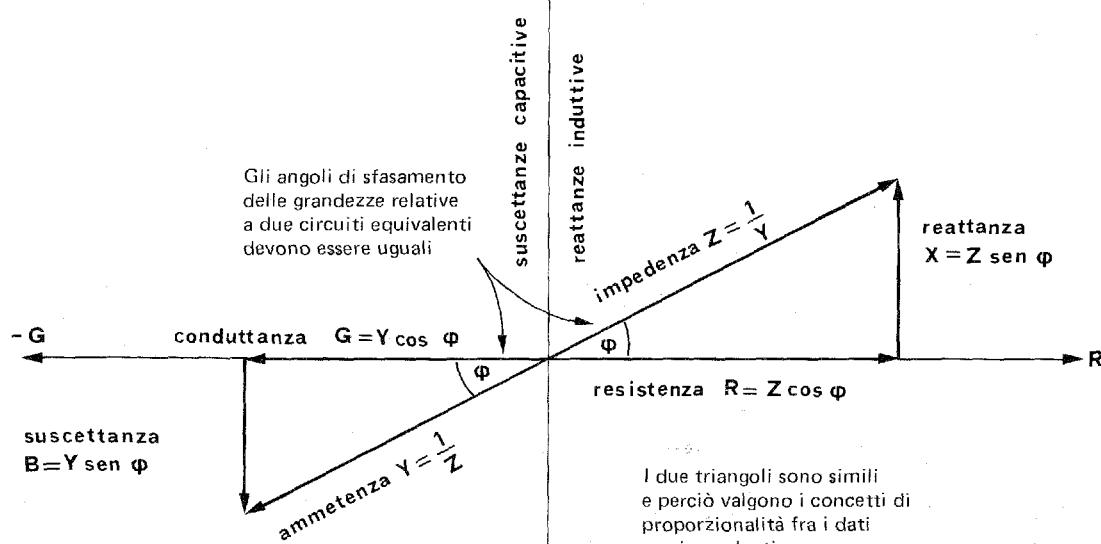
#### DIAGRAMMA VETTORIALE DEI CIRCUITI EQUIVALENTI

##### DISPOSIZIONE EQUIVALENTE PARALLELO

$+B_C$      $+X_L$

L'ammittenza di un circuito equivalente parallelo è uguale all'inverso dell'impedenza del circuito equivalente serie

$$Y = \frac{1}{Z}$$



Scriviamo i valori delle componenti del circuito equivalente parallelo in funzione delle grandezze del circuito equivalente serie

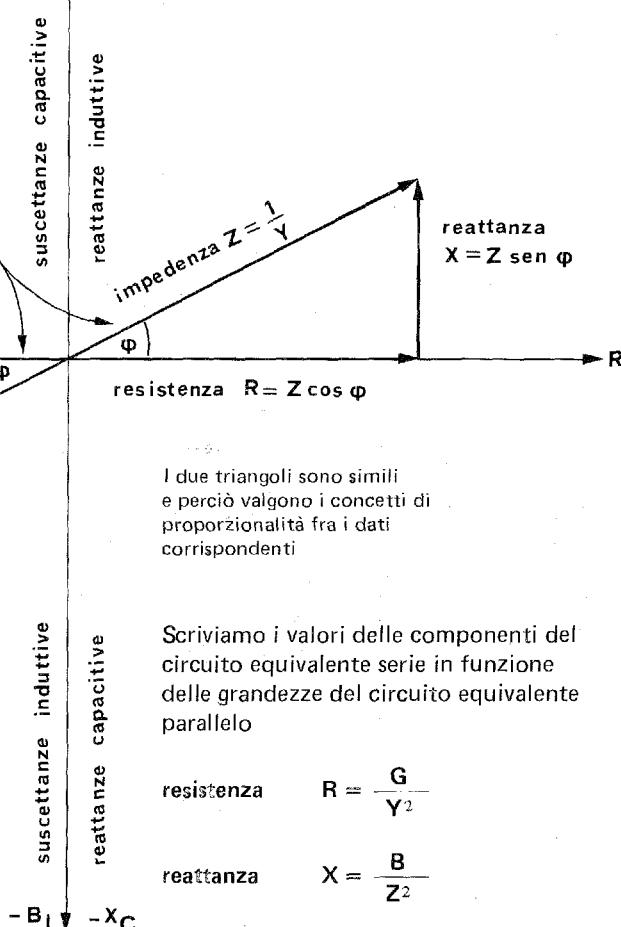
$$\text{conduttanza } G = \frac{R}{Z^2}$$

$$\text{suscettanza } B = \frac{Y}{Z^2}$$

##### DISPOSIZIONE EQUIVALENTE SERIE

L'impedenza di un circuito equivalente serie è uguale all'inverso dell'ammittenza del circuito equivalente parallelo

$$Z = \frac{1}{Y}$$



Scriviamo i valori delle componenti del circuito equivalente serie in funzione delle grandezze del circuito equivalente parallelo

$$\text{resistenza } R = \frac{G}{Y^2}$$

$$\text{reattanza } X = \frac{B}{Z^2}$$

La dimostrazione è legata alle uguaglianze (similitudine dei triangoli)

$$\sin \varphi = \frac{B}{Y} = \frac{X}{Z} \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{G}{Y}$$

tenendo presente che deve essere

$$Y = \frac{1}{Z} \quad \text{e} \quad Z = \frac{1}{Y}$$

**Osservazione:** Qualsiasi circuito misto può essere trasformato in equivalente serie o equivalente parallelo.

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1	Grandezze fondamentali
13.72	4	Capitolo : 13	Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.7	Grandezze a regime alternato: Equivalenze serie e parallelo
		Argomento : 13.72	Valori equivalenti a frequenza costante



**RESISTENZA, REATTANZA INDUTTIVA, REATTANZA CAPACITIVA, INDUTTANZA E CAPACITA'**

**Disposizione RLC equivalente parallelo**

Abbiamo visto che le grandezze del circuito parallelo, espresse mediante quelle del circuito equivalente serie, sono le seguenti:

$$\text{conduttanza } G_p = \frac{R_s}{Z^2} \quad (\text{siemens})$$

$$\text{suscettanza } B_p = \frac{X_s}{Z^2} \quad (\text{siemens})$$

$$\text{ammittenza } Y = \frac{1}{Z} \quad (\text{siemens})$$

Date le costanti di un circuito serie,

$$\text{resistenza serie } R_s \quad (\text{ohm})$$

$$\text{induttanza serie } L_s \quad (\text{henry})$$

$$\text{capacità serie } C_s \quad (\text{farad})$$

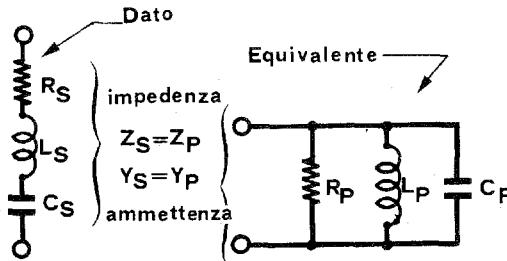
si tratta ora di ricercare il valore delle nuove costanti del circuito equivalente parallelo

Avremo cioè:

$$\text{resistenza equivalente parallelo } R_p \quad (\text{ohm})$$

$$\text{induttanza equivalente parallelo } L_p \quad (\text{henry})$$

$$\text{capacità equivalente parallelo } C_p \quad (\text{farad})$$



Le relazioni finali sono:

$$\text{resist. equiv. parall. } R_p = \frac{Z^2}{R_s}$$

$$\text{indutt. equiv. parall. } L_p = \frac{Z^2}{\omega^2 L_s}$$

$$\text{capac. equiv. parall. } C_p = \frac{1}{\omega^2 Z^2 C_s}$$

**Disposizione RLC equivalente serie**

Abbiamo visto che le grandezze del circuito serie, espresse mediante quelle del circuito equivalente parallelo sono le seguenti:

$$\text{resistenza } R_s = \frac{G_p}{Y^2}$$

$$\text{reattanza } X_s = \frac{B_p}{Y^2}$$

$$\text{impedenza } Z = \frac{1}{Y}$$

Date le costanti di un circuito parallelo,

$$\text{resistenza parallelo } R_p \quad (\text{siemens})$$

$$\text{induttanza parallelo } L_p \quad (\text{henry})$$

$$\text{capacità parallelo } C_p \quad (\text{farad})$$

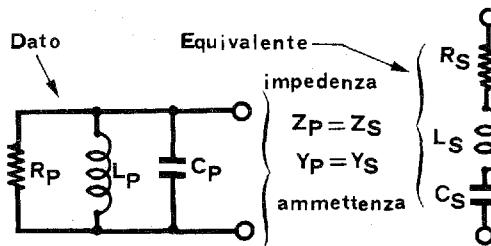
si tratta ora di ricercare il valore delle nuove costanti del circuito equivalente serie.

Avremo cioè:

$$\text{resistenza equivalente serie } R_s \quad (\text{ohm})$$

$$\text{induttanza equivalente serie } L_s \quad (\text{henry})$$

$$\text{capacità equivalente serie } C_s \quad (\text{farad})$$



Le relazioni finali sono:

$$\text{resist. equiv. serie } R_s = \frac{Z^2}{R_p}$$

$$\text{indutt. equiv. serie } L_s = \frac{Z^2}{\omega^2 R_p}$$

$$\text{capac. equiv. serie } C_s = \frac{1}{\omega^2 Z^2 R_p}$$

La dimostrazione è semplice: si parte dalle relazioni iniziali tenendo presente che:

$$Z = Z_p = Z_s \quad Y = Y_p = Y_s \quad G_p = \frac{1}{R_p} \quad B_p = \frac{1}{X_p}$$

Inoltre ogni reattanza fornisce le due versioni: induttiva e capacitiva

$$X_p = \frac{1}{\omega C_p} \quad (\text{capacitiva parallelo})$$

$$= \omega L_p \quad (\text{induttiva parallelo})$$

$$X_s = \frac{1}{\omega C_s} \quad (\text{capacitiva serie})$$

$$= \omega L_s \quad (\text{induttiva serie})$$

**Attenzione:** Le equivalenze valgono per una sola frequenza.



### RESISTENZE EQUIVALENTI

E' un caso particolare di quanto trattato nella pagina precedente, quando vengono a mancare l'induttanza e la capacità.

#### Resistenze equivalenti parallelo

Potrebbe sembrare inutile dover sostituire alcune resistenze in serie con un ugual numero di resistenze equivalenti in parallelo.

Infatti, con una sola resistenza di valore pari alla somma dei valori delle singole, si potrebbe raggiungere lo stesso scopo.

Può succedere invece che:

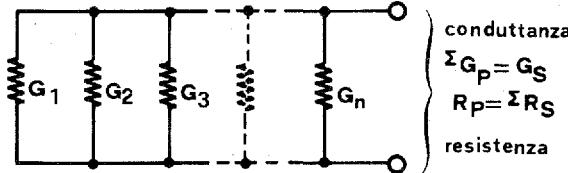
- a) ogni resistenza in serie può variare per effetto di altri parametri e può essere interessante studiare l'effetto di ciascuna in un circuito equivalente parallelo.
- b) possa interessare lo studio di un circuito parallelo dove le correnti corrispondenti risultino proporzionali a rispettive tensioni in un circuito serie.

Anche in questo caso è indispensabile che i due circuiti siano equivalenti.

Per la determinazione dei valori equivalenti, valgono ancora le relazioni esposte in 13.93-2 che qui vengono modificate per tener conto che:

In un circuito composto da sole resistenze in parallelo, l'ammettenza è uguale alla somma delle conduttanze  $\Sigma G$ , cioè

$$Y = \Sigma G_P$$



Perciò, per ogni resistenza equivalente serie  $R_{sn}$ , corrisponde una conduttanza equivalente parallelo

$$G_{pn} = \frac{R_{sn}}{(\Sigma R_s)^2}$$

oppure una  
**resistenza equivalente parallelo**

$$R_{pn} = \frac{(\Sigma R_s)^2}{R_{sn}}$$

**N.B. —** L'angolo di sfasamento è nullo  $\varphi = 0$  (tensioni e correnti sono in fase).

**Attenzione:** Per le sole resistenze e conduttanze, cioè quando non si trovano reattanze nel circuito in esame, l'equivalenza è indipendente dalla frequenza.

#### Resistenze equivalenti serie

Potrebbe sembrare inutile dover sostituire alcune resistenze in parallelo con un ugual numero di resistenze equivalenti in serie.

Infatti, con una sola resistenza la cui conduttanza sia di valore pari alla somma delle singole conduttanze, si potrebbe raggiungere lo stesso scopo.

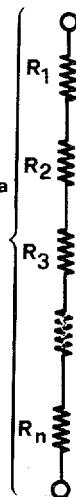
Può succedere invece che:

- a) ogni resistenza in parallelo può variare per effetto di altri parametri e può essere interessante studiare l'effetto di ciascuna in un circuito equivalente serie.
- b) possa interessare lo studio di un circuito serie dove le tensioni corrispondenti risultino proporzionali a rispettive correnti in un circuito parallelo.

Anche in questo caso è indispensabile che i due circuiti siano equivalenti.

in un circuito composto da sole resistenze in serie, l'impedenza è uguale alla somma delle resistenze  $\Sigma R$ , cioè

$$Z = \Sigma R_s$$



Perciò, per ogni parallelo equivalente parallelo  $G_{pn}$  corrisponde una resistenza equivalente serie

$$R_{sn} = \frac{G_{pn}}{(\Sigma G_p)^2}$$

oppure una  
**conduttanza equivalente serie**

$$G_{sn} = \frac{(\Sigma G_p)^2}{G_{pn}}$$



### RESISTENZA E INDUCTANZA EQUIVALENTE

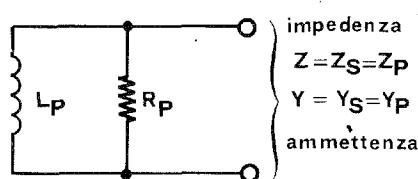
E' un caso particolare dell'argomento 13.94-1 quando prevale la reattanza o la suscettanza induttiva, oppure quando manca la capacità.

#### Circuito RL equivalente parallelo

Un circuito **RL** equivalente parallelo deve avere la stessa ammettenza **Y**

$$(o \text{ la stessa impedenza } Z = \frac{1}{Y})$$

di un circuito **RL** serie o a disposizione mista



Se il circuito da trasformare è di tipo serie, si avrà il seguente

#### Riassunto dati

frequenza  $f$  (cicli/sec o hertz)

resistenza serie  $R_s$  (ohm)

induttanza serie  $L_s$  (henry)

pulsazione  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec)

reattanza indutt. serie  $X_{Ls} = \omega L_s$  (ohm)

resistenza serie  $R_s$  (ohm)

impedenza  $Z = \sqrt{Z_{Ls}^2 + R_s^2}$  (ohm)

angolo di sfasamento  $\varphi = \arctg \frac{X_{Ls}}{R_s}$

#### Circuito RL equivalente serie

Un circuito **RL** equivalente serie deve avere la stessa impedenza **Z**

$$(o \text{ la stessa ammettenza } Y = \frac{1}{Z})$$

di un circuito **RL** parallelo o a disposizione mista.



Se il circuito da trasformare è di tipo parallelo, si avrà il seguente

#### Riassunto dati

frequenza  $f$  (cicli/sec o hertz)

resistenza parallelo  $R_p$  (ohm)

induttanza parallelo  $L_p$  (henry)

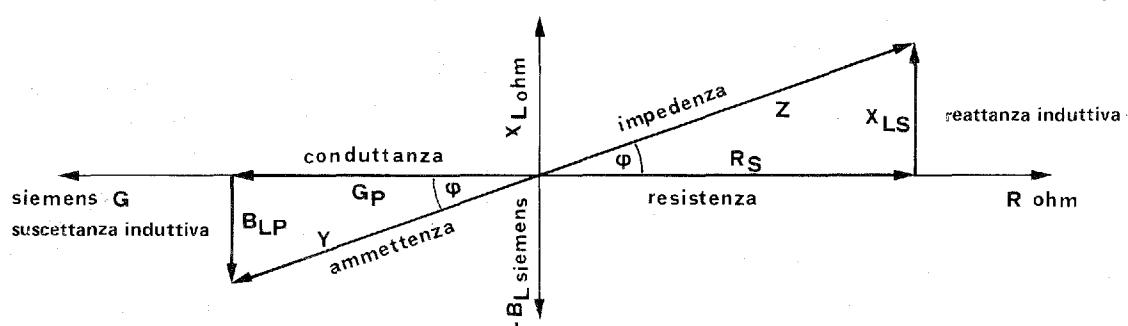
pulsazione  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec)

suscettanza indutt. parall.  $B_{LP} = \frac{1}{\omega L_p}$  (siemens)

conduttanza parall.  $G_p = \frac{1}{R_p}$  (siemens)

ammettenza  $Y = \sqrt{B_{LP}^2 + G_p^2}$  (siemens)

angolo di sfasamento  $\varphi = \arctg \frac{B_{LP}}{G_p}$



#### Grandezze risultanti

$$\text{ammittenza parallelo } Y = \frac{1}{Z}$$

$$\text{conduttanza parallelo } G_p = \frac{R_s}{Z^2}$$

$$\text{suscettanza indutt. parall. } B_{LP} = \frac{X_{Ls}}{Z^2}$$

#### Grandezze risultanti

$$\text{impedenza serie } Z = \frac{1}{Y}$$

$$\text{resistenza serie } R_s = \frac{G_p}{Y^2}$$

$$\text{reattanza induttiva serie } X_{Ls} = \frac{B_{LP}}{Y^2}$$

#### Costanti risultanti

$$\text{resistenza parallelo } R_p = \frac{Z^2}{R_s}$$

$$\text{induttanza parallelo } L_p = \frac{Z^2}{\omega^2 L_s}$$

#### Costanti risultanti

$$\text{resistenza serie } R_s = \frac{Z^2}{R_p}$$

$$\text{induttanza serie } L_s = \frac{Z^2}{\omega^2 R_p}$$



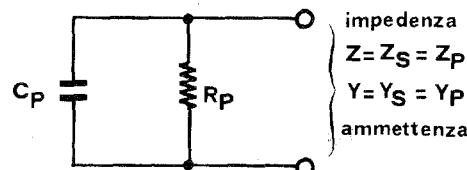
### RESISTENZA E CAPACITÀ EQUIVALENTE

E' un caso particolare dell'argomento 13.94-1 quando prevale la reattanza o suscettanza capacitiva, oppure quando manca l'induttanza.

#### Circuito RC equivalente parallelo

Un circuito **RC** equivalente deve avere la stessa ammettenza **Y**  
 (o la stessa impedenza  $Z = \frac{1}{Y}$ )

di un circuito **RC** serie o a disposizione mista.



Se il circuito da trasformare è di tipo serie, si avrà il seguente

#### Riassunto dati

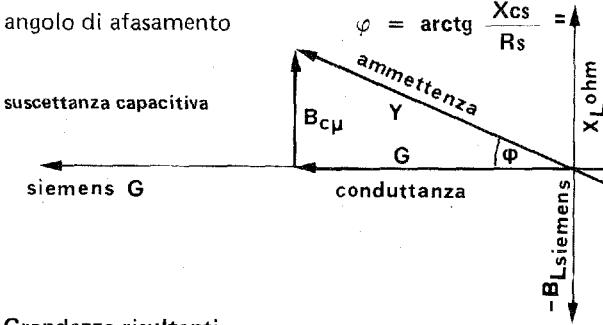
frequenza  $f$  (cicli/sec o hertz)  
 resistenza serie  $R_s$  (ohm)  
 capacità serie  $C_s$  (farad)  
 pulsazione  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec)

$$\text{reattanza capac. serie } X_{cs} = \frac{1}{\omega C_s} \text{ (ohm)}$$

$$\text{resistenza serie } R_s \text{ (ohm)}$$

$$\text{impedenza } Z = \sqrt{X_{cs}^2 + R_s^2} \text{ (ohm)}$$

angolo di afasamento



#### Grandezze risultanti

$$\begin{aligned} \text{ammettenza parallelo } Y &= \frac{1}{Z} \\ \text{conduttanza parallelo } G_p &= \frac{R_s}{Z^2} \\ \text{suscettanza capacit. parall. } B_{cp} &= \frac{X_{cs}}{Z^2} \end{aligned}$$

#### Parametri risultanti

$$\begin{aligned} \text{resistenza parallelo } R_p &= \frac{Z^2}{R_s} \\ \text{capacità parallelo } C_p &= \frac{1}{\omega^2 Z^2 C_s} \end{aligned}$$

#### Circuito RC equivalente serie

Un circuito **RC** equivalente serie deve avere la stessa impedenza **Z**  
 (o la stessa ammettenza  $Y = \frac{1}{Z}$ )

di un circuito parallelo **RC** o a disposizione mista.



Se il circuito da trasformare è di tipo parallelo, si avrà il seguente

#### Riassunto dati

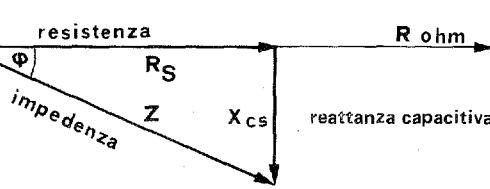
frequenza  $f$  (cicli/sec o hertz)  
 resistenza parallelo  $R_p$  (ohm)  
 capacità parallelo  $C_p$  (farad)  
 pulsazione  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec)

$$\text{suscettanza capac. par. } B_{cp} = \omega C_p \text{ (siemens)}$$

$$\text{conduttanza parallelo } G_p = \frac{1}{R_p} \text{ (siemens)}$$

$$\text{ammettenza } Y = \sqrt{B_{cp}^2 + G_p^2} \text{ (siemens)}$$

$$\text{angolo di sfasamento } \varphi = \arctg \frac{B_{cp}}{G_p}$$



#### Grandezze risultanti

$$\begin{aligned} \text{impedenza serie } Z &= \frac{1}{Y} \\ \text{resistenza serie } R_s &= \frac{Y^2}{G_p} \\ \text{reattanza capacitiva serie } X_{cs} &= \frac{B_{cp}}{Y^2} \end{aligned}$$

#### Parametri risultanti

$$\begin{aligned} \text{resistenza serie } R_s &= \frac{Z^2}{R_p} \\ \text{capacità serie } C_s &= \frac{1}{\omega^2 Z^2 G_p} \end{aligned}$$

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

Codice	Pagina	Sezione : 1. Grandezze fondamentali
13.72	8	Capitolo : 13 Parametri del circuito
		Paragrafo : 13.7 Grandezze a regime alternato: Equivalenze serie parallelo
		Argomento : 13.72 Valori equivalenti a frequenza costante



### INDUTTANZA E CAPACITÀ EQUIVALENTE

E' un caso particolare dell'argomento 13.94-1 quando viene a mancare la resistenza.

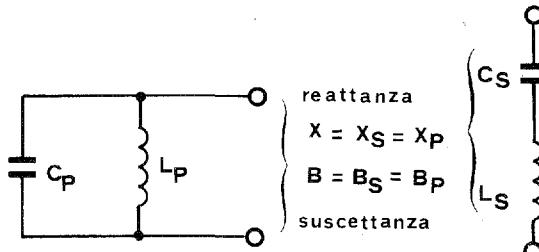
In ogni caso, l'angolo di sfasamento fra tensioni e correnti è sempre retto. Cioè  $\varphi = \left(-\frac{\pi}{2}\right)$  in anticipo o in ritardo a seconda del prevalere dell'una o dell'altra reattanza.

#### Circuito LC equivalente parallelo

Un circuito **LC** equivalente parallelo deve avere la stessa suscettanza **B**

$$(o la stessa reattanza X = \frac{1}{B})$$

di un circuito **LC** serie o a disposizione mista.



Se il circuito da trasformare è di tipo serie, si avrà il seguente

#### Riassunto dati

frequenza	$f$	(cicli/sec o hertz)
induttanza serie	$L_s$	(henry)
capacità serie	$C_s$	(farad)
pulsazione	$\omega = 2\pi f$	(rad/sec)
reattanza indutt. serie	$X_{Ls} = \omega L$	(ohm)
reattanza capac. serie	$X_{Cs} = \frac{1}{\omega C}$	(ohm)
reattanza totale serie	$X_s = X_{Ls} - X_{Cs}$	(ohm)
angolo di sfasamento	$\varphi = 90^\circ \left(-\frac{\pi}{2}\right)$	

#### Grandezze risultanti

$$\begin{aligned} \text{suscettanza parallelo } B_p &= \frac{1}{X_s} \\ \text{suscettanza induttiva parall. } B_{Lp} &= \frac{1}{X_{Ls}} \\ \text{suscettanza capacitiva par. } B_{Cp} &= \frac{1}{X_{Cs}} \end{aligned}$$

#### Parametri risultanti

$$\begin{aligned} \text{induttanza parallelo } L_p &= \frac{X_s^2}{\omega^2 L_s} \\ \text{capacità parallelo } C_p &= \frac{1}{\omega^2 X_s^2 C_s} \end{aligned}$$

#### Caso particolare: Risonanza (13.84-1)

Un circuito **LC** parallelo in risonanza, presenta suscettanza  $B = 0$  (reattanza  $X = \infty$ ).

E' impossibile che possa risuonare presentando suscettanza  $B = \infty$ !

- vedi anche 13.92-2

#### Circuito LC equivalente serie

Un circuito **LC** equivalente serie deve avere la stessa reattanza **X**

$$(o la stessa suscettanza B = \frac{1}{X})$$

di un circuito **LC** parallelo o a disposizione mista.

Questo discorso è possibile per il fatto che, in questo circuito, la impedenza si identifica con la reattanza.

Se il circuito da trasformare è di tipo parallelo, si avrà il seguente

#### Riassunto dati

frequenza	$f$	(cicli/sec o hertz)
induttanza parallelo	$L_p$	(henry)
capacità parallelo	$C_p$	(farad)
pulsazione	$\omega = 2\pi f$	(rad/sec)
suscettanza ind. parall. $B_{Lp} = \frac{1}{\omega L_p}$		(siemens)
suscettanza cap. parall. $B_{Cp} = \omega C_p$		(siemens)
suscettanza tot. parall. $B_p = B_{Lp} + B_{Cp}$		(siem)
angolo di sfasamento $\varphi = 90^\circ \left(\frac{\pi}{2}\right)$		

#### Grandezze risultanti

$$\begin{aligned} \text{reattanza serie } X_s &= \frac{1}{B_p} \\ \text{reattanza induttiva serie } X_{Ls} &= \frac{1}{B_{Lp}} \\ \text{reattanza capacitiva serie } X_{Cs} &= \frac{1}{B_{Cp}} \end{aligned}$$

#### Parametri risultanti

$$\begin{aligned} \text{induttanza serie } L_s &= \frac{X_s^2}{\omega^2 L_p} \\ \text{capacità serie } C_s &= \frac{1}{\omega^2 X_s^2 C_p} \end{aligned}$$

#### Caso particolare: Risonanza (13.74-1)

Un circuito **LC** serie in risonanza presenta reattanza  $X = 0$  (suscettanza  $B = \infty$ ).

E' impossibile che possa risuonare presentando reattanza  $X = \infty$ !

- vedi anche 13.92-2.

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali	
<b>Capitolo</b>	: 13	Parametri del circuito	
<b>Paragrafo</b>	: 13.7	Grandezze a regime alternato	★
<b>Argomento</b>	: 13.73	Valori equivalenti a frequenza variabile	★

### PREMESSE SULL'ARGOMENTO

Rivediamo ancora per un momento l'argomento appena svolto riassumendo la situazione.

Abbiamo analizzato come dobbiamo modificare il valore di grandezze in serie se le voglio disporre in parallelo senza modificare il valore complessivo e allo stesso modo come dobbiamo modificare il valore di grandezze in parallelo se le voglio disporre in serie.

Abbiamo già sottolineato più volte che ciò è possibile farlo solo se resta costante la frequenza dell'energia elettrica alternata cui le grandezze in questione sono sottoposte.

Al variare della frequenza tutto quanto abbiamo appena detto non è possibile, perché a causa della presenza delle reattanze che con essa variano continuerebbero a variare i risultati finali.

E' quanto studieremo sotto l'argomento che sta per iniziare.

E' interessante constatare come variano i valori equivalenti quando si mette a variare una grandezza reattiva in una certa disposizione a causa della variazione della frequenza cui il compenso è sottoposto.

E' un esercizio di elasticità mentale che metterà in guardia il lettore da sorprese nello studio dell'elettronica.

Completa l'argomento uno studio su una disposizione mista di grandezze prima a frequenza costante e infine a frequenza variabile.

Questo studio è stato raccolto in un paragrafo separato (13.8).

### SIMBOLOGIA

Cominciamo ad abituarci all'algoritmo algebrico (cioè al modo di rappresentare brevemente i concetti usando i modi dell'algebra) per rappresentare le disposizioni delle grandezze circuituali e degli elementi del circuito che le caratterizzano.

L'algoritmo della moltiplicazione, cioè l'accostamento dei simboli fra loro, significherà per noi: disposizione in serie delle grandezze e dei relativi elementi.

L'algoritmo della addizione, cioè l'interposizione del segno più (+) fra i simboli accostati, significherà per noi: disposizione in parallelo delle grandezze o dei relativi elementi.

**Esempi:**

**RLC** significa che le tre grandezze sono disposte in serie

**R + L + C** significa che le tre grandezze sono disposte in parallelo

**R (L + C)** significa che **R** è in serie a **L + C** le quali due sono in parallelo fra loro

**R + LC** significa che **R** è in parallelo a **LC** le quali due sono in serie fra loro

Tutta una casistica è contemplata negli argomenti che seguono.

**Nota:** L'abitudine a questi algoritmi faciliterà molto più avanti l'apprendimento dell'Algebra di Boole per i circuiti logici, ma

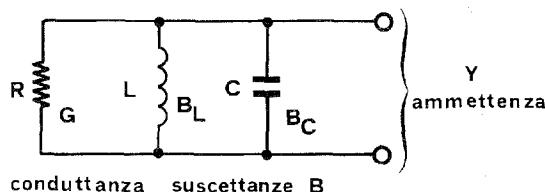
**Attenzione:** perchè in questo nostro sistema non si può operare come nell'algebra applicando le proprietà distributiva, associativa, ecc.

### R + L + C (PARALLELO): COMPORTAMENTO DEI VALORI EQUIVALENTI SERIE

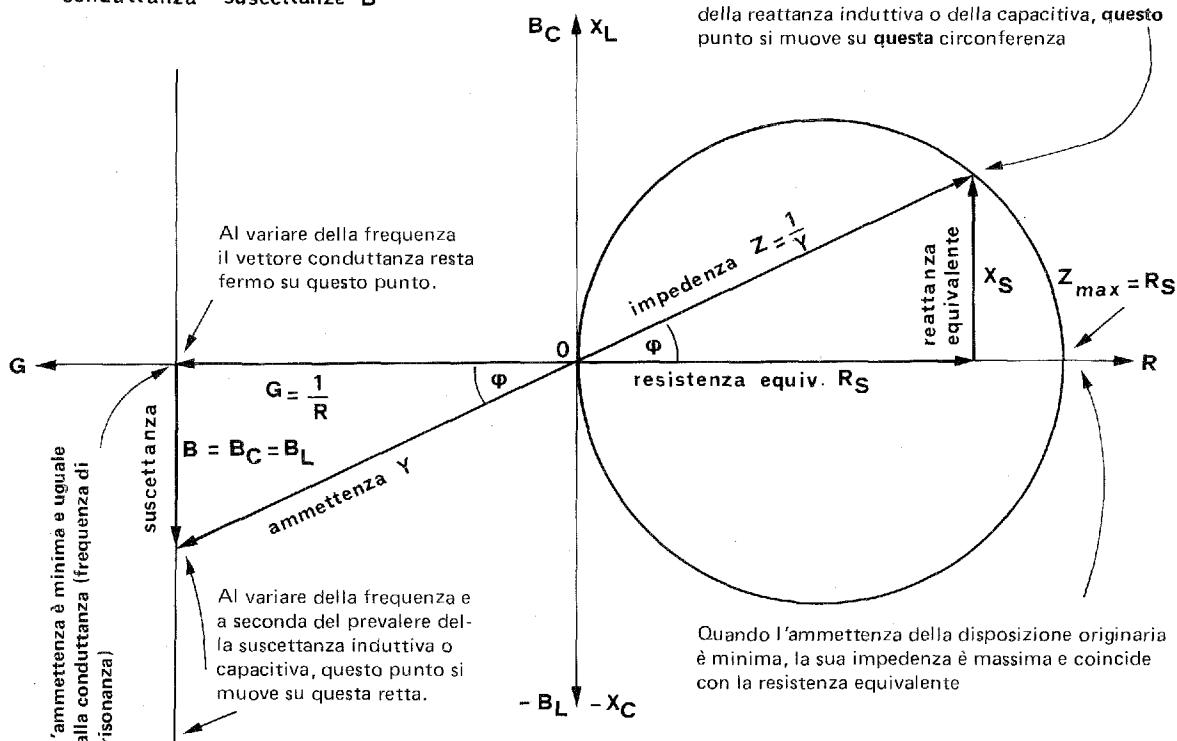
Esaminiamo il comportamento di una disposizione equivalente serie al variare della frequenza nella disposizione originaria parallelo.

Per i concetti fondamentali, vedansi gli argomenti e i paragrafi precedenti.

#### DISPOSIZIONE ORIGINARIA PARALLELO



#### DIAGRAMMA DELLE EQUIVALENZE



Quando l'ammettenza della disposizione originaria è minima, la sua impedenza è massima e coincide con la resistenza equivalente

#### DISPOSIZIONE EQUIVALENTE SERIE

##### Importanti conclusioni

I valori delle costanti della disposizione originaria parallelo.

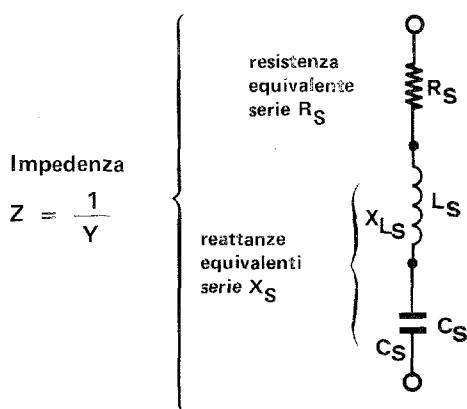
resistenza **R**, induttanza **L**, capacità **C**  
restano fermi al variare della frequenza.

Dipendono invece dalla frequenza: i valori dei parametri della disposizione equivalente serie

$$\text{Resistenza} \quad R_S = \frac{G \cdot X_S}{B}$$

$$\text{Induttanza} \quad L_S = \frac{R_S \cdot B}{\omega G}$$

$$\text{Capacità} \quad C_S = \frac{G}{\omega R_S B}$$



Osservare bene come anche il valore della resistenza equivalente serie dipende dalla frequenza a causa della presenza nella formula della suscettanza **B**.



### RLC (SERIE): COMPORTAMENTO DEI VALORI EQUIVALENTI PARALLELO

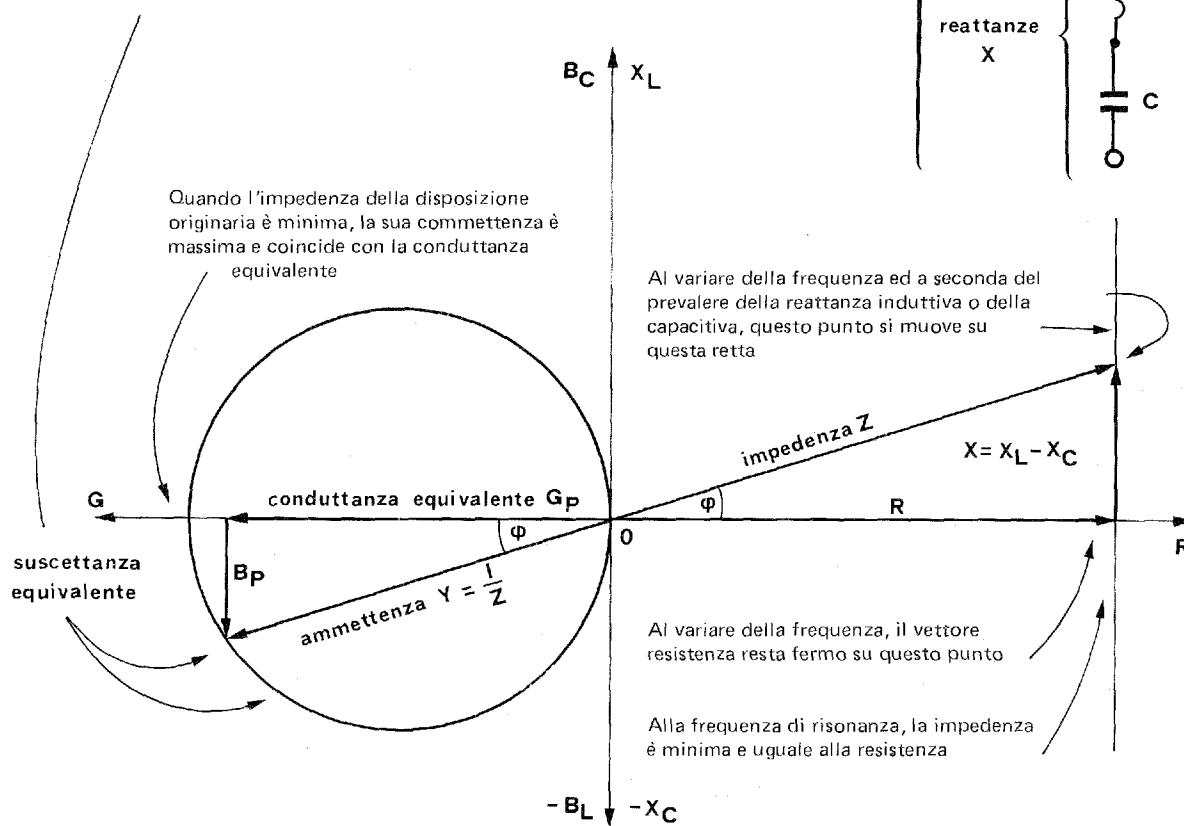
Esaminiamo il comportamento di una disposizione equivalente parallelo al variare della frequenza nella disposizione originaria serie.

Per i concetti fondamentali, vedansi gli argomenti precedenti in questo paragrafo.

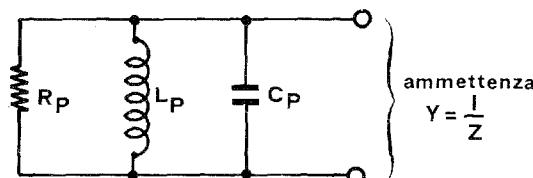
#### DISPOSIZIONE ORIGINARIA SERIE

##### DIAGRAMMA DELLE EQUIVALENZE

Al variare della frequenza ed a seconda del prevalere della suscettanza capacitiva o della induttiva, questo punto si muove su questa circonferenza



#### DISPOSIZIONE EQUIVALENTE PARALLELO



Osservare bene come anche il valore della resistenza equivalente parallelo dipende dalla frequenza a causa della presenza nella formula della suscettanza  $B_p$ .

#### Importanti conclusioni

I valori delle costanti della disposizione originaria serie:

resistenza  $R$ , induttanza  $L$ , capacità  $C$  restano fermi al variare della frequenza.

Dipendono invece dalla frequenza i valori delle costanti della disposizione equivalente parallelo.

$$\begin{aligned} \text{resistenza } R_p &= \frac{X}{R_s B_p} \\ \text{induttanza } L_p &= \frac{R}{\omega G_p X} \\ \text{capacità } C_p &= \frac{G_p X}{\omega R} \end{aligned}$$

**APPUNTI  
DI ELETTRONICA**

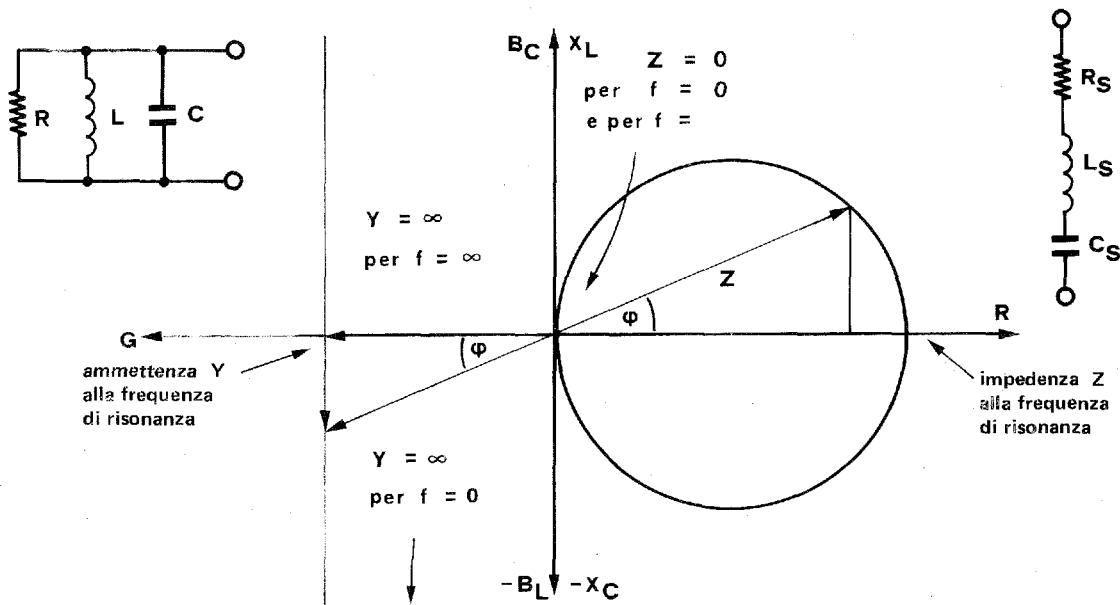
Codice 13.73

Sezione : 1	Grandezze Fondamentali
Pagina : 4	Capitolo : 13 Parametri del circuito
	Paragrafo : 13.7 Grandezze a regime alternato. Equivalenze serie e parallelo
	Argomento : 13.73 Valori equivalenti a frequenza variabile

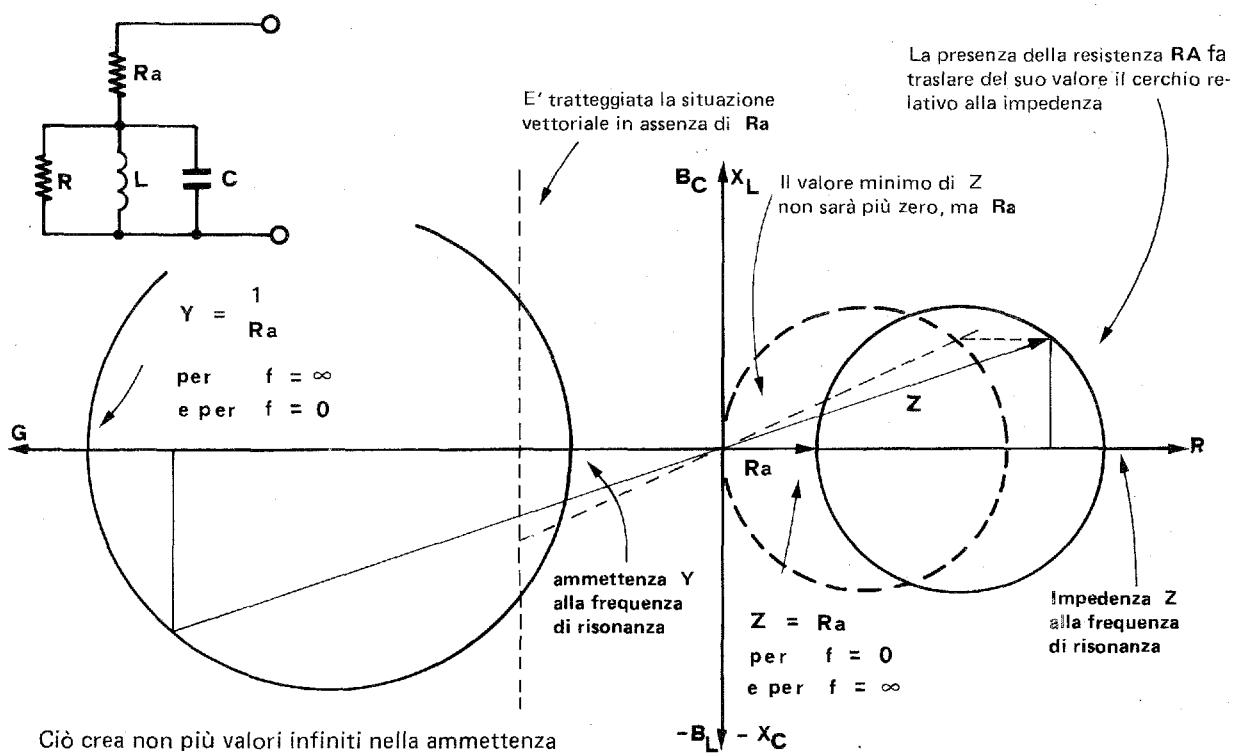


### R (R + L + C): COMPORTAMENTO DEI VALORI EQUIVALENTI

Abbiamo visto come, facendo variare la frequenza in un circuito RLC parallelo, la punta del vettore impedenza descriva un cerchio tangente all'asse verticale (vedi diagramma) e analogamente il vettore ammettenza in un circuito serie.



A fronte di quanto abbiamo visto in questo paragrafo, possiamo fare una interessante considerazione nel caso di un circuito come quello in figura dove si è aggiunto al parallelo una resistenza in serie  $R_a$ .



Ciò crea non più valori infiniti nella ammettenza per frequenza  $f = 0$  e  $f = \infty$

Sezione	:	1	Grandezze Fondamentali
Capitolo	:	13	Parametri del circuito
Paragrafo	:	13.8	Grandezze a regime alternato
Argomento	:	13.80	Indice del paragrafo



## Paragrafo 13.8

### GRANDEZZE A REGIME ALTERNATO DISPOSIZIONI MISTE

#### Indice degli argomenti e delle pagine

- arg. 13.81 — Studio completo della disposizione **C (R + L)**
  - pag. 1 — Impostazione vettoriale del calcolo
  - pag. 2 — Significati del diagramma vettoriale
  - pag. 3 — Diagramma vettoriale tensioni e correnti
  - pag. 4 — Condizioni di risonanza
  - pag. 5 — Comportamento a frequenza variabile di parametri prefissati
  - pag. 6 — Osservazioni
  
- arg. 13.82 — Studio completo della disposizione **L (R + C)**
  - pag. 1 — Impostazione vettoriale del calcolo
  - pag. 2 — Significati del diagramma vettoriale
  - pag. 3 — Diagramma vettoriale tensioni e correnti
  - pag. 4 — Condizioni di risonanza
  - pag. 5 — Comportamento a frequenza variabile di parametri prefissati
  - pag. 6 — Osservazioni
  
- arg. 13.83 — Studio completo della disposizione **C + RL**
  - pag. 1 — Impostazione vettoriale del calcolo
  - pag. 2 — Significati del diagramma vettoriale
  - pag. 3 — Diagramma vettoriale tensioni e correnti
  - pag. 4 — Condizioni di risonanza
  - pag. 5 — Comportamento a frequenza variabile di parametri prefissati
  - pag. 6 — Osservazioni
  
- arg. 13.84 — Studio completo della disposizione **L + RC**
  - pag. 1 — Impostazione vettoriale del calcolo
  - pag. 2 — Significati del diagramma vettoriale
  - pag. 3 — Diagramma vettoriale tensioni e correnti
  - pag. 4 — Condizioni di risonanza
  - pag. 5 — Comportamento a frequenza variabile di parametri prefissati
  - pag. 6 — Osservazioni

compilazione a cura del lettore per esercizio

### IMPOSTAZIONE VETTORIALE DEL CALCOLO

E' un esempio interessante di applicazione dei concetti elementari fin qui esposti.

#### DATI E SCHEMA

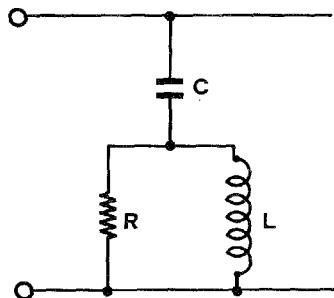
##### - Ipotesi

Sia dato questo schema di cui si conosca  
 la resistenza  $R$  in ohm ( $\Omega$ )  
 l'induttanza  $L$  in henry (H)  
 la capacità  $C$  in farad (F)  
 la frequenza  $f$  in hertz (Hz)

##### - Tesi

Determinare l'impedenza del circuito in ohm ( $\Omega$ )  
 e angolo di fase ( $^\circ$  o rad).

**Procedimento:** stabilite le scale delle ammettenze ( $S$ ) e delle impedenze ( $\Omega$ ) e determinata la pulsazione  $\omega = 2\pi f$  in rad/sec., si traccia il



### DIAGRAMMA VETTORIALE DEI CIRCUITI EQUIVALENTI

#### disposizione parallelo (ammettenze)

(1) Bisogna prima trovare l'impedenza  $Z_{RL}$  della parte di disposizione composta dalle grandezze  $R$  e  $L$ .

Poiché esse sono in parallelo, bisogna prima conoscerne la ammettenza che si compone

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

$$\text{suscettanza induttiva } B_L = \frac{1}{\omega L}$$

$$G \text{ suscettanza induttiva } B_L = \frac{1}{\omega L}$$

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

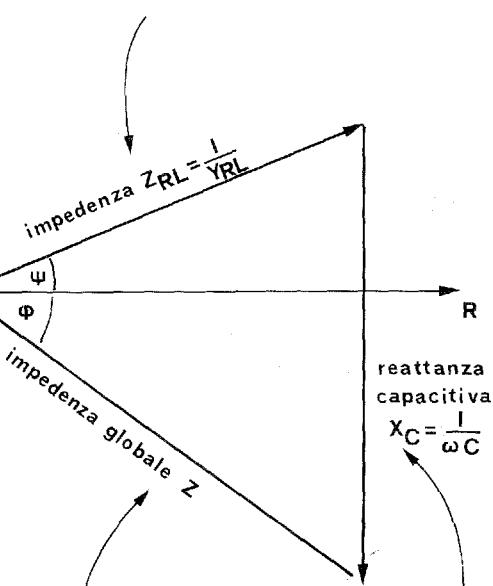
$$\text{ammettanza } Y_{RL}$$

$B_C$

$X_L$

#### (impedenze) disposizione serie

(3) Si prolunga il vettore ammettenza da questa parte (in modo da avere lo stesso angolo  $\psi$ ) e vi si determina l'impedenza



(2) Si compone l'ammettanza in modulo  $Y_{RL}$  e fase  $\psi$  con il solito metodo vettoriale (in scala delle ammettenze).

(4) Calcolata la reattanza capacitiva  $X_C = \frac{1}{\omega C}$   
 la si traccia in scala in modo da sommarla alla impedenza  $Z_{RL}$

$-B_L$

$-X_C$

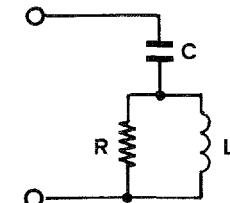
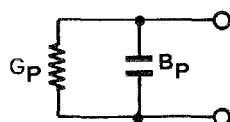
(5) Questa è la risultante impedenza globale della disposizione in modulo  $Z$  e fase  $\varphi$



### SIGNIFICATI DEL DIAGRAMMA VETTORIALE

Schema del circuito cui il presente diagramma si riferisce

In questo quadrante l'intero circuito è visto così:



ammittenza dell'intero circuito

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Conduttanza componente dell'intero circuito equivalente parallelo  
 $G_p = Y \cos \varphi$

suscettanza capacitiva componente dell'intero circuito equivalente parallelo

$$B_p = Y \sin \varphi$$

conduttanza della resistenza

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

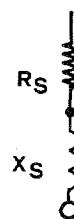
suscettanza induttiva della induttanza

$$B_L = \frac{1}{L}$$

$B_C$

$X_L$

In questo quadrante  
il solo circuito RL è visto così



componente reattiva del circuito RL equivalente serie

$$X_S = Z_{RL} \sin \psi$$

impedenza del circuito RL

componente resistiva del circuito RL equivalente serie

$$R_S = Z_{RL} \cos \psi$$

reattanza della capacità

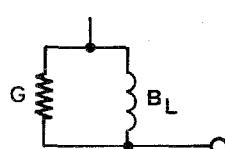
$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

impedenza dell'intero circuito

Nota che  $R_S$  è anche la componente resistiva dell'intero circuito, perciò è anche

$$R_S = Z \cos \varphi$$

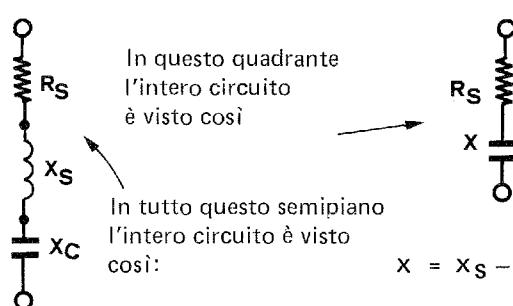
In questo quadrante il solo circuito BL è visto così:



$-B_L$

$-X_C$

In questo quadrante  
l'intero circuito è visto così



In tutto questo semipiano  
l'intero circuito è visto così:

$$X = X_S - X_C$$

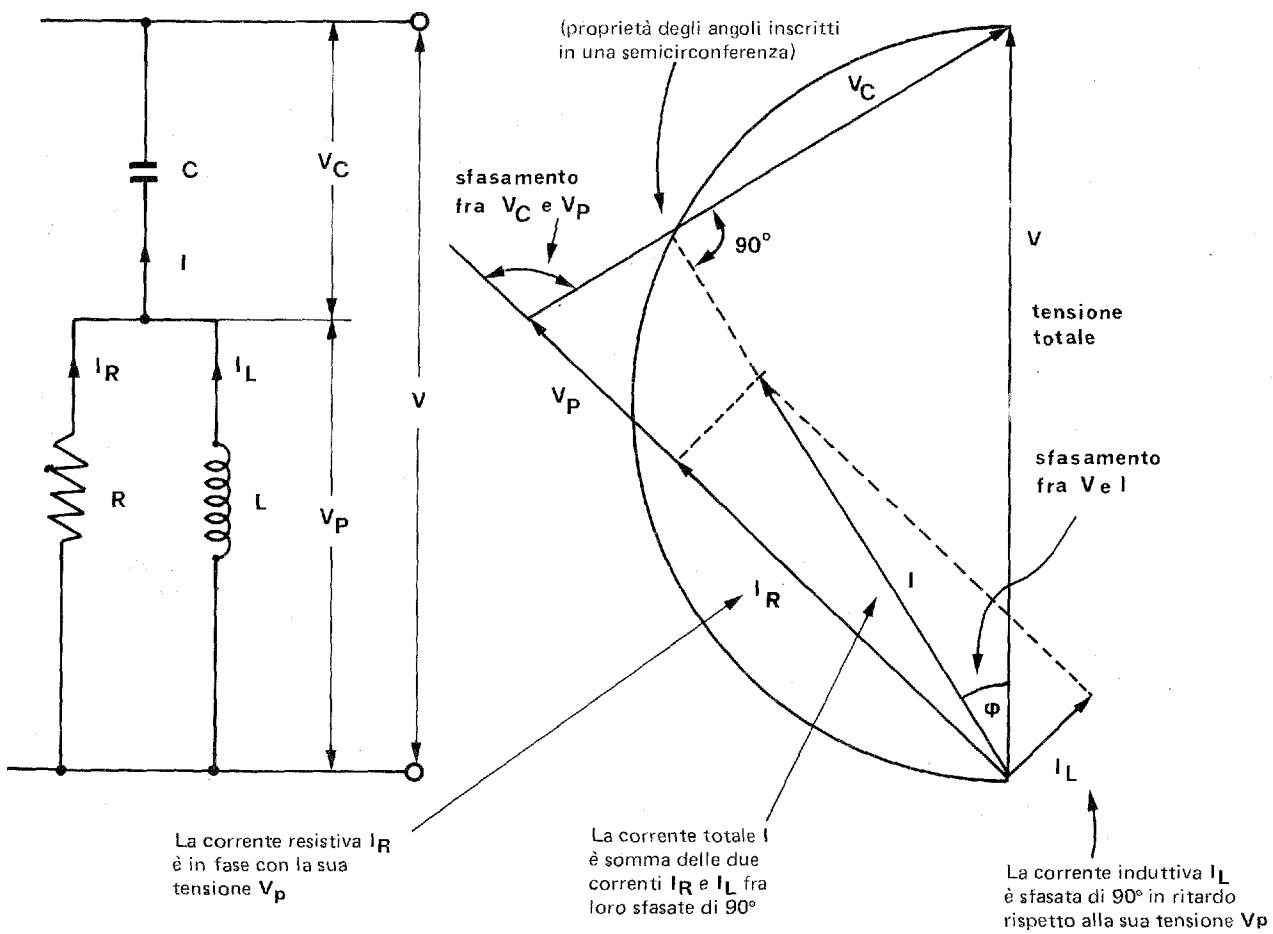
### DIAGRAMMA VETTORIALE TENSIONI-CORRENTI

La distribuzione delle tensioni e delle correnti per il circuito di cui è dimostrato lo schema e per una data frequenza  $f$  è quello che risulta nel diagramma vettoriale a fianco.

Vediamo come esse si devono articolare per rispettare tutte le leggi che conosciamo.

La corrente totale  $I$ , che è anche la corrente che attraversa la capacità  $C$ , deve trovarsi sfasata di  $90^\circ$  in anticipo rispetto a  $V_C$ .

Ecco perché l'intersezione fra  $V_C$  e  $I$  si trova sulla semicirconferenza.



Altre annotazioni importanti sono state omesse per non creare confusione

Esse sono comunque evidenti nella geometria del diagramma

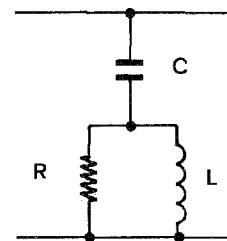


### CONDIZIONI DI RISONANZA

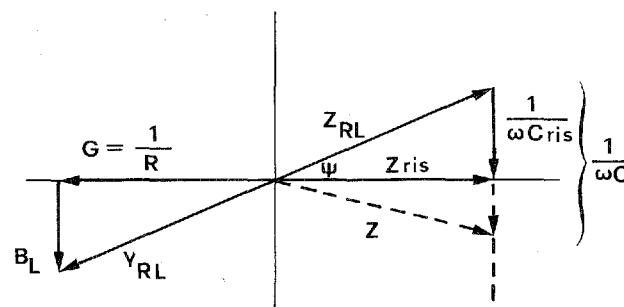
Abbiamo già accennato che nei circuiti equivalenti anche il valore della resistenza (o della conduttanza) equivalente dipende dal valore della frequenza.

Questo ci autorizza a pensare che nel circuito in oggetto si può intervenire modificando il valore in oggetto per mandare il sistema in risonanza.

Infatti:

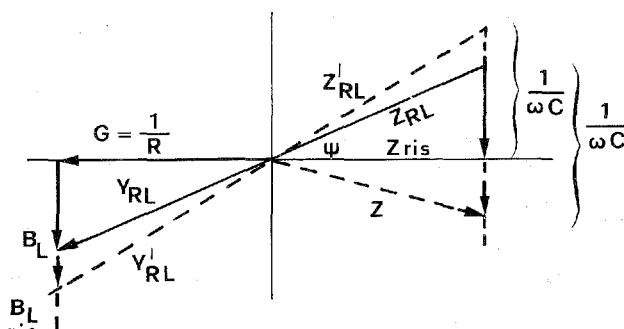


La risonanza può essere creata in tre modi:



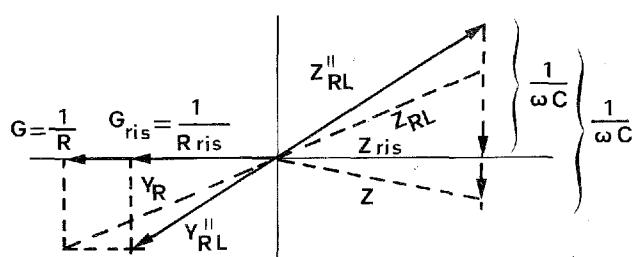
Modificando la capacità affinchè la reattanza capacitativa

$$\frac{1}{\omega C_{ris}} = Z_{RL} \sin \psi$$



Modificando l'induttanza affinchè la suscettanza induttiva faccia diventare

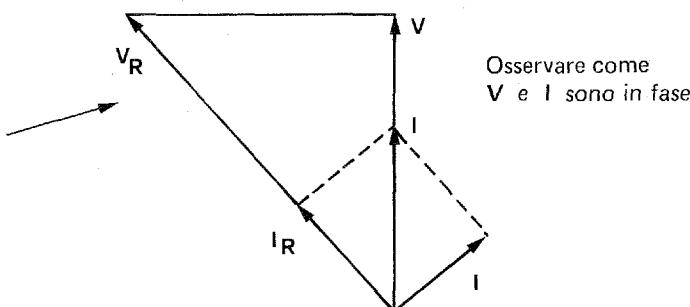
$$Z_{ris} = \frac{1}{\omega C \sin \psi_{ris}}$$



Modificando la resistenza (e perciò la sua conduttanza) in modo che diventi

$$Z_{ris} = \frac{1}{\omega C \sin \psi_{ris}}$$

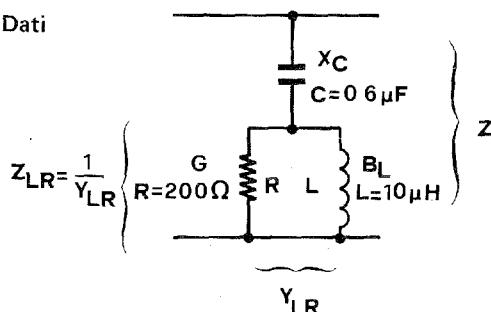
Il diagramma delle correnti diventa così



Osservare come V e I sono in fase

COMPORTAMENTO A FREQUENZA VARIABILE DI PARAMETRI PREFISSATI

Dati



Alla frequenza di valore infinito si annulla la suscettanza e l'ammettenza diventa uguale alla conduttanza

A frequenza di valore = zero si annulla la impedenza  $Z_{RL}$  del circuito RL

Questo semicerchio è tracciato dall'estremo libero del vettore impedenza equivalente  $Z_{RL}$  del circuito RL al variare della frequenza

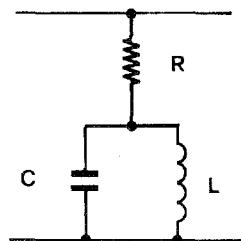
A frequenza di valore =  $\infty$  ( $\infty$  = infinito), l'induttanza presenta una reattanza parallelo di valore =  $\infty$  (suscettanza = 0) e perciò reattanza equivalente serie = 0.

Questa linea è tracciata dall'estremo libero del vettore impedenza totale  $Z$  del circuito al variare della frequenza (i cui valori interi in kHz sono segnati sulla linea stessa).

E' facile immaginare come possa esistere un valore di capacità  $C$  al disotto del quale la reattanza capacitiva  $X_L$  assume un valore abbastanza grande rispetto alla reattanza induttiva  $X_L$  equivalente serie da non mandare mai in risonanza il circuito.



### OSSERVAZIONI

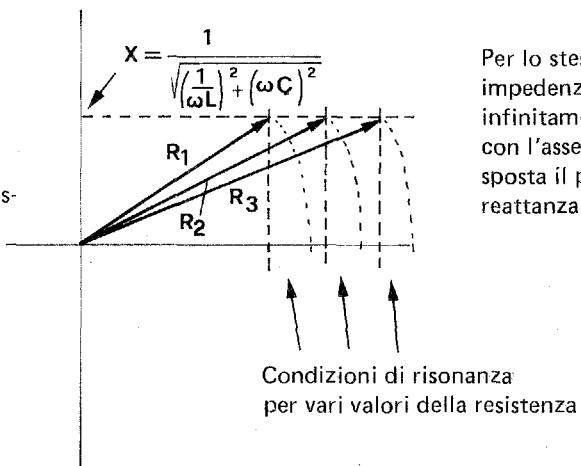


Una disposizione a questo modo non crea alcun problema particolare in quanto la modifica del valore della resistenza non modifica il valore della reattanza equivalente induttiva o capacitativa.

Lo studio si riconduce a quello illustrato in 13.73-4.

Esaminiamo qui vettorialmente il problema.

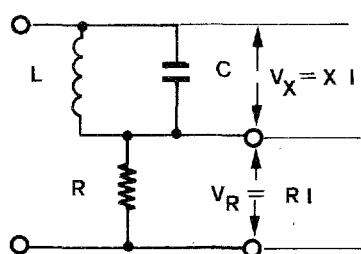
Mancando la resistenza nel circuito parallelo, la retta su cui si sposta il punto che rappresenta la suscettanza globale al variare della frequenza coincide con l'asse delle ordinate



Per lo stesso motivo il cerchio della impedenza equivalente di allarga infinitamente fin da coincidere pure con l'asse delle ordinate su cui si sposta il punto che rappresenta la reattanza equivalente.

Si noti come per un dato valore di reattanza equivalente

la ripartizione delle tensioni  $V_R$  e  $V_X$  è tanto maggiormente in favore di  $V_R$  quanto maggiore è  $R$ .



Questo fenomeno è ampiamente sfruttato in elettronica per creare caratteristiche di sintonia molto spiccate.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.0	Indice dei paragrafi
Argomento	:	14.00	Indice degli argomenti

## CAPITOLO 14

# ENERGIA E POTENZA

### par. 14.0 — Indice dei paragrafi e degli argomenti

- arg. 14.01 — Indice analitico
- 14.02 — Bibliografia

### par. 14.1 — Concetto di energia

- arg. 14.10 — Indice delle pagine
- 14.11 — Energia e Lavoro
- 14.22 — Equivalenze fra i vari tipi di energia
- 14.13 — Equivalenze fra energia cinetica e potenziale
- 14.14 — Energia termica ed elettrica
- 14.15 — Energia elettrica potenziale e cinetica

### par. 14.2 — Energia elettrica e magnetica

- arg. 14.20 — Indice delle pagine
- 14.21 — Energia accumulata nelle batterie
- 14.22 — Energia accumulata nei condensatori
- 14.23 — Energia elettrocinetica e magnetostatica

### par. 14.3 — Potenza

- arg. 14.30 — Indice delle pagine
- 14.31 — Concetto di potenza
- 14.32 — Confronti e deviazioni
- 14.33 — In corrente continua
- 14.34 — In corrente alternata

### par. 14.4 — Trasformazione e trasmissione dell'energia

- arg. 14.40 — Indice delle pagine
- 14.41 — Informazioni preliminari
- 14.42 — Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche
- 14.43 — Energia acustica

### par. 14.5 — Amplificazione e attenuazione

- arg. 14.50 — Indice delle pagine
- 14.51 — Amplificazione, Attenuazione, Guadagno
- 14.52 — Livelli energetici nell'acustica
- 14.53 — Tabelle di trasformazione

**APPUNTI DI  
ELETTRONICA**

Codice **14.01** Pagina **2**

<b>Sezione</b>	<b>:</b>	<b>1</b>	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	<b>:</b>	<b>14</b>	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	<b>:</b>	<b>14.0</b>	Generalità
<b>Argomento</b>	<b>:</b>	<b>14.01</b>	Indice analitico

14.43-2	acciaio (velocità del suono nell')	14.2	— — — e magnetica
14.12-2	acetilene (equiv. energetico)	14.14-1	— — — e termica
14.11-1	acqua come energia	14.42-8	— elettromagnetica (classificazione)
14.42-7	— (velocità di trasmissione nell')	14.15	— potenziale e cinetica
14.43-2	— (velocità del suono nell')	14.15-1	— — — a tensione costante
14.12-2	alcool (equiv. energetico)	14.15-2	— — — potenziale dipendente dalla carica
14.32-7	— (velocità di trasmissione nell')	14.15-1	— immagazzinata in una batteria
14.21-1	Amperore e Coulomb	14.15-2	— — — in un condensatore
14.51-1	amplificazione	14.15-3	— — — in un induttore
14.34	angolo di fase	14.23-1	— magnetostatica
14.42-6	antenna	14.11-2	— potenziale
14.43-2	aria (velocità del suono nell')	14.13-1	— potenziale
14.42-9	atmosfera	14.14-1	— termica ed elettrica
14.51-1	attenuazione	14.13	Equivalenza fra energia cinetica e potenziale
14.13-2	automobile in moto	14.12	Equivalenza fra i vari tipi di energia
14.51-2	bel	14.12-2	erg. (equiv. energetico)
14.11-1	benzina come energia	14.34-5	evaporazione acqua (equiv. energetico)
14.12-1	benzina (equiv. energetico)	14.34-5	fattore di potenza attiva
14.12-2	benzina (equiv. energetico)	14.34-1	— — — reattiva
14.14-1	calore	14.43-2	fattori della potenza alternata
14.12-2	caloria (equiv. energetico)	14.42-2	frequenze acustiche
14.32-1	caloria/ora (equiv. potenza)	14.42-2	— di oscillazione
14.21	carica e scarica di batteria	14.12-2	gas cucina (equiv. energetico)
14.32-1	cavallo vapore (equiv. potenza)	14.15-1	generatori
14.12-2	chilogrammetro (equiv. energetico)	14.14-1	gita in auto
14.32-1	chilogrammetro/sec (equiv. potenza)	14.51-2	guadagno
14.32-1	chilowatt (equiv. potenza)	14.51-3	— di corrente
14.12-2	chilowattora (equiv. energetico)	14.51-3	— — tensione
14.42-8	classificazione e principali caratteristiche dell'energia elettromagnetica	14.42-9	Heavyside
		14.42-8	HF
14.21-1	comportamento di una batteria	14.32-1	HP (equiv. potenza)
14.15-2	condensatori	14.32-2	HPh (equiv. energetico)
14.22	— (energia accumulata)	14.43-2	idrogeno (velocità del suono nell')
14.33-2	conduttanza	14.34-5	impedenza
14.42-1	conservazione dell'energia oscillante	14.42-6	— caratteristica dello spazio
14.31-2	consumo di benzina	14.23-3	induttanza (energia accumulata)
14.21-1	Coulomb e Amperore	14.43-2	infrasuoni
14.34-2	cos φ	14.42-9	ionosfera
14.51-2	decibel	14.42-10	ionosfera
14.42-9	direzione di propagazione	14.43-1	irradiazione dell'energia acustica
14.14-1	dispersione dell'energia	14.42-3	— sferica dell'energia
14.42-2	dispersione dell'energia	14.11-2	joule
14.34-6	efficace (valore)	14.32-2	kWh (equiv. energetico)
14.42-8	EHF	14.14-1	lancio di un sasso
14.12-2	elettronvolt (equiv. energetico)	14.12-2	lampadina accesa (equiv. energetico)
14.11	energia	14.11	lavoro
14.1	— (concetto di)	14.21-1	— di caduta
14.21	— accumulata nelle batterie	14.12-1	— — sollevamento
14.21-2	— in più batterie	14.12-2	legno (equiv. energetico)
14.23-1	— in un campo magnetico	14.42-8	LF
14.23-3	— in un induttore	14.43-1	limite di confronto dei livelli acustici
14.23-4	— in più induttori	14.43-2	limiti di udibilità
14.11-2	energia cinetica	14.52-1	limiti di udibilità
14.13-1	energia cinetica	14.43-1	— umani di percezione
14.42-2	— dispersa	14.52-1	— umani di percezione
14.15-3	energia elettrica cinetica	14.52	livelli energetici nell'acustica
14.23-1	energia elettrica cinetica	14.42-7	lunghezza d'onda

**Sezione** : 1 Grandezze fondamentali  
**Capitolo** : 14 Energia e potenza  
**Paragrafo** : 14.0 Generalità  
**Argomento** : 14.01 Indice analitico

**Codice** 14.01 **Pagina** 3

14.12-2	materie (equiv. energetico)	14.42-8	— infrarosse
14.11-2	metro	14.42-8	— visibili
14.41-3	mezzi di trasmissione	14.42-8	— ultraviolette
14.42-8	MF	14.42-8	raggi X
14.11-2	misura dell'energia	14.42-8	— (gamma)
14.11-2	— del lavoro	14.42-8	— cosmici
14.31-1	— della potenza	14.52-1	rapporti di potenze
14.11-2	moto	14.34-5	rappresentazione della potenza alternata coi parametri del circuito
14.11-2	newton	14.34-1	rappresentazione grafica dei fattori della potenza alternata
14.43-2	note musicali	14.34-3	rappresentazione grafica della potenza alternata
14.42-8	onde a frequenza acustica	14.34-2	rappresentazione trigonometrica della potenza alternata
14.42-8	— — — industriale	14.34-4	rappresentazione vettoriale della potenza alternata e dei suoi fattori
14.42-8	— centimetriche	14.32-1	rendimento
14.42-8	— chilometriche	14.33-2	resistenza elettrica
14.42-8	— decametriche	14.11-2	— meccanica
14.42-8	— decimetriche	14.42-5	ricezione
14.42-10	— di propagazione (suddivisione)	14.13-4	ricupero dell'energia cinetica
14.42-10	— dirette	14.12-2	riscaldamento acqua
14.42-8	— ettometriche	14.12-2	— aria
14.42-8	— metriche	14.13-4	scambio fra energia cinetica e potenziale
14.42-8	— millimetriche	14.42-1	scambi alternati di energia
14.42-8	— miriametriche	14.34-2	sen
14.42-10	— riflesse dalla ionosfera	14.42-8	SHF
14.42-10	— — — sulla terra	14.43-2	soglia del dolore
14.42-10	— — — spaziali inferiori	14.42-8	sfruttamento dell'energia cinetica
14.42-10	— — — superiori	14.42-8	spostamento
14.42-10	— superficiali	14.53-1	stratosfera
14.42-1	oscillazioni	14.53-2	stratosfera
14.43-2	ottava	14.13-3	tabella di trasformazione da decibel in rapporti
14.42-1	pendolo	14.11	tabella di trasformazione da rapporti in decibel
14.43-1	percezione (limiti umani)	14.42-9	trasduttori attivi
14.3	potenza	14.42-10	— passivi
14.34-4	— apparente	14.53-1	trasformazioni dell'energia e perdite
14.31-1	— assorbita	14.51-1	trasmissione
14.34-4	— attiva	14.51-1	— dell'energia motrice o di segnali
14.31-1	— definitiva	14.14-2	— dell'energia oscillante
14.41-1	— dei generatori naturali e artificiali	14.42-5	— elettrica dell'energia
14.31-2	potenza di sollevamento	14.41-1	— elasto cinetica delle vibrazioni
14.31-1	— dispersa	14.42-2	— elettromagnetica dell'energia
14.42-3	irradiata dal sole	14.41-1	— delle radiazioni
14.34-4	— reattiva	14.42-2	— meccanica dell'energia
14.31-1	— resa	14.41-1	— termodinamica dell'energia
14.42-6	— ricevuta da una antenna ricevente (entità)	14.42-9	troposfera
14.42-3	— specifica	14.42-8	UHF
14.42-3	— — — in funzione della distanza dall'emittente	14.43-2	ultrasuoni
14.31-2	— termica di una stufa	14.11-2	unità di misura dell'energia
14.31-1	— vari tipi	14.32-2	— — — — derivate dalla potenza
14.42-6	Poynting (vettore di)	14.11-2	— — — del lavoro
14.42-4	propagazione dall'antenna trasmittente all'antenna ricevente	14.41-1	— — — della potenza
14.42-4	propagazione dell'energia elettromagnetica (meccanismo)	14.42-9	vagone ferroviario in moto
14.34-2	pulsazione	14.42-8	
14.21	quantità di elettricità accumulata	14.43-2	
14.42-7	quarzo (velocità di trasmissione nel)	14.11-2	
14.11-2	quieta	14.32-2	
14.42-2	radiazioni e frequenza di oscillazione	14.11-2	
		14.31-1	
		14.13-1	

**APPUNTI DI  
ELETTRONICA**Codice  
14.01Pagina  
4

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.0	Generalità
Argomento	:	14.01	Indice analitico

- 14.34-6 valore efficace  
14.43-2 velocità di propagazione dell'energia acustica  
14.42-7 — — — in rapporto ad altre grandezze  
14.42-2 — — — trasmissione  
14.42-7 — — — o di propagazione nei materiali  
14.43-2 vetro (velocità di trasmissione nel)  
14.42-6 vettore di Poynting  
14.13-2 — (velocità del suono nel)  
14.42-6 vettore di Poynting  
14.31-1 volano come accumulatore di energia  
14.31-1 watt  
14.33-1 watt  
14.33-2 — rispetto a resistenza e conduttanza  
14.33-1 — — — tensione e corrente continua

**Sezione** : 1 Grandezze fondamentali  
**Capitolo** : 14 Energia e potenza  
**Paragrafo** : 14.0 Indice dei paragrafi e degli argomenti  
**Argomento** : 14.02 Bibliografia

**BIBLIOGRAFIA****— LIBRI —**

Abbreviazione	Autore	Titolo	Editore
Colombo	G. Colombo	Manuale dell'ingegnere	Hoepli 1947
Mondani	F. Mondani	Elementi di elettronica e di elettrotecnica	Trevisini 1966
Giometti	R. Giometti F. Frascari	Elettrotecnica Elettronica Radiotecnica	Calderini 1973 1974
E.S.T.	Vari	Encyclopedia della Scienza e della Tecnica	Mondadori 1965
EINGE	Vari	Encyclopedia dell'Ingegneria	ISEDI 1972 A Mondadori
Jacobowitz EMS	H. Jacobowitz	Electronics made simple	W.H. Allen London 1965
Terman RE	F.E. Terman	Radio Engineering	McGraw Hill 1947
CPE n° ...	Vari	Corsi Programmati di Elettronica ed Elettrotecnica	Jackson 1980-1981
Asimov C.	Isaac Asimov	Il Collasso dell'Universo	A. Mondadori 1979

**— RIVISTE —**

Sigla	Titolo	Editore
S.P.	Sperimentare	J.C.E.
SE.	Selezione Radio TV	J.C.E.
E.O.	Elettronica Oggi	Jackson

Sezione : 1      Grandezze fondamentali  
Capitolo : 14     Energia e potenza  
Paragrafo : 14.1   Concetto di energia  
Argomento : 14.10 Panoramica

## Paragrafo 14.1

# CONCETTO DI ENERGIA

### Indice degli argomenti e delle pagine

#### arg. 14.11 — Energia e Lavoro

- pag. 1 — Significato di energia e della sua misura
- " 2 — Lavoro
  - Concetto generale di lavoro ed energia. Definizione della misura
  - Classificazione fondamentale dell'energia
  - Energia potenziale
  - Energia cinetica
  - Misura

#### arg. 14.12 — Equivalenze fra i vari tipi di energia

- pag. 1 — Energia di sollevamento, di caduta e di quantità di benzina
- " 2 — Tabelle comparative

#### arg. 14.13 — Equivalenza fra energia cinetica e potenziale

- pag. 1 — Energia cinetica
- " 2 — Un esempio di trasformazione reversibile dell'energia
- " 3 — Sfruttamento dell'energia cinetica presente in natura
  - Tentativi di accumulo di energia sottoforma cinetica
- " 4 — Ricupero dell'energia sottoforma cinetica
  - Scambi fra energia cinetica e potenziale
  - Esempi di accumulatori di energia

#### arg. 14.14 — Energia termica ed elettrica

- pag. 1 — Dispersione dell'energia
- " 2 — Trasformazioni dell'energia e perdite

#### arg. 14.15 — Energia elettrica potenziale e cinetica

- pag. 1 — Energia elettrica potenziale a tensione costante
- " 2 — Energia elettrica potenziale a tensione dipendente dalla carica
- " 3 — Energia elettrica cinetica

## SIGNIFICATO DI ENERGIA E DELLA SUA MISURA

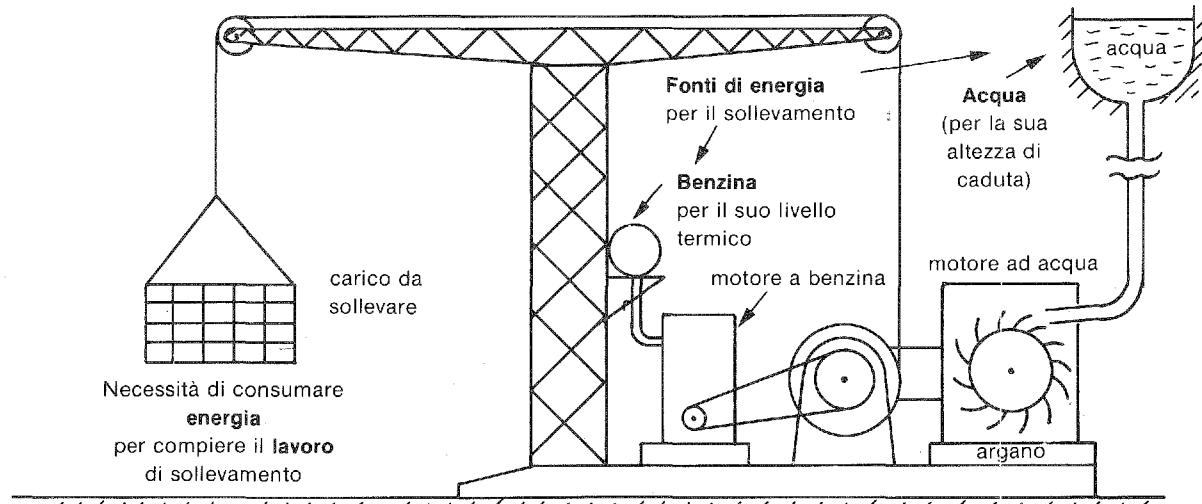
Abbiamo già detto in 12.71-2 che la carica di 1 coulomb, sotto la tensione di 1 volt possiede l'energia potenziale di 1 joule.  
 Vediamo ora il significato di questa energia.

### Energia

La definizione tradizionale è la seguente: per **energia** si intende l'**attitudine che ha un corpo a compiere un lavoro**, per merito delle varie condizioni in cui esso si può trovare.

### Lavoro

Energia e Lavoro hanno dunque la stessa natura dimensionale, a far capire il concetto di lavoro a chi sia digiuno di fisica non è cosa facile.  
 Aiutiamoci con un esempio.



Supponiamo di avere una gru con la quale si debba sollevare del materiale

Dovrebbe essere intuitivo che, per sollevare un carico, si debba consumare acqua o benzina, a seconda di quale motore si mette in funzione, e che detto consumo dipenda solamente e proporzionalmente

- dalla entità del carico
- dall'altezza di sollevamento

Scriveremo perciò che

$$L = F \cdot s$$

**Spostamento** (in metri)  
in direzione opposta  
al peso del carico

**Entità del carico**

o forza (in newton, simbolo N)

(1 newton = 0,102 kg; 1 kg = 9,8 newton)

e supponiamo che la gru possa essere messa in funzione indifferentemente

- da un motore a benzina
- o da un motore ad acqua.

L'energia consumata, sia essa espressa in termini di

- quantità di benzina consumata nel motore a scopo, oppure
- quantità di acqua fatta precipitare sulla ruota da una data altezza

deve corrispondere alla stessa

- quantità di joule che è accorsa per effettuare quel sollevamento.

Si tratterà ora di trovare dei termini di riferimento comuni alla caduta di acqua o alla combustione della benzina.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.1	Concetto di Energia
Argomento	:	14.11	Energia e Lavoro

## CONCETTO GENERALE DI LAVORO ED ENERGIA. DEFINIZIONE DELLA MISURA

### Lavoro

Si compie un lavoro non soltanto quando si devono sollevare degli oggetti, ma ogni volta che si deve esercitare una forza per spostare un oggetto che oppone resistenza a quel movimento o per trasformare una forza di energia in un'altra. Rivediamo sotto un aspetto più generale l'espressione vista alla pagina precedente.

$$\begin{array}{ccc} \text{lavoro da compiere} & \longrightarrow & L = F \cdot s \quad \longleftarrow \text{spostamento (in metri)} \\ \text{o energia da consumare} & & \uparrow \\ \text{per compierlo} & & \text{Carico o resistenza meccanica} \\ (\text{in joule}) & & \text{da superare (in newton)} \end{array}$$

### Classificazione fondamentale dell'energia

Abbiamo visto precedentemente la definizione dell'**energia** come **attitudine** che hanno i corpi **a compiere un lavoro** ed ora aggiungeremo:

**in funzione del loro stato di quiete o di moto.**

Per queste due condizioni classificheremo l'energia nei due seguenti modi.

### Energia potenziale

È l'energia dello stato di quiete. È l'energia della massa o della carica elettrica o di altra natura associata ad un livello. Non si deve pensare soltanto alla energia che un corpo possiede quando si trova sollevato da terra e al lavoro che può produrre se lasciato cadere.

Nello stato di energia potenziale si trovano anche la benzina e i combustibili in generale, per il fatto che, se fatti opportunamente bruciare, possono produrre del lavoro.

Anche una batteria carica possiede energia potenziale: infatti essa può produrre lavoro, se opportunamente collegata.

### Energia cinetica

È l'energia del movimento.

È l'energia della massa o della carica elettrica o di altra natura associate alla loro velocità.

È l'energia del sasso lanciato per permettere ad esso di proseguire il suo movimento fino al raggiungimento del bersaglio. Questo, per fermare il sasso ne trasformerà l'energia cinetica in calore e in deformazione del bersaglio stesso.

È l'energia dell'elettrone in movimento, e anche quella che mantiene il moto dei pianeti.

### MISURA

Come abbiamo visto, l'unità di misura dell'energia o del lavoro è il **joule**, che può essere definito unitariamente come segue:

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ newton} \times 1 \text{ metro}$$

di lavoro      di forza      di spostamento

Per avere un'idea dell'entità del joule diremo che esso corrisponde al lavoro compiuto da un corpo che pesa 0,102 kg. e che cada dall'altezza di 1 m., oppure da 1 kg che cada dall'altezza di 0,102 m. ecc.

## ENERGIA DI SOLLEVAMENTO, DI CADUTA E DI QUANTITA' DI BENZINA

Con un esempio si cerca di far capire come l'energia sia un concetto universale, comunque essa venga sviluppata.

### Esempio e Dati

Riprendiamo l'esempio visto in 14.11-1 supponendo che siano:

- il carico  $F = 3$  tonn. corrispondente a  $3 \cdot 1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg} = 29400 \text{ N}$
- l'altezza di sollevamento  $s = 15 \text{ m}$ .

### Lavoro di sollevamento

Esso risulta dal prodotto dei dati

$$L = F \cdot s = 29.400 \text{ N} \times 15 \text{ m} = 441.000 \text{ J}$$

### Quantità di acqua necessaria proveniente da una data altezza

L'energia netta che serve in termini di caduta d'acqua per effettuare il sollevamento deve essere uguale al lavoro di sollevamento.

Se, per esempio, il motore ad acqua sfrutta acqua che cade dall'altezza  $S_a = 500 \text{ m}$ , dalla relazione precedente resta incognita la spinta in newton necessaria che si ottiene con una congrua quantità di acqua

Spinta (in N) della quantità di acqua necessaria →

$$F = \frac{L}{S_a} = \frac{441.000 \text{ J}}{500 \text{ m}}$$

← energia necessaria per il sollevamento

← altezza (in m) di caduta dell'acqua.  
Dal calcolo risulta che  $F = 882 \text{ N}$

Essendo  $1 \text{ N} = 0,102 \text{ kg} = 0,102 \text{ litri di acqua}$ , necessiteranno per effettuare quel sollevamento  $882 \text{ N} \cdot 0,102 \text{ lt/N} = 90 \text{ litri}$ .

In realtà per sopperire alle inevitabili e molteplici perdite di energia, ne occorrerà un 10% in più.

### Quantità di benzina necessaria

Poichè è accertato sperimentalmente che la combustione di

1 litro di benzina produce  $34 \cdot 10^6 \text{ joule}$ ,

se vogliamo sapere a quanti litri di benzina corrisponde l'energia necessaria al sollevamento, cioè 441.000 joule, basta effettuare la seguente divisione:

$$441.000 \text{ J} : 34 \cdot 10^6 \text{ J/l} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ litri di benzina}$$

cioè  $13 \text{ cm}^3$  di benzina.

Così poco, dirà qualcuno perplesso e incredulo!

In effetti questo consumo risulterà circa 20 volte maggiore dato il basso rendimento dei motori a scoppio in generale, e dati gli attriti che si devono vincere all'argano e alle carrucole.

### Raccomandazioni

Vi prego di credere che la conoscenza precisa del concetto di energia è estremamente importante e vi aiuterà a comprendere con facilità la maggior parte dei circuiti e dei fenomeni che riguardano l'elettronica.

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.1	Concetto di Energia
Argomento : 14.12	Equivalenze fra i vari tipi di energia

### TABELLE COMPARATIVE

Mentre da una parte esprimiamo in termini di joule l'energia prodotta da varie fonti, dall'altra riconduciamo in termini di joule l'energia espressa o misurata in altri modi.

#### Quantità di energia prodotta da varie fonti

La seguente tabella ci mette in grado di renderci conto delle dimensioni del joule e della quantità di energia che le varie fonti producono.

Bruciando le seguenti sostanze	si produce calore in Joule cioè joule	Per produrre l'energia di 1 joule è necessario bruciare le seguenti quantità di sostanze
1 kg di legno 1 m <sup>3</sup> di gas cucina 1 lt di benzina 1 lt di alcool 1 m <sup>3</sup> di acetilene	18.800.000 16.700.000 34.000.000 20.000.000 58.000.000	$1.88 \cdot 10^7$ $1.67 \cdot 10^7$ $3.4 \cdot 10^7$ $2.0 \cdot 10^7$ $5.8 \cdot 10^7$
Per eseguire la seguente operazione	Occorre assorbire la seguente energia in joule	Con l'assorbimento di 1 joule di energia si effettuano le seguenti operazioni
Riscaldare di 1°C 1 kg di acqua Riscaldare di 1°C 1 m <sup>3</sup> di aria Fare evaporare 1 kg di acqua Tenere accesa una lampadina da 40 W per 1 ora	4.184 1.000 2.250.000 144.000	Si alza di 1°C 239 milligrammi di acqua Si alza di 1°C 1 litro di aria Si fa evaporare 0,44 milligrammi di acqua Si tiene accesa una lampadina da 40 W per 25 millesimi di secondo

#### Equivalenze

Definizione in termini di joule di altre unità di misura

Energia espressa in	Energia corrispondente in joule	tecnica di impiego	Definizione: energia necessaria per
1 chilogrammetro	9,8	meccanica	sollevare di 1 m il peso di 1 kg
1 caloria	4184,-	termodinam.	alzare di 1°C 1 kg di acqua
1 chilowattora	3.600.000	elettrotecnica	1 ora di funzionamento di un apparecchio della potenza di 1 kW
1 elettronvolt	$1,6 \cdot 10^{-19}$	fisica atomica	spostare all'infinito un elettrone sotto tensione di 1 volt.
1 erg	$10^{-7}$	chimica fisica	spingere 2 gr. di materia fino alla velocità di 1 cm/sec.
1 kg. di materia	$8,99 \cdot 10^{16}$	fisica nucleare	energia prodotta dalla disintegrazione di un kg. di materia (2).

- (1) Fra 1 elettronvolt e 1 joule esiste lo stesso rapporto che si ha fra la carica di 1 elettrone e la carica di 1 coulomb. Infatti 1 joule è l'energia che occorre per portare all'infinito 1 coulomb sotto tensione di 1 volt (1 elettrone =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb)

- (2) Deriva dalla relazione di Einstein.

Energia prodotta dalla disintegrazione della materia

(in joule)

$$E = mc^2$$

velocità della luce al quadrato =  $= (2.999 \cdot 10^8 \text{ m/sec})^2 = 9/99 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{sec}^2$

quantità di materia disintegrata pari a 1 kg

Sezione	: 1	Grandezze fondamentali
Capitolo	: 14	Energia e potenza
Paragrafo	: 14.1	Concetto di Energia
Argomento	: 14.13	Equivalenza fra energia cinetica e potenziale

## ENERGIA CINETICA

Si descrive come un corpo possa possedere energia anche per il fatto che esso sia in movimento e si stabilisce in che relazione l'energia si trova con la velocità.

### Concetto di energia cinetica

Un corpo può possedere energia non solo a causa della sua posizione geodetica, cioè altezza dal suolo (o da un altro punto di riferimento) per le sue possibilità di trasformarsi emettendo energia termica o atomica, ma anche per i due seguenti fatti combinati:

- a) di trovarsi in movimento e quindi di possedere velocità
- b) di possedere una massa.

Infatti lanciare un oggetto significa modificare nella sua massa un fattore della sua energia di movimento: la velocità.

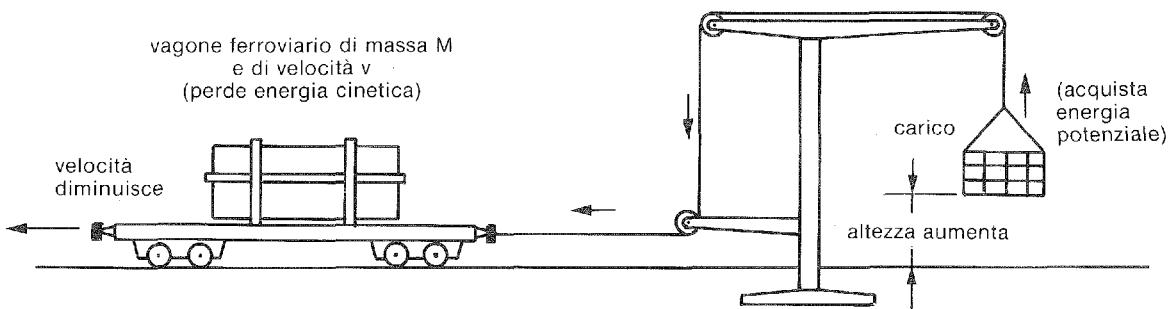
### L'energia può modificarsi in altri tipi, ma non si può distruggere

L'energia cinetica, e quindi anche la velocità di un corpo in movimento, può mantenersi indefinitamente, se essa non venisse dispersa sotto forma di altre energie irrecuperabili come il calore che si produce attraverso l'attrito con l'aria, l'urto col suolo, ecc.

I pianeti che non hanno problemi di attriti, mantengono da epoca immemorabile l'energia cinetica che è stata loro impressa e continueranno a mantenerla se altro non succederà a modificarla.

### Trasformazione di energia cinetica in energia potenziale e viceversa

Che un corpo in movimento possieda energia dello stesso tipo di quella potenziale fin qui esaminata lo possiamo dimostrare con un esempio su cui nessuno dovrebbe avere dubbi.



Un vagone ferroviario, lanciato senza attriti su un binario, è capace di sollevare un carico, scambiando la propria energia cinetica, che diminuisce, ma mano che fa assumere al carico energia potenziale.

La posizione di riposo si avrà quando tutta l'energia cinetica sarà trasferita al carico sotto forma potenziale. In quell'istante tutto il sistema sarà fermo e il carico si troverà nella posizione più alta che l'energia cinetica iniziale del vagone in movimento gli poteva consentire.

### Espressioni

$$\text{energia cinetica} \quad (\text{in joule}) \quad \longrightarrow \quad E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \longleftarrow \quad \begin{array}{l} \text{velocità (in m/sec)} \\ \text{al quadrato} \end{array}$$

massa del corpo in movimento  
(in Kg.)

$$\text{energia potenziale} \quad (\text{in joule}) \quad \longrightarrow \quad E_p = F \cdot S \quad \longleftarrow \quad \begin{array}{l} \text{spostamento del carico} \\ (\text{in m.}) \end{array}$$

forza esercitata dal sistema (in newton)  
cioè: una molla, un peso,  
la spinta di un liquido ecc.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.1	Concetto di Energia
Argomento	:	14.13	Equivalenza fra energia cinetica e potenziale

## UN ESEMPIO DI TRASFORMAZIONE REVERSIBILE DELL'ENERGIA

Perdonateci se insistiamo ancora: ci sembra un concetto molto importante. Se vi annoiate, potete anche saltare queste pagine, ma non lamentatevi nel futuro se brancolerete nel buio.

### Esempio numerico di energia cinetica

Tanto per farci un'idea dimensionale dell'energia cinetica, calcoliamo quanta energia cinetica è immagazzinata in un'automobile che corra in folle, per sola inerzia, alla velocità di 100 km/h.

Dati del problema

$m$  = massa: supponiamo 1 ton=1000 kg.

$v$  = velocità: supponiamo 100 km/h che devono essere trasformati in equivalenti m/sec:  
cioè  $100 \text{ km/h} \cdot 1000 \text{ m/km} : 3600 \text{ sec/h} = 27,7 \text{ m/sec}$ .

Il valore in joule dell'energia cinetica sarà

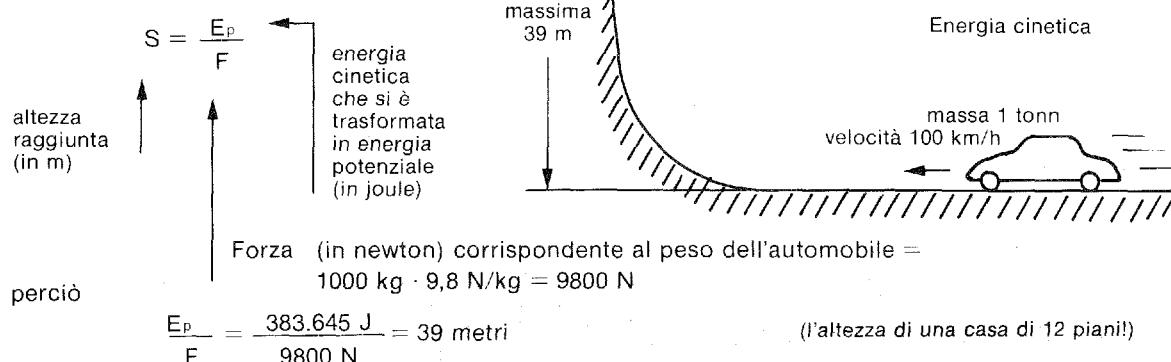
$$Ec = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg} : (27,7 \text{ m/sec})^2 = 383.645 \text{ J}$$

### Ricerca dei fattori dell'energia potenziale che corrispondono alla energia cinetica calcolata

Si tratta, in altre parole, di determinare a quale altezza arriverà quell'automobile, se improvvisamente la strada diventasse estremamente ripida.

In quel momento la stessa energia cinetica si sarà interamente trasformata in energia potenziale.  $E_p = Ec$

Risolvendo l'espressione dell'energia cinetica (14.13-1) rispetto all'incognita altezza  $s$  avremo.



### Ammonimento

Un bell'oggetto di meditazione per certi idioti del volante, che per fortuna non possono trovarsi fra i lettori di questi appunti!

E non si consolino quelli, pensando che, "tanto, di strade così ripide non ce ne sono", perché quell'altezza verrebbe raggiunta anche su strada comunque inclinata o comunque essi venissero proiettati nello spazio. Non si illudano nemmeno sulla collaborazione degli attriti, perché al massimo risparmieranno due o tre piani.

Se poi costoro soffrissero di vertigini, potrebbero al massimo sperare nell'ostacolo che ha creato la proiezione, assorbendo nell'urto gran parte della energia. Ma non credo che in questo caso saranno più in grado di rendersi conto di ciò che sta succedendo.

E come ultima delusione: l'altezza raggiunta non dipende dalla massa dell'auto, come si potrebbe constatare facilmente.

## SFRUTTAMENTO DELL'ENERGIA CINETICA PRESENTE IN NATURA

### Fonti

Fra le fonti di energia cinetica presenti in natura ricordiamo:

- quella del vento
- quella dei fiumi
- ... e quella dei pianeti!

### Sfruttamento

È impensabile di sfruttare l'energia dei pianeti in movimento: queste masse enormi spinte a velocità ... astronomiche!

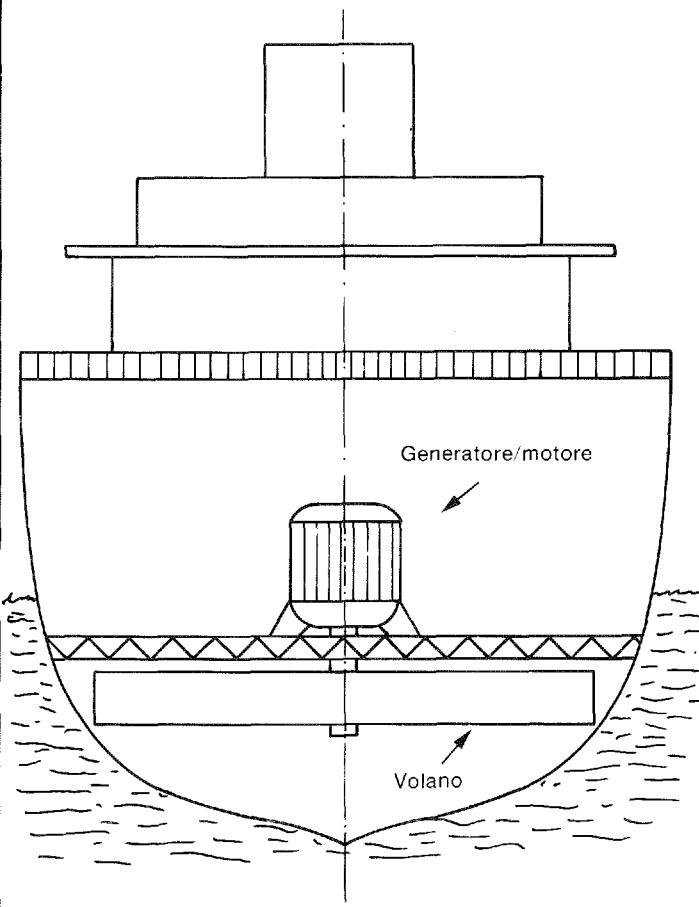
Non sapremmo come imbrigliarli per far loro trainare o sollevare carichi sulla terra. In ogni caso la loro velocità di rivoluzione diminuirebbe ... la loro orbita si avvicinerebbe alla terra ... e correremmo il rischio di trovarceli addosso!

I mulini a vento invece sono il più bell'esempio di sfruttamento dell'energia cinetica.

Anche le centrali elettriche fluviali costituiscono un altro esempio, sebbene sia necessario prima con una diga di sbarramento trasformare l'energia cinetica dell'acqua in energia potenziale e questa di nuovo in cinetica nel momento in cui aziona la turbina.

## TENTATIVI DI ACCUMULO DI ENERGIA SOTTOFORMA CINETICA

Nel passato si era tentato di sfruttare l'accumulo di energia cinetica per i mezzi di locomozione delle navi. Si pensava infatti di dotare la nave di un grosso volano alloggiato in fondo alla stiva e collegato meccanicamente ad un generatore/motore elettrico.



Per chi volesse appagare la propria curiosità diamo qui una sommaria spiegazione del funzionamento.

Il generatore, funzionando da motore collegato alla rete di alimentazione nel porto, mette in rotazione veloce il pesantissimo volano, accumulandovi così notevole energia cinetica.

Questa energia viene sfruttata in navigazione per fornire di energia elettrica la nave attraverso il generatore che è mantenuto in rotazione dal volano.

Le eliche in particolare saranno comandate da appositi motori elettrici.

Oppunti regolatori di tensione provvederanno a compensarne l'abbassamento man mano che il volano perde velocità.

Le quantità di energia sono notevoli ma comunque non sufficienti ad effettuare lunghi percorsi.

Perciò l'uso di queste navi sarebbe stato destinato al traghettamento, ma comunque il peso e l'ingombro dei volani necessari allo scopo non hanno dato successo alla iniziativa.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.1	Concetto di Energia
Argomento	:	14.13	Equivalenza fra energia cinetica e potenziale

### Recupero dell'energia cinetica

La trasformazione dell'energia sotto forma cinetica è la caratteristica fondamentale delle apparecchiature destinate al trasporto in generale.

Un mezzo di trasporto in quanto è in movimento è carico di energia cinetica.

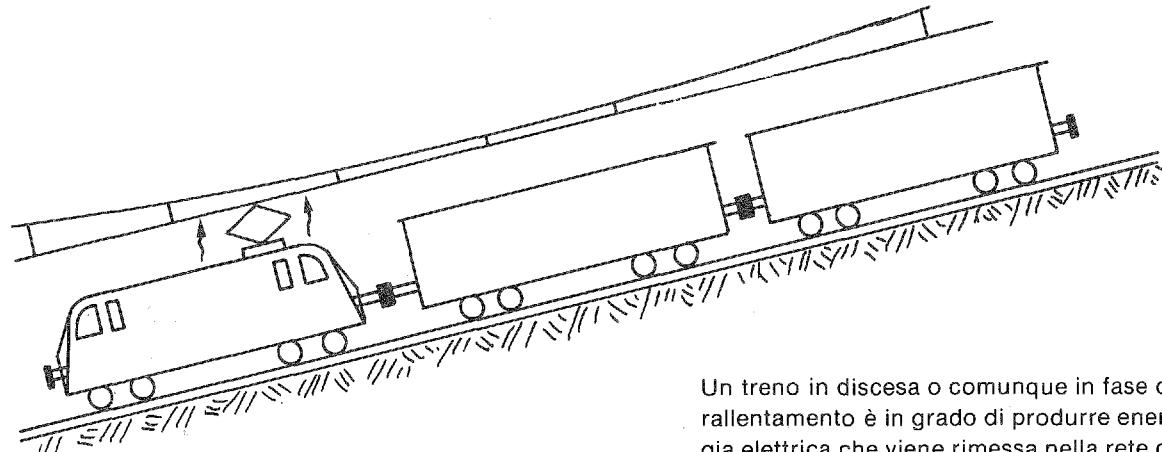
Il modo più corrente di fermarlo è quello di trasformare questa sua energia cinetica in energia termica (calore) attraverso i freni.

Per rimettere in moto il mezzo bisogna consumare ancora nuova energia: ecco perché in città il consumo di benzina nell'automobile è maggiore rispetto ai lunghi percorsi, oltre al fatto che il motore deve essere mantenuto in moto anche quando la macchina è ferma al semaforo rosso.

In discesa non c'è altro modo di smaltire l'energia accumulata in salita che trasformarla in calore attraverso i freni o attraverso il motore stesso che funge da freno quando non si preme l'acceleratore.

I mezzi a trazione elettrica invece possono rallentare il loro moto trasformando i motori in generatori, i quali a spese della energia cinetica alimentano di ritorno la linea alleggerendo la centrale di alimentazione di altrettanta energia, che non viene erogata.

È un modo molto efficace per economizzare energia.



Un treno in discesa o comunque in fase di rallentamento è in grado di produrre energia elettrica che viene rimessa nella rete di alimentazione.

### Scambio fra energia cinetica e potenziale

L'energia cinetica invece è largamente sfruttata in meccanica, come in elettrotecnica e nell'elettronica in generale, o per mantenere movimenti durante un breve intervallo di tempo (volano) o per creare quelle oscillazioni costituite da uno scambio continuo fra energia cinetica e potenziale (pendolo, circuito oscillante, circuito reattivo).

Abbiamo visto (13.4) come, a regime alternato di energia elettrica, il condensatore scambia energia con l'alimentatore accumulandola ritmicamente sottoforma potenziale, mentre l'induttore la accumula altrettanto ritmicamente sottoforma cinetica.

Esempi di accumulatori di energia.

#### Cinetica

In meccanica: il volano (nei motori a scoppio, a combustione, a vapore, ecc.)  
in elettrotecnica: l'induttore (13.3)

#### Potenziale

in meccanica: i serbatoi in quota, contrappesi, molle, ecc.  
in elettrotecnica: il condensatore (13.2)

<b>Sezione</b>	:	1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	:	14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	:	14.1	Concetto di Energia
<b>Argomento</b>	:	14.14	Energia termica ed elettrica

## DISPERSIONE DELL'ENERGIA

L'energia non si produce: essa esiste in natura e si trasforma fino ad un livello irrecuperabile: il calore alle più basse temperature.

### **Energia, Vita e Progresso**

La vita stessa e tutto ciò che noi facciamo si risolvono unicamente nella trasformazione di tutta l'energia che la Natura ci mette a disposizione.

Attraverso innumerevoli trasformazioni noi mettiamo l'energia a nostra disposizione sotto forma cinetica o potenziale, di tipo elettrico, meccanico, chimico, idraulico ecc.

### **Lo stadio più degradato dell'energia è il calore**

Durante le trasformazioni della vita, del progresso e della natura, parte dall'energia si trasforma irrimediabilmente in calore.

Il calore prodotto da un organismo deve essere ceduto all'atmosfera se si vuole evitare che si surriscaldi mettendosi nelle condizioni di non poter più vivere.

Un motore elettrico per funzionare si riscalda: questo calore deve essere asportato e ceduto all'atmosfera se si vuole evitare che si raggiungano temperature che brucino il materiale isolante.

L'energia cinetica di un veicolo in movimento deve essere trasformata in calore attraverso i freni se si vuole che il veicolo si arresti entro intervalli di tempo e di spazio voluti.

Se un transistore si scalda troppo, si guasta: per mantenere la temperatura entro limiti accettabili bisogna asportare il calore prodotto attraverso vari accorgimenti.

Questo calore così inutilizzabile, viene trasferito all'atmosfera, che si riscalda e lo trasferisce allo spazio cosmico, il quale pure aumenta di temperatura, senza avere più niente a cui trasferire ancora questo calore. Perciò il calore che, degradandosi, raggiunge la temperatura del cosmo è irrecuperabile.

### **L'energia non è illimitata**

L'energia in sé è utilizzabile

- a) nella misura in cui essa esiste in natura allo stato potenziale (combustibili, materia disintegrabile, materia a livelli geodeticci diversi, ecc.) o allo stato cinetico (radiazioni solari e cosmiche, corpi in movimento ecc).
- b) nella misura in cui sia possibile farla "scorrere" da un livello energetico più alto, ad un livello più basso (ad es.: temperatura, altezza geodetica, pressione, livello, potenziale elettrico ecc.).

I motivi che porteranno alla cessazione dell'esistenza dell'universo sono perciò due:

- a) l'esaurimento delle fonti di energia
  - b) l'impossibilità di portare l'energia ad un potenziale superiore a quello raggiunto dall'universo.
- Sono notizie preoccupanti.

Per quanto concerne il sole, niente paura: esso è destinato a durare parecchi miliardi di anni.

Per quanto concerne le fonti di energia che esistono nella terra invece c'è veramente da preoccuparsi. Gli scienziati continuano a dare l'allarme ai politici, ma questi non li possono ascoltare così intenti come sono a guardarsi in cagnesco sperperando inutilmente ingenti quantità di energia ... nel nome dell'avvenire dei nostri figli!

### **Esempi**

Facciamo seguire alcuni esempi per mostrare come tutte le trasformazioni di energia finiscono per trasformarsi in calore.

### **Una bella gita in auto**

Ci si domanda: dove sia andata a finire energeticamente tutta la benzina che abbiamo consumato.

Risposta: a scaldare l'aria nello spostarla e per smaltire il calore generato dal motore e dai freni, inoltre nel consumare il motore gli organi meccanici, i freni e le gomme.

### **Il lancio di un sasso**

L'energia cinetica che abbiamo conferito al sasso nel lanciarlo ad es. in alto, si trasforma interamente in energia potenziale alla massima altezza raggiunta. Già quando sta per caderci sulla testa non ha ripreso, come dovrebbe, di nuovo tutta l'energia cinetica, perché parte è stata già spesa sotto forma di calore per l'attrito con l'aria. Se ci scansiamo, esso cadrà al suolo e dopo qualche salto dovuto a fenomeni di elasticità, esso si fermerà quando avrà trasformato interamente in calore tutta l'energia cinetica che gli avevamo conferita con il lancio.

<b>Sezione</b>	:	1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	:	14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	:	14.1	Concetto di Energia
<b>Argomento</b>	:	14.14	Energia termica ed elettrica

## TRASFORMAZIONI DELL'ENERGIA E PERDITE

Finchè una certa energia non si è completamente degradata in calore alla più bassa temperatura è sempre possibile trasformarla in energia di altro tipo.

Non dimentichiamo però che ogni trasformazione non può avvenire con rendimento (14.32-1) del 100% perchè una parte dell'energia primaria si trasforma in calore che viene ceduto all'atmosfera e da questa al cosmo.

### Esempio di trasformazione

### Dove si verificano le corrispondenti perdite di trasformazione

Si brucia del combustibile in una caldaia (trasformazione termo-chimica), si scalda dell'acqua che si trasforma in vapore sotto pressione (trasformazione termica).

Il vapore viene immesso in una turbina al cui albero rotante è ora presente energia meccanica (trasformazione termodinamica).

La turbina è collegata ad un generatore elettrico ai cui morsetti è presente energia elettrica (trasformazione meccano-elettrica).

In un punto di utilizzazione un grosso motore elettrico è collegato ai terminali di trasporto e produce energia meccanica al suo albero rotante (trasformazione elettromeccanica).

Al motore è collegata una pompa che prende acqua da un fiume e carica un bacino in quota (trasformazione meccano-idrodinamica).

L'acqua nel bacino costituisce una riserva di energia idrostatica che può essere utilizzata nei momenti di maggiore richiesta iniziando una nuova trasformazione.

Alla fine la quantità di energia che si è trasformata è sempre inferiore a quella che si è usata per la trasformazione a causa delle perdite che vengono elencate nella colonna a fianco in corrispondenza ad ogni trasformazione.

Il cammino è fonte di notevoli perdite di energia termica (il fumo è molto caldo).

Anche dalle pareti della caldaia il calore sfugge, malgrado ogni miglioramento che si porta all'isolamento termico.

La stessa sorte subisce il trasporto del vapore dalla caldaia alla turbina.

Gli organi meccanici generano calore per attrito malgrado ogni cura che si mette per ridurlo al minimo anche coi lubrificanti.

Il calore generato dagli organi meccanici deve essere asportato mediante raffreddamento.

Anche il generatore si scalda perchè percorso da corrente elettrica e perchè ha organi meccanici che creano attrito.

Il trasporto di energia scalda gli elettrodotti, anche questo calore deve essere disperso.

Il motore elettrico si scalda per gli stessi motivi.

Anche la pompa si scalda: al suo raffreddamento provvede l'acqua stessa che viene pompata.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.1	Concetto di Energia
Argomento	:	14.15	Energia elettrica potenziale e cinetica

## ENERGIA ELETTRICA POTENZIALE A TENSIONE COSTANTE

È il caso tipico delle batterie, dove la f.e.m. è quasi indipendente dalla carica della batteria stessa.

### Generatori

Fra i modi di generare energia elettrica potenziale si enumерano i seguenti:

Per azioni elettromeccaniche: facendo attraversare un campo magnetico da un materiale conduttore oppure facendo variare il campo magnetico che attraversa un conduttore (v. cap. 12) (macchine elettriche moderne)

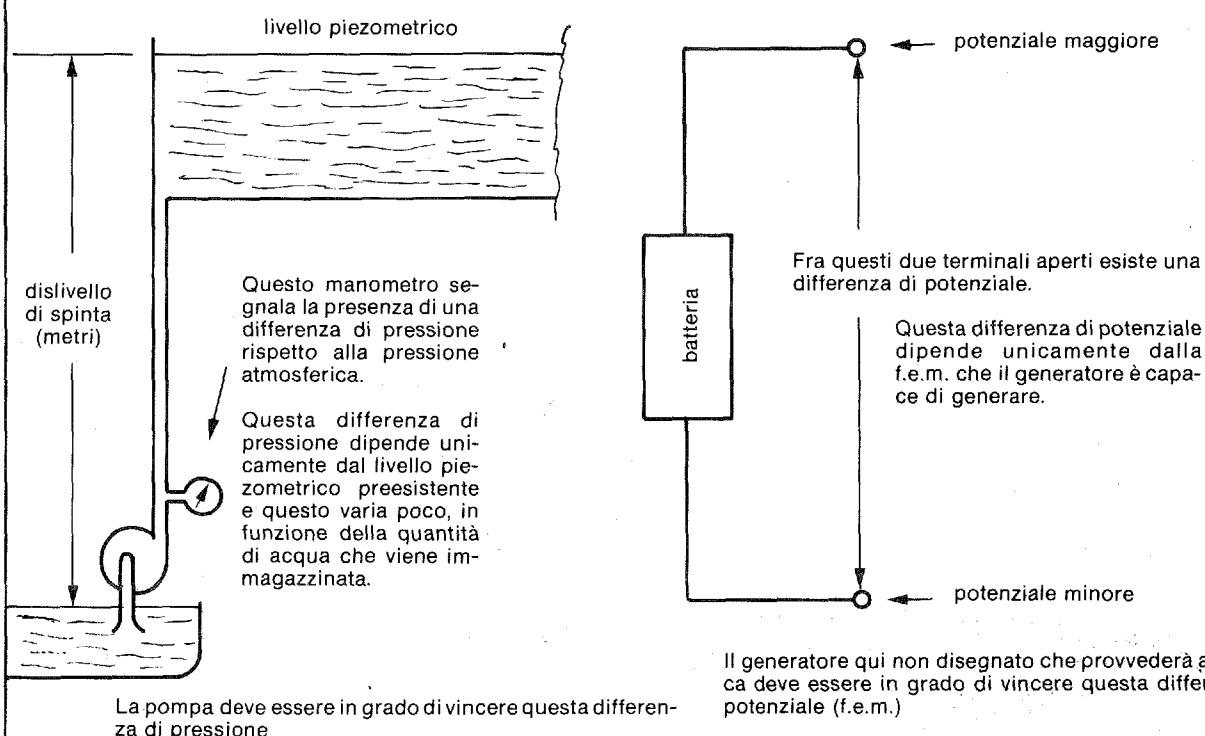
Per azioni elettrostatiche: facendo strofinare del materiale dielettrico (macchine elettrostatiche appartenenti alla storia)

Per azioni elettrochimiche: trasformando il potenziale elettrochimico delle reazioni mediante altra energia elettrica

Esaminiamo il problema con il solito paragone idraulico

**Meccanicamente** è come se innalzassimo dell'acqua al livello preesistente di un grande bacino in quota.

**Elettricamente** è come se innalzassimo delle cariche al potenziale preesistente di una batteria (cioè la sua f.e.m.).



### Energia immagazzinata

Nel caso idraulico essa vale:

$$E = 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot Q \cdot h$$

↑ fattore di equivalenza

↑ dislivello di spinta (in metri)

↑ energia potenz. idraulica immagazzinata (in joule)

volume di acqua accumulata (in m³)

Nel caso elettrico essa vale:

$$E = Q \cdot V$$

↑ Energia elettrica immagazzinata (joule)

↑ differenza di potenziale (in volt)

↑ quantità di elettricità accumulata (in coulomb)

## ENERGIA ELETTRICA POTENZIALE A TENSIONE DIPENDENTE DALLA CARICA

È il caso tipico dei condensatori, dove la tensione di carica è proporzionale alla carica stessa

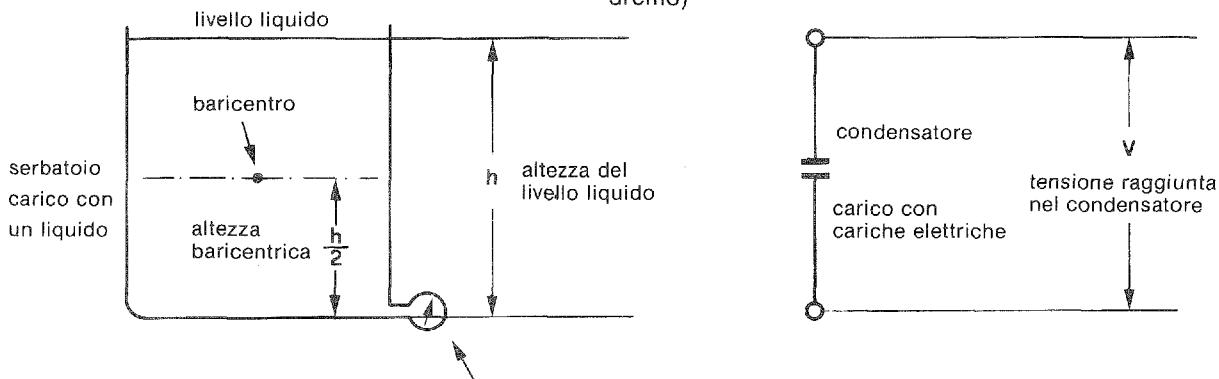
### Condensatori

Abbiamo visto (12.75-1) che la tensione ai capi di un condensatore dipende direttamente dalla quantità di elettricità accumulata, così come la pressione sul fondo di un serbatoio dipende dalla quantità di liquido accumulatovi.

Studiamo l'analogia dei due casi e calcoliamo l'energia accumulata.

**Meccanicamente** è come se caricassimo un serbatoio cilindrico con un liquido

**Elettricamente** è come se "introducessimo" delle cariche in un condensatore (in realtà le spostiamo da una armatura all'altra attraverso il circuito, come vedremo)



La pressione misurata da questo manometro dipende dall'altezza  $h$  del liquido, e quindi dalla quantità di liquido.

L'energia accumulata dipende dall'altezza del punto in cui l'intera massa del liquido si immagina concentrata.

Come è noto questo punto si chiama baricentro e nel caso di serbatoio cilindrico esso si trova a metà altezza rispetto al livello del liquido.

La tensione misurata ai capi di questo condensatore aperto dipende linearmente (proporzionalmente) dalla quantità di elettricità "immessa" nel condensatore stesso.

L'energia accumulata dipende dal valore medio della tensione di carica.

Data la linearità del rapporto il valore medio della tensione, man mano che cresce con la carica corrisponde alla metà della tensione finale di carica.

### Energia immagazzinata

Nel caso meccanico essa è:

altezza del  
livello liquido  
(in metri)

$$E = 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot Q \cdot \frac{h}{2}$$

altezza del  
baricentro

fattore di  
equivalenza  
  
energia potenz.  
idraulica  
accumulata  
(in joule)

volume di acqua  
accumulata  
(in m³)

Nel caso elettrico essa è:

tensione ai capi  
del condensatore  
(in volt)

$$E = Q \cdot \frac{V}{2}$$

tensione  
media

energia  
elettrica  
accumulata  
(in joule)

quantità di elettricità  
accumulata  
(in coulomb)

Sezione	: 1	Grandezze fondamentali
Capitolo	: 14	Energia e potenza
Paragrafo	: 14.1	Concetto di Energia
Argomento	: 14.14	Energia termica ed elettrica

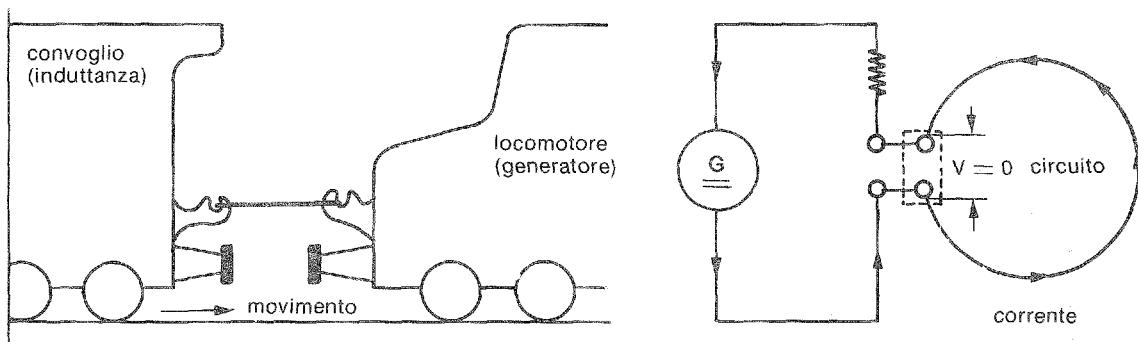
## ENERGIA ELETTRICA CINETICA

Esaminiamo qui comparativamente fenomeni meccanici e fenomeni elettrici che riguardano l'energia cinetica.

**Un circuito si comporta in ogni caso come un induttore.**

**Meccanicamente** abbiamo già visto in (13.31—1) che un treno in corsa possiede e mantiene una energia cinetica,

**Elettricamente** abbiamo anche visto in (13.31-1) la corrente che circola in un circuito chiuso possiede e mantiene una energia cinetica,



tanto è vero che quando il gancio non è in trazione il convoglio continuerebbe la sua corsa anche se venisse tolto il locomotore.

Se il gancio invece è in trazione, come in realtà lo è, significa che nel convoglio ci sono delle resistenze al moto che il locomotore deve superare altrimenti il convoglio si ferma.

tanto è vero che quando non c'è tensione ai capi del circuito e se esso venisse messo in corto, la corrente continuerebbe a circolare anche se venisse tolto il generatore.

Se invece si forma una piccola tensione ai capi del circuito, come è in realtà, significa che nel circuito c'è una resistenza (quella del conduttore ed eventualmente altre) che il generatore deve superare con la sua f.e.m. altrimenti la corrente si arresta.

## Energia immagazzinata

Nel caso meccanico essa è:

$$E = F \cdot t \cdot v$$

energia cinetica immagazzinata (in joule)

Il prodotto  $F \cdot t$  si chiama impulso di moto (newton · secondi)

velocità del convoglio (in m/sec) al momento dello sgancio

Durata di applicazione (in sec.) della forza trainante (in newton)

Nel caso elettrico essa è:

$$E = \frac{1}{2} V \cdot t \cdot I$$

energia cinetica immagazzinata (in joule)

Il prodotto  $Vt$  si chiama impulso di tensione (volt · secondi)

corrente nel circuito (in ampere) al momento del corto circuito

Durata di applicazione (in sec.) della tensione applicata (in volt)

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.2	Energia elettrica e magnetica
Argomento	:	14.20	Indice delle pagine

## Paragrafo 14.2 ENERGIA ELETTRICA E MAGNETICA

### Indice degli argomenti e delle pagine

#### arg. 14.21 — Energia accumulata nelle batterie

- pag. 1 — Energia accumulata in una batteria
  - Comportamento di una batteria
  - Coulomb e Amperora
  - Energia accumulata

#### pag. 2 — Energia accumulata in più batterie in serie e in parallelo

- Batterie in serie
- Batterie in parallelo

#### arg. 14.22 — Energia accumulata nei condensatori

- pag. 1 — Energia accumulata in un condensatore
- pag. 2 — Energia accumulata in più condensatori
  - Condensatori in serie
  - Condensatori in parallelo

#### arg. 14.23 — Energia elettrocinetica e magnetostatica

- pag. 1 — Energia accumulata in un campo magnetico
  - Nozioni generali di illustrazione dei fenomeni
  - Equivalenza delle energie elettrocinetica e magnetostatica
- " 2 — Altre espressioni dell'energia magnetostatica
  - Magneti permanenti
- " 3 — Energia accumulata in un induttore
  - Comportamento in un induttore
  - Espressione dell'energia accumulata in funzione della induttanza
- " 4 — Energia accumulata in più induttori
  - Induttori in serie
  - Induttori in parallelo



## ENERGIA ACCUMULATA IN UNA BATTERIA

Il caso è esaminato in dettaglio e dal punto di vista elettrico

### Comportamento di una batteria

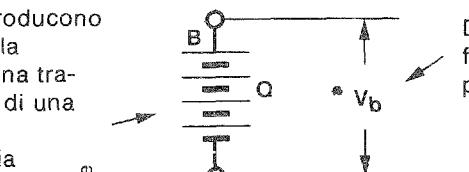
Ci troviamo nella situazione accennata in (14.15—1) e cioè:

man mano che si introducono cariche elettriche nella batteria, si provoca una trasformazione chimica di una sostanza in un'altra.

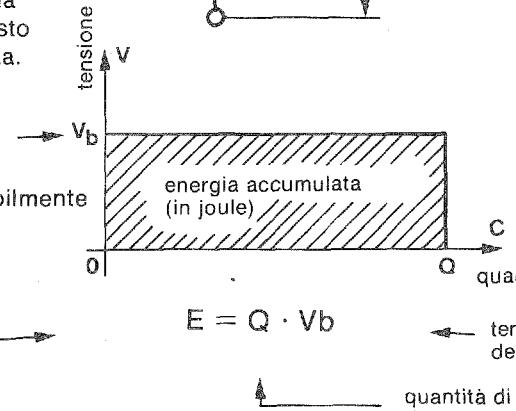
Ciò a spese di energia elettrica che per questo fatto resta accumulata.

Il diagramma qui a fianco illustra questo comportamento ed è visibile come la f.e.m. non vari sensibilmente all'aumentare della carica elettrica accumulata.

Energia accumulata (in joule) nella batteria



Durante questo processo la f.e.m. fra gli elettrodi resta pressoché costante.



L'energia elettrica accumulata nella batteria corrisponde all'area del rettangolo formato dal diagramma e misurata con le dimensioni degli assi coordinati

tensione (in volt) ai capi della batteria  
 quantità di elettricità accumulata (in coulomb)

### Coulomb e Amperora

Comunemente la carica di una batteria si misura in amperora (Ah).

È un sistema comodo perché corrisponde:

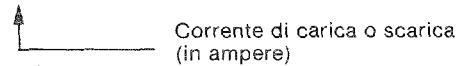
- al tempo in ore impiegato dalla batteria carica per scaricarsi erogando la corrente di 1A
- al tempo in ore impiegato dalla batteria scarica per caricarsi mediante assorbimento della corrente di 1A.

Poichè raddoppiando la corrente si dimezza il tempo di carica o scarica per ottenere la stessa quantità accumulata ecc., il prodotto tempo x corrente definisce una costante che corrisponde alla capacità della batteria e potremo scrivere la seguente relazione.

quantità di elettricità accumulata (in amperora)

$$Q_A = I \cdot t_h$$

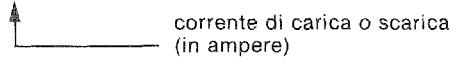
tempo (in ore) impiegato per la carica o scarica



mentre sappiamo che la quantità di elettricità accumulata (in coulomb)

$$Q = I \cdot t$$

tempo (in sec.) impiegato per la carica o scarica



È evidente che le due relazioni stanno nello stesso rapporto che intercorre fra il numero di ore ed il corrispondente numero di secondi; cioè

carica in joule

$$Q = 3600 Q_A$$

carica in amperore

### Energia accumulata

In seguito alle descrizioni sopra riportate trascriviamo la relazione nel doppio modo:

energia accumulata (joule)

$$E = Q \cdot V_b = 3600 Q_A \cdot V_b$$

carica accumulata (in coulomb)  
 f.e.m. presente nella batteria (in volt)

f.e.m. presente (in volt)  
 carica accumulata (in amperora)

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.2	Energia elettrica e magnetica
Argomento : 14.21	Energia accumulata nelle batterie



## ENERGIA ACCUMULATA IN PIU' BATTERIE IN SERIE E IN PARALLELO

Le energie globali contenute in più batterie, si sommano, siano esse collegate in serie o in parallelo.

### Batterie in serie

Si abbiano delle batterie in serie scaricate.

Ciascuna abbia la propria f.e.m.  $V_n$  (volt) e assorba l'unica corrente  $I$  (amp)

Supponiamo che siano caricate da un generatore G assorbendo una corrente  $I$ .

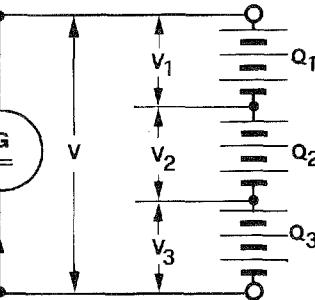
Dopo un tempo  $t$  (sec.) ogni batteria si sarà caricata della stessa quantità di elettricità (in coulomb) v: 11.21-1

$$Q = I \cdot t$$

e si sarà accumulata globalmente una energia (in joule)

sarà

$$E = V \cdot I \cdot t$$



$$E = V_1 Q + V_2 Q + V_3 Q +$$

$$\begin{matrix} \text{energia} & \text{energia} & \text{energia} & \text{energia} \\ \text{totale} & 1^{\circ} \text{ batt.} & 2^{\circ} \text{ batt.} & 3^{\circ} \text{ batt.} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ E = E_1 + E_2 + E_3 \end{matrix}$$

cioè  
l'energia totale accumulata è somma delle energie parziali competenti a ciascuna batteria.

### Avvertenza

Ogni batteria accumula la stessa quantità di elettricità (essendo corrente e tempo di erogazione uguale per tutte) perciò si saturerà prima la batteria meno capace.

Inversamente, durante la fase di scarica, per lo stesso motivo esse si scaricano di una uguale quantità di elettricità, perciò l'erogazione va arrestata quando si completa la scarica della batteria inizialmente meno carica.

### Batterie in parallelo

Si abbiano delle batterie in parallelo ciascuna assorba la propria corrente  $I_n$  (amp) ed abbia un'unica f.e.m.  $V$  (volt)

Supponiamo che siano caricate da un generatore G assorbiendo una corrente  $I$

Dopo un tempo  $t$  (sec.) ogni condensatore sarà caricato di una quantità di elettricità (in coulomb) v: 11.21-1

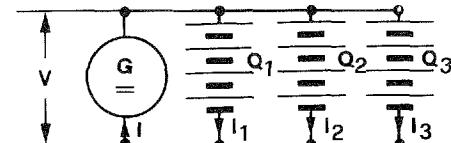
$$Q = I_n \cdot t$$

e si sarà accumulata globalmente una energia (in joule)

$$\begin{matrix} E = V \cdot I \cdot t \\ E = V \cdot I_1 t + V \cdot I_2 t + V \cdot I_3 t \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \text{energia} & \text{energia} & \text{energia} & \text{energia} \\ \text{totale} & 1^{\circ} \text{ batt.} & 2^{\circ} \text{ batt.} & 3^{\circ} \text{ batt.} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ E = E_1 + E_2 + E_3 \end{matrix}$$

si conclude perciò che



La corrente che assorbe ciascuna batteria dipende dal valore della propria resistenza interna.

$$\text{ma poichè } I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$Q = I_1 \cdot t + I_2 \cdot t + I_3 \cdot t$$

cioè

L'energia totale accumulata è somma delle energie parziali competenti a ciascun batteria.

### Avvertenza

Ogni batteria non accumula la stessa quantità di elettricità (essendo diversa la corrente assorbita da ciascuna). La carica avverrà contemporaneamente poiché ogni batteria man mano che si carica assorbe una corrente sempre minore, dato che aumenta la sua resistenza interna.

Inversamente anche durante la fase di scarica, per lo stesso motivo esse non si scaricano di una uguale quantità di elettricità, perciò ogni batteria va staccata non appena avrà esaurito la sua carica.



## ENERGIA ACCUMULATA IN UN CONDENSATORE

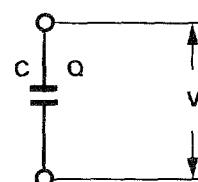
Per il fatto che la tensione cresce man mano che si introducono le cariche, l'energia accumulata è metà di quella contenuta in una batteria sottoposta alla medesima corrente al raggiungimento della sua f.e.m.

Ci troviamo nella situazione accennata in 14.15-2 e cioè:

L'"introduzione" di cariche elettriche  $Q$  in un condensatore corrisponde nella realtà al trasporto delle stesse cariche da una armatura all'altra.

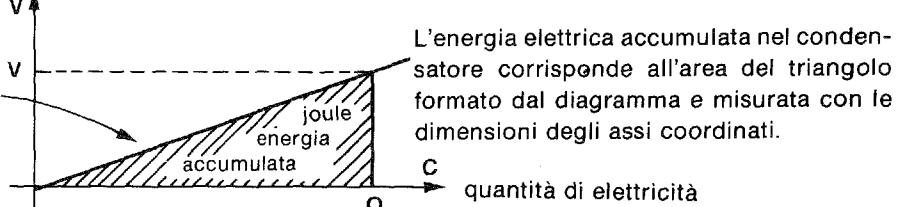
Ciò a spese di energia elettrica che per questo fatto resta accumulata nel condensatore.

Il diagramma qui a fianco illustra questo comportamento ed è visibile come la tensione vari linearmente all'aumentare della carica elettrica accumulata.



Durante questo processo di "introduzione" delle cariche, la tensione ai capi delle armature cresce in ragione inversa alla capacità.

$$\text{tensione (V)} \quad V = \frac{Q}{C} \quad \begin{matrix} \text{carica (C)} \\ \text{capacità (F)} \end{matrix}$$



Calcolando in base al diagramma si ottiene:

Energia accumulata (in joule) nel condensatore in funzione della carica.

oppure

Energia accumulata (in joule) nel condensatore in funzione della capacità.

$$E = \frac{Q \cdot V}{2} \quad \begin{matrix} \text{quantità di elettricità accumulata (in coulomb)} \\ \downarrow \\ \text{tensione (in volt) ai capi del condensatore} \end{matrix}$$

$$E = \frac{C V^2}{2} \quad \begin{matrix} \text{capacità del condensatore (in farad)} \\ \downarrow \\ \text{tensione (in volt e al quadrato) ai capi del condensatore} \end{matrix}$$

Sezione	:	1.	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.2	Energia elettrica e magnetica
Argomento	:	14.22	Energia accumulata nei condensatori



## ENERGIA ACCUMULATA IN PIU' CONDENSATORI

Le energie accumulate si sommano indipendentemente dal modo come sono collegati i condensatori.

### Condensatori in serie

Sia  $I$  (in amp) la corrente costante di carica: la tensione  $V$  (volt) crescerà linearmente.

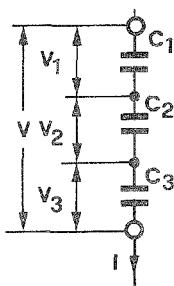
Dopo un tempo  $t$  (sec) ogni condensatore si sarà caricato della stessa quantità di elettricità (in coulomb) v. 11.21-1

$$Q = I \cdot t$$

e si sarà accumulata globalmente l'energia (in joule)

$$E = \frac{I \cdot t \cdot V}{2}$$

ma poiché  $V = V_1 + V_2 + V_3$



### Condensatori in parallelo

Sia  $I$  (in amp) la corrente costante di carica: la tensione  $V$  crescerà linearmente.

Dopo un tempo  $t$  (sec) ogni condensatore si sarà caricato di una quantità di elettricità (in coulomb) v. 11.21-1

$$Q = I_n \cdot t$$

e si sarà accumulata globalmente l'energia (in joule)

$$E = \frac{I \cdot t \cdot V}{2}$$

ma poichè  $I = I_1 + I_2 + I_3$

$$\begin{aligned} \text{sarà } E &= \frac{I_1 t \cdot V}{2} + \frac{I_2 t \cdot V}{2} + \frac{I_3 t \cdot V}{2} \\ \text{energia totale} &\quad \text{energia 1° cond.} \quad \text{energia 2° cond.} \quad \text{energia 3° cond.} \end{aligned}$$

e si conclude  $E = E_1 + E_2 + E_3$   
cioè

e si conclude  $E = E_1 + E_2 + E_3$   
cioè

L'energia totale immagazzinata è somma delle energie parziali competenti a ciascun condensatore

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.2	Energia elettrica e magnetica
Argomento	:	14.23	Energia elettrocinetica e magnetostatica



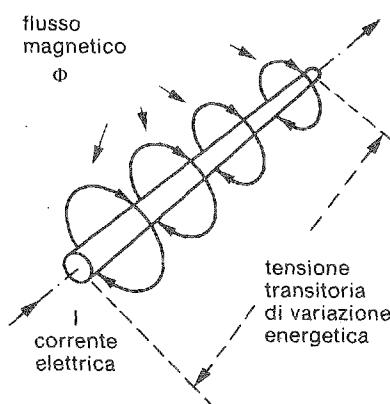
## ENERGIA ACCUMULATA IN UN CAMPO MAGNETICO

A spese dell'energia elettrocinetica (corrente elettrica) si crea energia potenziale di tipo magnetostatico.

### Nozioni generali ed illustrazione dei fenomeni

Abbiamo visto (12.12.1) che il passaggio di una corrente elettrica di valore costante crea un campo magnetico pure costante.

Il fenomeno transitorio che si verifica con presenza di tensione ai capi del conduttore (Par.13.3) denuncia solo l'eventuale fase di modifica del livello energetico.



Quando la corrente elettrica ha raggiunto un valore costante non c'è presenza di tensione ai capi del conduttore, (se esso è privo di resistenza elettrica).

Ciò significa che l'energia accumulata nel relativo circuito magnetico non subisce variazioni.

La presenza di questa energia la avvertiamo qualora tentassimo di diminuire la corrente elettrica.

Infatti si ripresenterebbe una tensione di polarità opposta alla precedente.

### Equivalenza delle energie elettrocinetica e magnetostatica

L'energia potenziale di tipo magnetico accumulata in un tronco di conduttore deve essere uguale a quella della energia cinetica assunta dalla corrente elettrica (14.05-2) e cioè

energia accumulata (in joule) → nel magnete	$E = \frac{1}{2} V \cdot t \cdot I =$	espressione elettrocinetica  $\frac{1}{2} I \Phi$ espressione magnetostatica
tensione transitoria (V) che si presenta solo du- rante le variazioni uni- formi della corrente		flusso magnetico (in weber)  forza magneto-motrice (in asp.) dovuta al passaggio della corrente I in una sola spira (un solo conduttore)
	$\frac{1}{2} I^2 t$	

### Osservazione

È affascinante constatare l'analogia con i fenomeni elettrostatici osservando, dall'unghianza delle sue espressioni sopra riportate come

il prodotto  $V \cdot t$   
(in voltsecondi)...

$$V \cdot t = \Phi$$

...si identifica con ...

... quantità di magnetismo (che si identifica col flusso magnetico cioè ha le dimensioni di una "carica" magnetica e non di una corrente).

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.2	Energia elettrica e magnetica
Argomento	:	14.23	Energia elettrocinetica e magnetostatica



### Altre espressioni dell'energia magnetostatica

La medesima espressione magnetostatica assume forme diverse a seconda di quali grandezze si prendono in considerazione (v. 12.1).

energia accumulata (in joule) nel magnete in funzione della f.m.m.	$E = \frac{1}{2} \frac{(NI)^2}{R}$	f.m.m. (asp) di più conduttori attraversati dalla stessa corrente
energia accumulata (in joule) nel magnete in funzione del flusso	$E = \frac{1}{2} \Phi^2 R$	riluttanza (asp/wb) del circuito magnetico
 flusso magnetico (in weber)		

### Magneti permanenti

Quest'ultima espressione vale anche per i magneti permanenti.

Essi non renderanno l'energia di eccitazione al conduttore o alla bobina che li ha magnetizzati, al cessare della corrente magnetizzante (v. sez. 2: Elementi dei circuiti).

## ENERGIA ACCUMULATA IN UN INDUTTORE

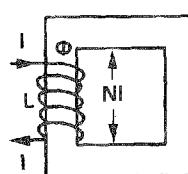
Il concetto di energia accumulata in un induttore non differisce da quello di energia accumulata in un circuito magnetico, dato che questo è parte integrante di quello: la differenza sta nel fatto che qui esprimiamo la energia accumulata in funzione della grandezza elettromagnetica di autoinduzione o induttanza.

### Comportamento in un induttore

Se stiamo bene attenti constateremo che la situazione concettualmente non è diversa da quella del condensatore (14.22-1)

Facciamo conto di "introdurre" cariche magnetiche  $\Phi$  nell'induttore facendo passare una corrente  $I$  nel suo avvolgimento.

Ciò a spese di energia elettrica che si trasforma e si accumula nell'induttore.

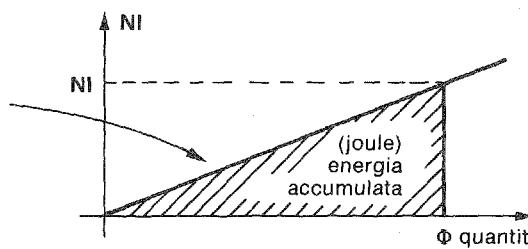


Durante questo processo di "introduzione" delle cariche magnetiche, la f.m.m. cresce in ragione diretta alla riluttanza.

carica (wb)

$$\text{f.m.m. (asp)} NI = \Phi \mathcal{R} \times \text{riluttanza (asp/wb)}$$

Il diagramma qui a fianco illustra questo comportamento ed è visibile come la f.m.m. varii linearmente con l'aumentare della carica magnetica (flusso) accumulata.



L'energia magnetica accumulata nell'induttore corrisponde all'area del triangolo formato dal diagramma e misurata con le dimensioni degli assi coordinati.

Calcolando in base al diagramma si ottiene:

$$E = \frac{\Phi NI}{2}$$

Energia accumulata (in joule) nell'induttore in funzione del flusso

f.m.m. (in asp) agli estremi della bobina

### Espressione dell'energia accumulata in funzione dell'induttanza

Per passare a questa espressione, si parte dalla precedente sostituendo il flusso (o carica magnetica) con la sua espressione equivalente.

$$\text{carica magnetica o flusso (in wb)} \rightarrow \Phi = \frac{NI}{\mathcal{R}}$$

f.m.m. (in asp)

riluttanza (in asp/wb)

$$E = \frac{NI}{\mathcal{R}} \frac{NI}{2} = \frac{1}{2} \frac{N^2 I^2}{\mathcal{R}}$$

ma  $\frac{N^2}{\mathcal{R}} = L$  induttanza (H)

(12.27-2)

$$E = \frac{1}{2} L I^2$$

energia accumulata (in joule) nell'induttore in funzione dell'induttanza

corrente (in ampere) che circola nella bobina

induttanza (in henry) dell'induttore



## ENERGIA ACCUMULATA IN PIU' INDUTTORI

Le energie accumulate in più induttori, siano essi collegati in serie o in parallelo, si sommano

### Induttori in serie

Sia  $V$  (in volt) la tensione costante di carica:  
la corrente  $I$  (ampere) crescerà linearmente.

Dopo un tempo  $t$  (sec.) ogni induttore si sarà caricato della stessa quantità di magnetismo o flusso (in weber) v: 14.12-2

$$\Phi = V_n t$$

e si sarà accumulata globalmente l'energia (in joule) v: 14.13-1

$$E = \frac{V \cdot t \cdot I}{2}$$

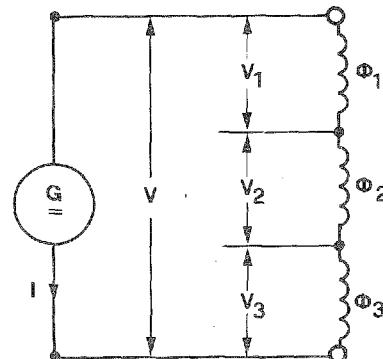
ma poichè  $V = V_1 + V_2 + V_3$

$$E = \frac{V_1 t \cdot I}{2} + \frac{V_2 t \cdot I}{2} + \frac{V_3 t \cdot I}{3}$$

↓ energia totale    ↓ energia 1° indutt.    ↓ energia 2° indutt.    ↓ energia 3° indutt.

e si conclude  $E = E_1 + E_2 + E_3$

cioè L'energia totale immagazzinata è somma delle energie parziali competenti a ciascun induttore



### Induttori in parallelo

Sia  $V$  (in volt) la tensione costante di carica:  
la corrente  $I$  (ampere) crescerà linearmente.

Dopo un tempo  $t$  (sec.) ogni induttore si sarà caricato di una quantità di magnetismo o flusso (in weber) v: 14.12-2

$$\Phi = V \cdot t$$

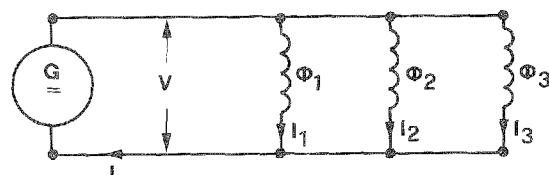
e si sarà accumulata globalmente l'energia (in joule)

$$E = \frac{V \cdot t \cdot I}{2} \quad \text{ma poichè} \quad I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$E = \frac{V \cdot t \cdot I_1}{2} + \frac{V \cdot t \cdot I_2}{2} + \frac{V \cdot t \cdot I_3}{2}$$

↓ energia totale    ↓ energia 1° indutt.    ↓ energia 2° indutt.    ↓ energia 3° indutt.

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$



cioè L'energia totale immagazzinata è somma delle energie parziali competenti a ciascun induttore

<b>Sezione</b>	:	1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	:	14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	:	14.3	Potenza
<b>Argomento</b>	:	14.30	Indice delle pagine

## Paragrafo 14.3

# POTENZA

### Indice degli argomenti e delle pagine

#### arg. 14.31 - Concetto di potenza

- pag. 1 — Potenza e sua misura: il watt
  - Definizione di potenza
  - Vari tipi di potenza
  - Relazione matematica
  - Raccomandazioni
- " 2 — Esempi pratici
  - Potenza necessaria al sollevamento
  - Consumo in benzina di un motore di una data potenza
  - Potenza termica di una stufa

#### arg. 14.32 - Confronti e derivazioni

- pag. 1 — Il watt a confronto di altre misure di potenza
- " 2 — Il joule è spesso una unità troppo piccola per misurare l'energia
  - Unità di misura di energia derivate da misure di potenza
  - Rendimento

#### arg. 14.33 - In corrente continua

- pag. 1 — Il watt rispetto a tensione e correnti continue
  - " — Il watt rispetto a resistenza e conduttanza

#### arg. 14.34 - In corrente alternata

- pag. 1 — Rappresentazione grafica dei fattori della potenza alternata
- " 2 — Rappresentazione trigonometrica della potenza alternata
- " 3 — Rappresentazione grafica della potenza alternata
- " 4 — Rappresentazione vettoriale della potenza alternata e dei suoi fattori
- " 5 — Rappresentazione della potenza alternata con i parametri del circuito
- " 6 — Concetto di valore di tensione

<b>Sezione</b>	:	1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	:	14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	:	14.3	Potenza
<b>Argomento</b>	:	14.31	Concetto di Potenza

## POTENZA E SUA MISURA: IL WATT

Si insiste sul concetto di potenza e sulle possibili confusioni che si possono generare col concetto di energia che è ben diverso.

### Definizione di Potenza

Per potenza si intende la rapidità con la quale l'energia viene trasformata in lavoro o in altra energia a mezzo di macchine o varie apparecchiature.

Poiché questa definizione, che vuole essere assolutamente generale, può non soddisfare il lettore, vediamo di trovarne delle altre.

### Vari tipi di Potenza

Si potrebbe dire che un motore sia tanto più potente quanto più rapidamente consuma benzina, ma questa definizione è troppo imprecisa, perché un motore progettato male o logorato può consumare benzina più rapidamente, senza essere capace magari di muovere una bicicletta.

Dovremo perciò dire che un motore è tanto più potente quanto più rapidamente trasforma l'energia benzina in energia utile di qualsiasi tipo.

Comunque, a parte i concetti di rendimento di un motore, si può sempre parlare di

potenza resa: la rapidità con la quale l'energia utile si produce da altra energia.

potenza dispersa: la rapidità con la quale si disperde (cioè non si trasforma in energia utile) parte dell'energia da trasformare.

potenza assorbita: la rapidità con la quale si consuma energia per effettuare le due precedenti trasformazioni (in realtà si vuole ottenere la prima, ma non si può evitare la seconda).

### Relazione matematica

Avrete notato quante volte abbiamo trovato la parola "rapidità" nella definizione della potenza.

Il concetto di rapidità è legato al tempo: un dato lavoro è effettuato tanto più rapidamente, quanto meno tempo si impiega ad effettuarlo.

Quanto più rapidamente si compie un dato lavoro, tanto più potente è l'apparecchio che lo compie.

Possiamo scrivere perciò la seguente relazione che definisce anche l'unità di misura: il watt.

potenza  
(in watt)



$$P = \frac{E}{t}$$

← energia (in joule) trasformata in lavoro  
diviso  
← durata (in secondi) della trasformazione

Osservando la relazione, tanto per fissare le idee, diremo che, anche piccole energie, trasformate in tempi brevissimi possono dar luogo a potenze enormi anche se di brevissima durata.

### Raccomandazioni

È indispensabile che il lettore mediti bene sui due concetti di potenza ed energia, poiché hanno dimensioni assolutamente diverse e perciò non sono paragonabili.

È assolutamente necessario inoltre che non si facciano confusioni fra queste due grandezze.

Non è cosa grave che giornalisti, avvocati, letterati, contabili e massaie facciano regolarmente e con la massima disinvolta confusioni di questo tipo, ma è intollerabile che un tecnico elettronico non abbia ben chiari questi due concetti.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.3	Potenza
Argomento	:	14.31	Concetto di potenza

## ESEMPI PRATICI

Per fissare le idee sui concetti di energia e potenza facciamo alcuni esempi numerici.

### Potenza necessaria al sollevamento

Abbiamo visto in 14.12-1 che per sollevare un carico di 3 tonn. all'altezza di 15 metri occorre consumare una energia di 441.000. joule.

A nostro piacere noi potremmo desiderare di impiegare una intera giornata per effettuare questo lavoro oppure di effettuarlo in un minuto.

È evidente che nell'uno o nell'altro caso, pur trattandosi di consumare la stessa energia, occorreranno potenze ben diverse.

Se vogliamo effettuarlo in un minuto, dovendo il tempo essere espresso in secondi, calcoleremo la potenza dividendo l'energia col tempo di 1 min. cioè 60 secondi. Quindi

Potenza di sollevamento  $P_1 = 441.000 \text{ joule} : 60 \text{ sec} = 7350 \text{ watt}$ .

Se ci accontentiamo di effettuare lo stesso lavoro nell'arco di un intero giorno, cioè 24 ore, cioè ancora  $24 \times 3600 \text{ sec/h} = 86.400 \text{ sec}$ , avremo

Potenza di sollevamento  $P_2 = 441.000 \text{ joule} : 86.400 \text{ sec} = 5,1 \text{ watt}$ .

### Consumo in benzina di un motore di data potenza

Un motore a scoppio sviluppa la potenza di 70 HP.

Domanda: quanta benzina consuma in un'ora di funzionamento?

La potenza di 70 HP corrisponde alla potenza di 51.520 W. (v. 14.32-1)

Poichè in un motore a scoppio la potenza resa è solo circa il 5% della potenza assorbita, avremo che la potenza assorbita è  $(51.520 \text{ W} : 5) \times 100 = 1.030.400 \text{ W}$  (in termini di rapidità di consumo di benzina).

Ora sappiamo che 1.030.400 w significa consumare 1.030.400 joule ogni secondo, e poichè un'ora consta di 3600 sec, in quell'ora avremo bisogno di consumare una

energia totale assorbita pari a  $1.03 \cdot 10^6 \text{ watt} \times 3600 \text{ sec} = 3,71 \cdot 10^9 \text{ joule}$

Per passare da questa quantità di energia a quella equivalente di benzina ricorderemo che (14.12)  
1 litro di benzina  $= 3,4 \cdot 10^7 \text{ joule}$ , perciò necessiterà una

quantità di benzina pari a  $3,71 \cdot 10^9 \text{ joule} : 3,4 \cdot 10^7 \text{ joule/litro} = 10,9 \text{ litri}$

### Potenza termica di una stufa

Si abbia una stufa che bruci 10 kg di legna ogni ora.

La combustione di 10 Kg di legna sviluppa (14.12-2) energia termica pari a  $10 \text{ kg} \times 1,88 \cdot 10^7 \text{ joule/kg} = 18.8 \cdot 10^7 \text{ joule}$ .

Se questa energia viene trasformata in calore, ogni ora si avrà una potenza termica sviluppata di  $18.8 \cdot 10^7 \text{ joule/h}$ .

e trasformando il tempo in secondi si avrà una equivalente

potenza termica sviluppata  $18.8 \cdot 10^7 \text{ joule/h} : 3600 \text{ sec/h} = 52000 \text{ joule/sec} = 52 \text{ kW}$

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 14 Energia e potenza  
 Paragrafo : 14.3 Potenza  
 Argomento : 14.32 Confronti e derivazioni

## IL WATT A CONFRONTO CON ALTRE MISURE DI POTENZA

La potenza è un termine concettuale universale.

Essa però può essere misurata in molti modi a seconda delle tecniche e degli strumenti usati per effettuare le misure.

È evidente che, data l'universalità del concetto, l'una misura può essere definita con l'altra secondo un rapporto ben preciso.

Nelle tabelle che seguono ci si riferisce sempre al watt per avere una idea delle dimensioni di questa grandezza tipicamente elettrica.

### Determinazione in watt di altre unità di misura di potenza

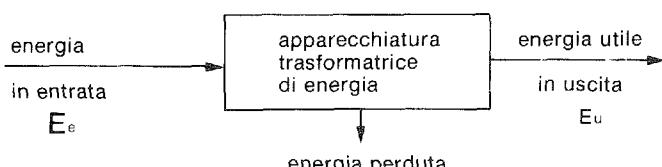
Denominazione della unità di misura di potenza	Quantità di energia trasformata E (joule)	Tempo di trasformazione t (secondi)	Potenza corrispondente $P = \frac{E}{t}$ (watt)	Tecnica di impiego
chilogrammetro/sec	kgm/sec	9,8	9,8	meccanica
caloria/ora	Cal/h	4184	1,16	termodinamica
chilowatt	KW	1000	1000	elettrotecnica
cavallo vapore	HP	736	736	meccanica

## RENDIMENTO

### Premessa

Abbiamo già visto (14.14-2) come qualsiasi apparecchiatura o "generatore" che dir si voglia, sia in realtà un "trasformatore di energia".

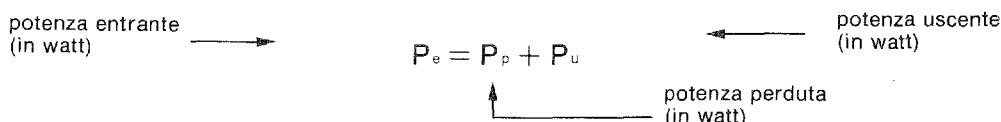
Purtroppo queste trasformazioni avvengono con produzione di calore da parte dell'apparecchiatura stessa. Come è noto, il calore è una energia irrecuperabile, cioè è irrimediabilmente perduta quando è abbandonata nello spazio.



La situazione è illustrata in figura e il bilancio energetico è il seguente:

$$E_e = E_u + E_p$$

È evidente che il bilancio deve essere riferito al medesimo intervallo di tempo per cui vale la pena di riferirsi direttamente alle relative potenze.



### Definizione

Si intende per rendimento di una apparecchiatura il rapporto

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \quad \begin{array}{l} \text{potenza uscente o utile} \\ \text{potenza entrante} \end{array}$$

oppure anche

$$\eta = \frac{P_e - P_p}{P_e} \quad \begin{array}{l} \text{dove la potenza utile è definita come} \\ \text{differenza fra potenza entrante e potenza perduta} \end{array}$$

Si deduce quindi che il rendimento di una apparecchiatura è sempre inferiore a 1 ( $\eta < 1$ ) poiché il numeratore che la esprime è sempre inferiore al denominatore.

In termini percentuali si dice che il rendimento di una apparecchiatura è sempre inferiore al 100%.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.3	Potenza
Argomento	:	14.32	Confronti e derivazioni

**IL JOULE È SPESSO UN'UNITÀ TROPPO PICCOLA PER MISURARE L'ENERGIA**

Nelle applicazioni industriali l'espressione dell'energia in termini di joule costringe all'impiego di cifre troppo grosse.

Anche motivi di comodità di impiego hanno portato l'uso di unità di energia derivate dalle unità di potenza (v. 14.12-2)

**Unità di misura di energia derivate da unità di misura di potenza**

Si può definire l'energia desumendola dal tempo di funzionamento di un apparecchio che sviluppi una determinata potenza.

Prendiamo esempio dall'energia consumata da un apparecchio della potenza di 3W che funzioni per 2 sec.

Diremo che, se ogni watt corrisponde alla rapidità di consumo di energia di 1 joule al secondo, 3 watt corrisponderanno a 3 joule al secondo.

In 2 sec. si saranno consumati  $3 \times 2 = 6$  joule.

Infatti se consideriamo che (14.31-1)

$$\text{potenza (in watt)} \longrightarrow P = \frac{E}{t} \quad \begin{array}{l} \text{energia (in joule) trasformata} \\ \text{tempo (in sec) di trasformazione} \end{array}$$

Risolvendo rispetto all'energia si ha

$$\text{energia (in joule) trasformata dal dispositivo} \longrightarrow E = P \cdot t \quad \begin{array}{l} \text{durata di funzionamento del dispositivo (in sec.)} \\ \text{potenza (in watt) sviluppata o assorbita dal dispositivo} \end{array}$$

Ci sono alcune unità di misura che derivano da questo concetto e sono elencate nella seguente tabella.

Denominazione della unità di misura di energia	Potenza sviluppata P (watt)	Tempo di funzionamento t (sec)	Energia corrispondente E = P · t (joule)	Tecnica di impiego
Chilowattora Cavallo vapore ora	kWh HPh	1000 736	3600 3600	$3,6 \cdot 10^6$ $2,65 \cdot 10^6$

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 14 Energia e potenza  
 Paragrafo : 14.3 Potenza  
 Argomento : 14.33 In corrente continua

### IL WATT RISPETTO A TENSIONE E CORRENTE CONTINUE

Partendo dai concetti espressi in 14.14-2 per l'energia, per definire la potenza si considera ora la rapidità con la quale la stessa energia viene utilizzata.

#### Espressione matematica in accordo con la definizione (14.31-1)

In conformità a quanto visto in 14.14-2, l'espressione dell'energia elettrica è la seguente.

$$\text{energia elettrica} \rightarrow E = V \cdot Q \quad \begin{matrix} \leftarrow \\ \text{quantità di elettricità} \\ (\text{in coulomb}) \end{matrix}$$

potenziale (in volt) rispetto al punto di riferimento

Poichè la potenza è la rapidità con la quale questa energia viene utilizzata (14.21-1) scriveremo:

$$\text{potenza elettrica} \rightarrow P = \frac{E}{t} = V \cdot \frac{Q}{t} \quad \begin{matrix} \leftarrow \\ \text{quantità di elettricità} \\ (\text{in coulomb}) \end{matrix}$$

durata (in secondi)  
del transito di detta carica elettrica

espressione equivalente della potenza come rapidità di utilizzazione della energia (joule/secondo)

poichè dunque  $\frac{Q}{t} = I$  avremo

l'espressione  $Q/t = I$  equivale alla corrente elettrica (in ampere) (11.21-1)

tensione fra i due punti fra i quali si effettua la misura (in volt)

potenza elettrica (in watt) sviluppata o utilizzata →  $P = V \cdot I$  ← corrente (in ampere) che passa attraverso il dispositivo

tensione (in volt) ai capi del dispositivo

#### Unità di misura: il watt

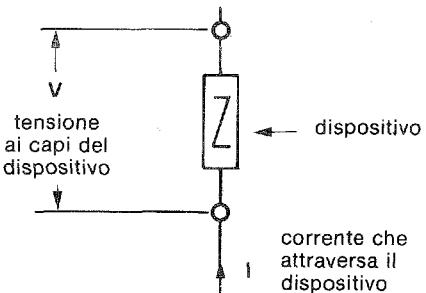
Secondo l'espressione universale della potenza elettrica, la sua unità di misura, il watt, simbolo W, può essere definito unitariamente in questo modo.

Si sviluppa la potenza di 1 watt in un dispositivo quando esso, attraversato dalla corrente di 1 ampere genera ai suoi capi la tensione di 1 volt produce attraverso di esso la corrente di 1 ampere oppure quando applicata ai suoi capi la tensione di 1 volt si produce attraverso di esso la corrente di 1 amper.

Abbiamo appena pronunciato l'espressione unitaria cioè quella formata interamente da unità di misura.

È evidente però che la potenza di 1 watt si ottiene con qualunque combinazione di fattori (V ed I si chiamano i fattori della potenza) tale che il loro prodotto sia sempre uguale a 1 watt.

Così ad esempio danno 1 W le seguenti combinazioni di fattori:  
 10 A con 0,1 V; 0,2 A con 5 V; 4 mA con 250 V; 1000 A con 1 mV; ecc.



Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.3	Potenza
Argomento : 14.33	In corrente continua

## IL WATT RISPETTO A RESISTENZA E CONDUTTANZA

Poiché il rapporto  $V/I = R$  definisce la resistenza (10.21-1) ed il rapporto  $I/V = G$  definisce la conduttanza, (10.21-3) si può definire la potenza in funzione di queste due grandezze.

### Potenza elettrica in funzione di parametri reciproci del circuito

Abbiamo visto alla pagina precedente l'espressione universale della potenza

$$P = V \cdot I$$

Volendo esprimere la stessa potenza

potenza elettrica (in watt)  
sviluppata o utilizzata  
dal dispositivo

corrente (in ampere) che  
passa attraverso il dispositivo

tensione (in volt) ai capi  
del dispositivo

in funzione della **resistenza**,

dobbiamo ricordare (10.21) che in un dispositivo

$$R = \frac{V}{I}$$

resistenza (in ohm)  
del dispositivo

tensione (in volt)  
ai capi del dispositivo

corrente (in amp.)  
che attraversa  
il dispositivo

in funzione della **conduttanza**

dobbiamo ricordare (10.21) che in un dispositivo

$$G = \frac{I}{V}$$

conduttanza (in siemens)  
del dispositivo

corrente (amp)  
che attraversa  
il dispositivo

tensione (in volt)  
ai capi del dispositivo

da cui  $V = R I$

e sostituendo questo valore nella espressione universale si ha:

$$P = RI \cdot I$$

cioè

$$P = RI^2$$

potenza elettrica  
(in watt)  
sviluppata o  
utilizzata dal  
dispositivo

corrente (in amp.)  
che attraversa  
il dispositivo

resistenza (in ohm)  
del dispositivo

da cui  $I = GV$

e sostituendo questo valore nella espressione universale si ha:

$$P = V \cdot GV$$

cioè

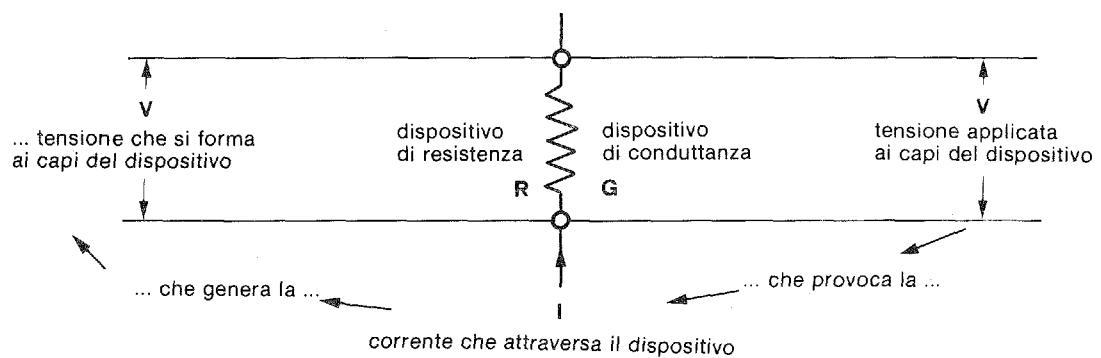
$$P = G V^2$$

potenza elettrica  
(in watt)  
sviluppata o  
utilizzata dal  
dispositivo

tensione (in volt)  
applicata al  
dispositivo

conduttanza (in siemens)  
del dispositivo

Data la perfetta dualità e reciprocità delle espressioni compendiamo le grandezze col seguente disegno



### RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI FATTORI DELLA POTENZA ALTERNATA

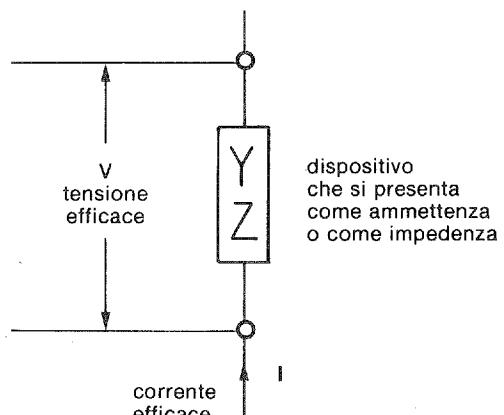
Dal concetto istantaneo della potenza dobbiamo determinare i valori medi in funzione della tensione e della corrente. Qui richiamiamo alcuni concetti già noti.

#### Esposizione generale del problema

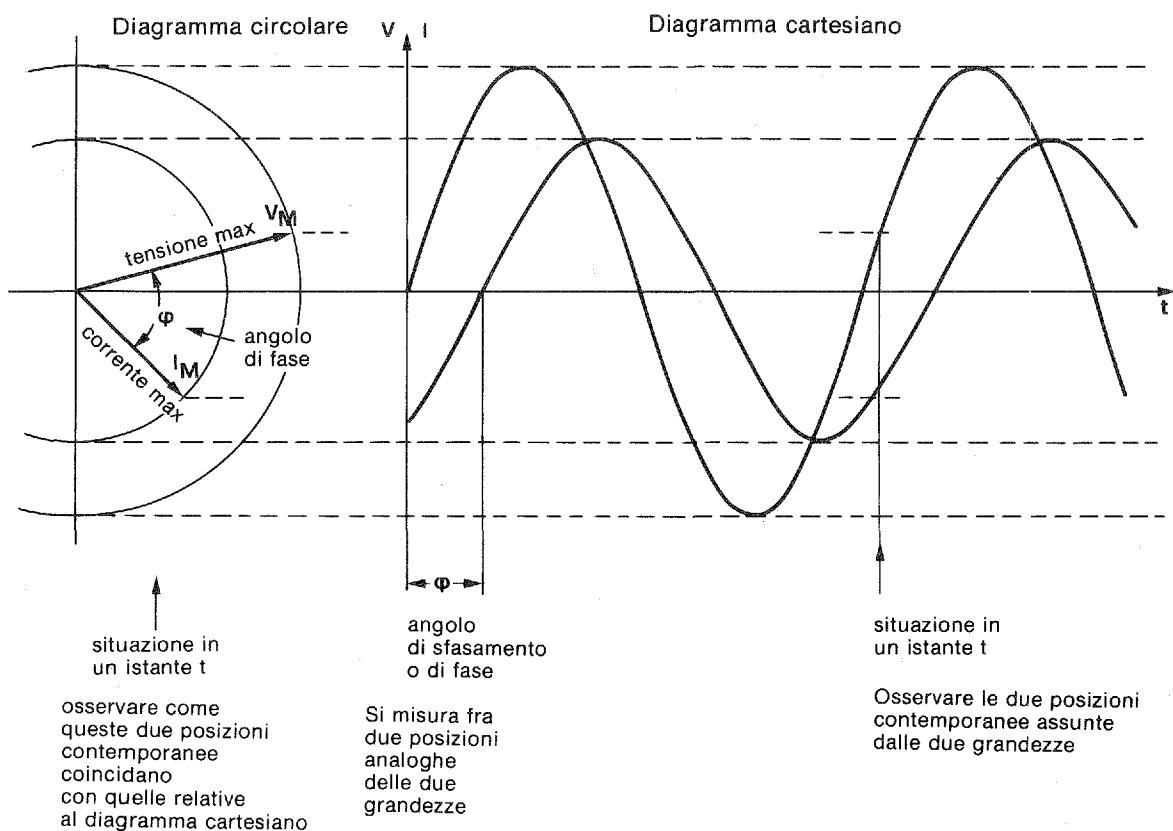
Come abbiamo visto nei paragrafi 13.5 e 13.6 e nelle pagine 11.52-1 e 11.62-1. si verificano i seguenti fenomeni reciproci

Un qualsiasi dispositivo sottoposto

- a **corrente alternata** generalmente presenta ai suoi capi una tensione pure alternata, della stessa frequenza, ma di fase diversa.
- b) a **tensione alternata** generalmente è attraversato da una corrente pure alternata, della stessa frequenza, ma di fase diversa



#### Rappresentazione grafica delle due grandezze in funzione del tempo



#### Memento

Per disegnare questi diagrammi è indispensabile partire dai valori massimi.

Ricordiamo le relazioni che legano i valori massimi ai valori efficaci.

$$\text{corrente max } I_M = \sqrt{2} I$$

$$\text{tensione max } V_M = \sqrt{2} V$$

## RAPPRESENTAZIONE TRIGONOMETRICA DELLA POTENZA ALTERNATA

Dimostreremo che la potenza in corrente alternata è una grandezza pure alternata di frequenza doppia di quella dei suoi fattori e che si può scomporre in un valore medio costante più due componenti alternata (cioè di valore medio = 0) fra di loro sfasate di  $\pi/2$  rad. ( $90^\circ$ ).

### Premesse

Anche in corrente alternata, ovviamente, la potenza non può non essere valutata secondo l'espressione universale della potenza elettrica, che fino ad ora conoscevamo valida solo per la corrente continua (14.33-1) e cioè

$$p = v \cdot i$$

potenza elettrica (in watt)  
sviluppata o utilizzata  
in ogni istante  
dal dispositivo

(le lettere minuscole indicano trattarsi  
di valori istantanei di grandezze  
continuamente variabili con  
andamento sinusoidale)

valore istantaneo della corrente  
(in amp.) variabile qualsiasi

valore istantaneo della tensione  
(in volt) variabile qualsiasi  
(tensione e corrente sono  
i fattori della potenza)

### Soluzione per grandezze alternate sinusoidali

Poiché (11.51-1)(11.61-1) dovremo riferirci razionalmente ai valori efficaci dei fattori della potenza, dovremo far comparire questi valori nell'espressione universale della potenza

$$p = v \cdot i$$

potenza elettrica (in watt)  
sviluppata o utilizzata in ogni  
istante dal dispositivo

istante considerato (in sec)  
pulsazione  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec)

valore efficace della tensione  
(in volt) (11.51-1)

$v = \sqrt{2} V \sin \omega t$

valore max  $V_m$  (in volt) della tensione  
angolo istantaneo (radiani)  
compiuto nell'istante considerato

valore efficace della corrente  
(in amp.) (11.61-1)

pulsazione  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec)  
istante considerato (in sec)

angolo di fase (rad.) della  
corrente rispetto a tensione  
(13.74-2) (13.84-2)

$i = \sqrt{2} I \sin (\omega t + \varphi)$

angolo istantaneo (radiani)  
compiuto nell'istante considerato

valore max  $I_m$  (in amp.) della corrente

sostituendo questi valori nell'espressione della potenza elettrica si ha:

$$p = [\sqrt{2} V \sin \omega t] [\sqrt{2} I \sin (\omega t + \varphi)]$$

e mettendo in ordine

$$p = 2 VI \sin \omega t \sin (\omega t + \varphi)$$

### Risultati e conclusioni

Sviluppando quest'ultima espressione alla luce della trigonometria, di cui risparmiamo i passaggi al lettore, si arriva alla seguente scomposizione di termini

$$P = VI \cos \varphi - VI \cos \varphi \cos 2\omega t + VI \sin \varphi \sin 2\omega t$$

Potenza elettrica (in watt)  
sviluppata o utilizzata in  
ogni istante dal dispositivo

Questo termine è il valore medio  
costante della potenza ed è  
composto dai seguenti fattori:

$V$  = valore efficace (in volt) della tensione  
 $I$  = valore efficace (in amp) della corrente  
 $\cos \varphi$  = .....

potenza  
attiva media

ampiezza  
della  
componente  
attiva

componente  
sinoidale  
di frequenza  
doppia

ampiezza  
della  
componente  
reattiva

componente  
sinoidale  
di frequenza  
doppia

alternanze della  
potenza attiva  
di pulsazione  $2\omega$

alternanze della  
potenza reattiva  
di pulsazione  $2\omega$

le potenze attiva e reattiva sono  
sfasate di  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) fra loro, vedi infatti:  
 $\cos 2\omega t$  e  $\sin 2\omega t$

$\cos \varphi$  = fattore di potenza dipendente dall'angolo di fase fra  $V$  ed  $I$   
(13.74-2) (13.84-2)

Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 14 Energia e potenza  
 Paragrafo : 14.3 Potenza  
 Argomento : 14.34 In corrente alternata

### RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLA POTENZA ALTERNATA

Si esprime graficamente tutto quanto si è visto nella pag. precedente

#### Rappresentazione grafica dei fattori e del prodotto

Diagramma circolare

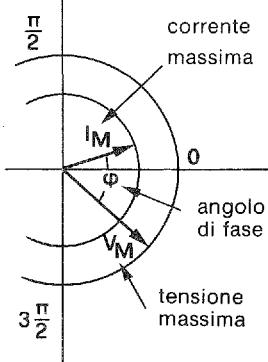
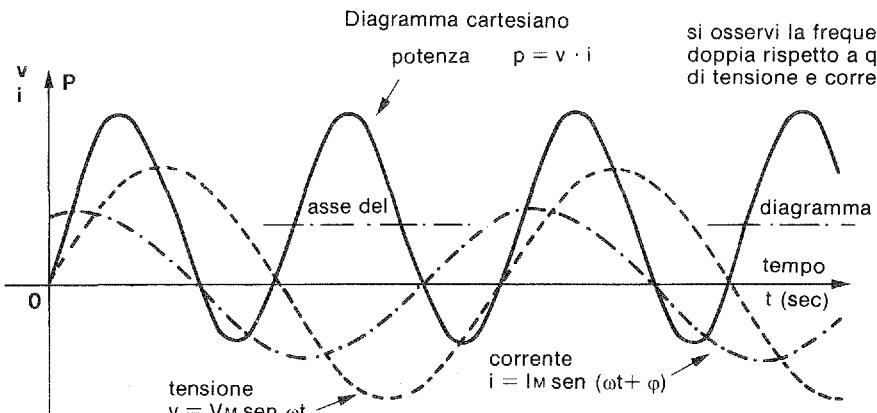


Diagramma cartesiano  
potenza  $p = v \cdot i$



si osservi la frequenza doppia rispetto a quella di tensione e corrente

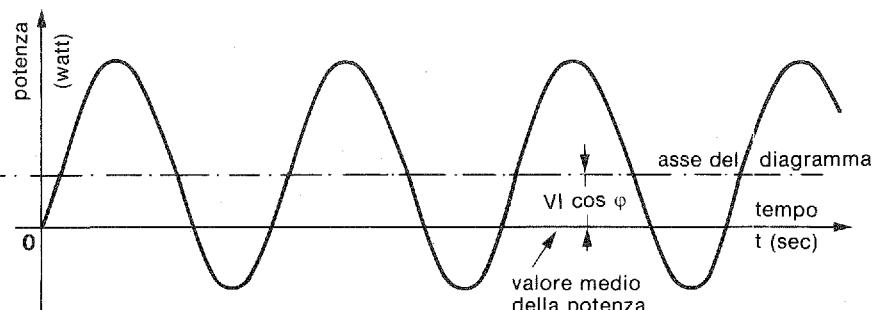
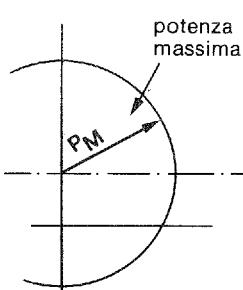
Il diagramma della potenza si ottiene facendo il prodotto istante per istante dei corrispondenti valori di tensione e di corrente. Nel presente diagramma  $\phi = \pi/3$  rad. ( $60^\circ$ )

Casi limite:  $\phi = 0$  (tensione e corrente in fase)  $\cos \phi = 1$

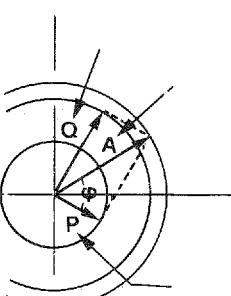
Il diagramma è interamente al disopra delle ascisse  
 $y = \pi/2$  rad ( $90^\circ$ ) (tens. e corr. in quadratura)  $\cos \phi = 0$   
L'asse del diagramma coincide con le ascisse

#### Rappresentazione grafica della potenza

Isoliamo il diagramma della potenza per mettere in evidenza alcune considerazioni.

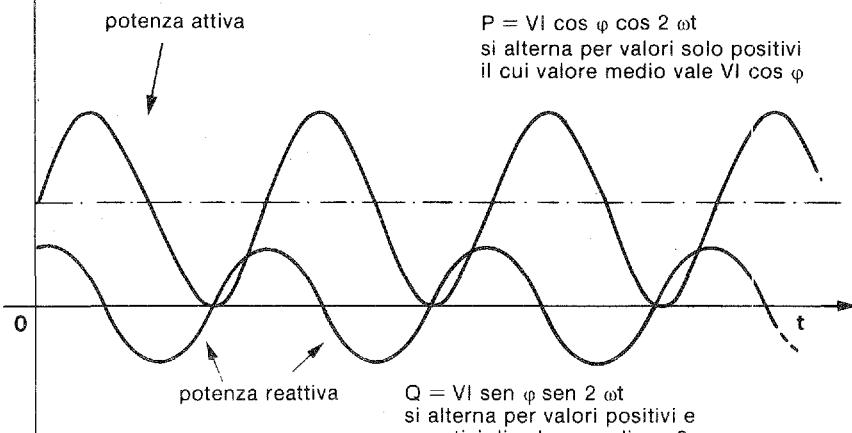


#### Rappresentazione grafica e scomposizione della potenza



È evidente che per  $\cos \phi = 1$  (sfasamento fra tensione e corrente  $\phi = 0$ ) la potenza reattiva scompare, mentre rimane tutta la potenza attiva con valore medio  $P = VI$

Le alternanze della potenza rispetto all'asse del diagramma possono essere scomposte nelle due seguenti:



$P = VI \cos \phi \cos 2\omega t$   
si alterna per valori solo positivi  
il cui valore medio vale  $VI \cos \phi$

potenza reattiva

$Q = VI \sin \phi \sin 2\omega t$   
si alterna per valori positivi e negativi di valore medio = 0  
significa che la potenza reattiva viene continuamente scambiata con il generatore

## RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE DELLA POTENZA ALTERNATA E DEI SUOI FATTORI

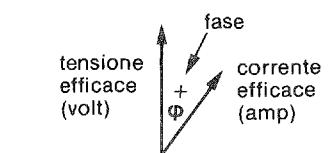
Si esamina l'intera casistica della scomposizione vettoriale della potenza

### Relazioni generali

$$\begin{array}{l} \text{Potenza attiva (watt)} \\ \text{generale o sfruttata} \\ \text{potenza reattiva (VAR)} \\ \text{di scambio fra generatore} \\ \text{e utilizzatore} \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} \text{valore efficace della tensione (volt)} \\ \text{valore efficace della corrente (amp.)} \\ P = V I \cos \varphi \\ Q = V I \sin \varphi \\ \Rightarrow \text{angolo di fase (in rad. o gradi) fra tensione e corrente} \end{array}$$

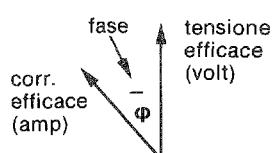
### Casi particolari e loro rappresentazione vettoriale

#### Fra tensione e corrente



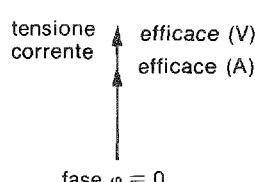
La corrente è in ritardo di un angolo  $\varphi$  rispetto alla tensione

Si dice anche che la tensione è in anticipo rispetto alla corrente



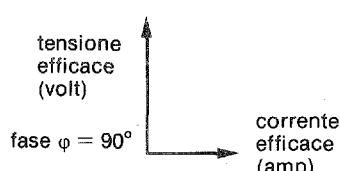
La corrente è in anticipo di un angolo  $\varphi$  rispetto alla tensione

Si dice anche che la tensione è in ritardo rispetto alla corrente



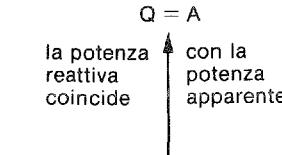
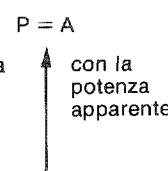
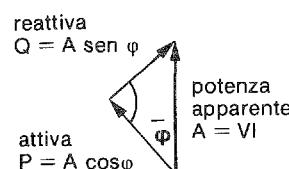
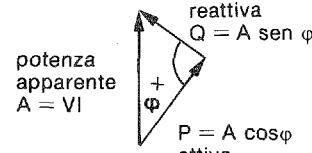
La corrente è in fase con la tensione

Tutta la potenza disponibile generata è sfruttata dallo utilizzatore



La corrente è in quadratura con la tensione (in anticipo o in ritardo)  
Tutta la potenza disponibile è scambiata reciprocamente al ritmo della pulsazione  $2\omega$  fra generatore e utilizzatore

#### Fra le componenti della potenza

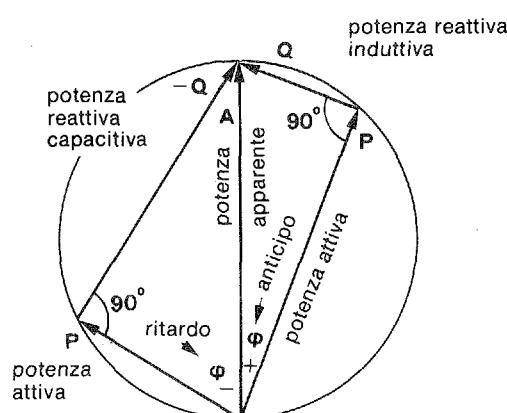


### Riassunto

L'analisi vettoriale è un sistema comodo per rappresentare anche le componenti della potenza.

Per la proprietà degli angoli iscritti nella semicirconferenza (che si mantengono sempre retti dovunque si trovi il vertice), si può disegnare il diagramma generale qui a lato.

La costanza dell'angolo retto garantisce la posizione in quadratura fra potenza attiva e reattiva, mentre il diametro del cerchio corrisponde sempre alla potenza apparente disponibile.



Sezione : 1 Grandezze fondamentali  
 Capitolo : 14 Energia e potenza  
 Paragrafo : 14.4 Potenza  
 Argomento : 14.34 In corrente alternata

### RAPPRESENTAZIONE DELLA POTENZA ALTERNATA CON I PARAMETRI DEL CIRCUITO

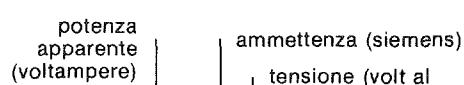
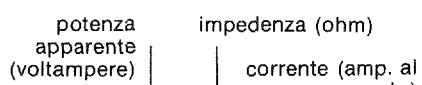
I parametri del circuito sono: resistenza, reattanza, impedenza.

In questa pagina si esprimono i vari tipi di potenza in funzione di essi.

#### Premessa

Applicando le relazioni esposte nei paragrafi 13.5 e 13.6, particolarmente alle pagine 13.55-2 e 13.65-2 possiamo senz'altro esporre qui di seguito le espressioni delle potenze in funzione dei parametri del circuito e dei relativi reciproci.

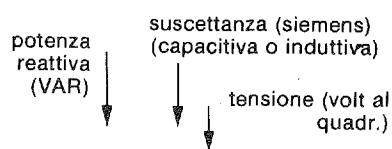
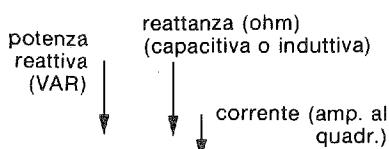
#### Potenza apparente



$$A = ZI^2$$

$$A = YV^2$$

#### Potenza reattiva



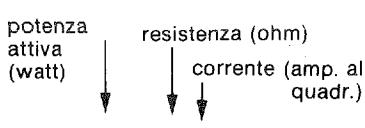
$$Q = XI^2$$

$$Q = BV^2$$

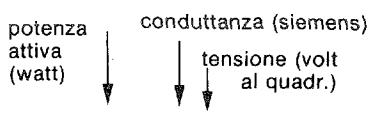
$$\begin{aligned} \text{sen } \varphi &= \frac{Q}{A} = \frac{X}{Z} \\ &\quad \text{potenza apparente (voltampere)} \\ &\quad \text{reattanza (ohm) capacitiva (antic.) o induttiva (ritardo)} \\ &\quad \text{impedenza (ohm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{sen } \varphi &= \frac{Q}{A} = \frac{B}{Y} \\ &\quad \text{potenza apparente (voltampere)} \\ &\quad \text{suscettanza (S) capacitiva (ritardo) o induttiva (anticipo)} \\ &\quad \text{ammettanza (S)} \end{aligned}$$

#### Potenza attiva



$$P = RI^2$$



$$P = GV^2$$

$$\begin{aligned} \text{cos } \varphi &= \frac{P}{A} = \frac{R}{Z} \\ &\quad \text{potenza apparente (voltampere)} \\ &\quad \text{resistenza (ohm)} \\ &\quad \text{impedenza (ohm)} \\ &\quad \text{se reattanza capac.: anticipo indutt.: ritardo} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{cos } \varphi &= \frac{P}{A} = \frac{G}{Y} \\ &\quad \text{potenza apparente (voltampere)} \\ &\quad \text{conduttanza (S)} \\ &\quad \text{ammettanza (S)} \\ &\quad \text{se suscettanza capac.: ritardo indutt.: anticipo} \end{aligned}$$

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.3	Potenza
Argomento : 14.34	In corrente alternata

## CONCETTO DI VALORE EFFICACE DI TENSIONE

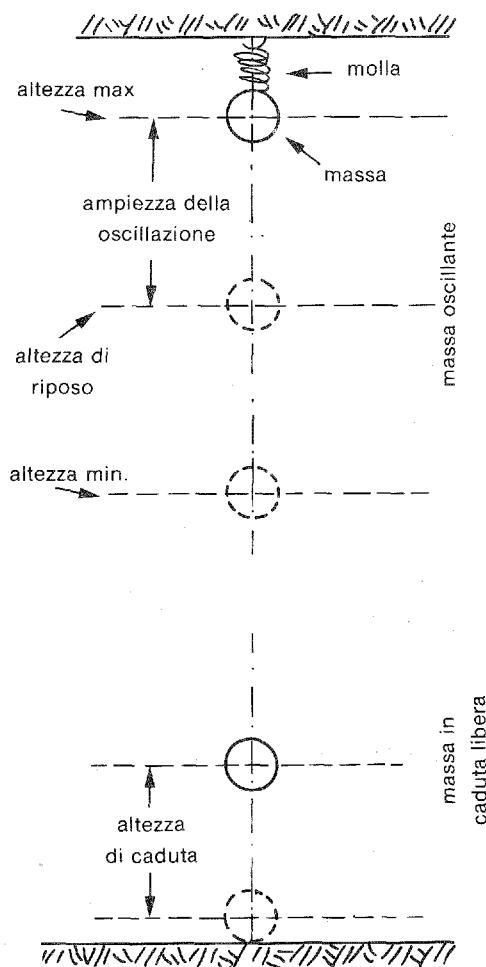
Riprendiamo i concetti già espressi in 11.51-2 e 11.61-2 rispettivamente per le tensioni e le correnti alternate.

Che un moto alternativo sia in grado di produrre lavoro ormai spero che non venga più messo in dubbio almeno da coloro che abbiamo seguito attentamente la trattazione fino a questo punto.

Per arrivare al concetto di valore efficace bisogna trovare una analogia fra ampiezza di oscillazione di una massa e altezza di caduta della stessa per compiere il medesimo lavoro o per sviluppare la medesima potenza nel medesimo intervallo di tempo.

Prendiamo l'esempio illustrato a lato, dove una massa contrattata da una molla è messa in oscillazione verticalmente.

Essa oscillerebbe per sempre se l'energia oscillante alla fine non venisse assorbita da attriti di varia natura, oppure l'energia potrebbe essere trasformata in lavoro utile, ad es. facendo azionare una pompa alternativa.



Ora immaginiamo di lasciar cadere senza contrasti la stessa massa e di farla compiere con la sola caduta la medesima quantità di lavoro dell'esempio precedente.

Ci si porrebbe questa domanda:

"Da che altezza devo far cadere la massa per farle compiere il medesimo lavoro della massa oscillante e che rapporto c'è fra l'ampiezza di quella oscillazione e l'altezza di questa caduta".

Ebbene, fatti i calcoli, ci si accorge che l'altezza di caduta e l'ampiezza della oscillazione stanno fra loro secondo un rapporto fisso e pertanto l'altezza di caduta immaginaria corrispondente alla ampiezza di oscillazione che produce il medesimo lavoro si chiama *valore efficace* di quella oscillazione.

Nell'elettrotecnica se si assimilano le altezze alle tensioni, la relazione che le lega è la seguente:

$$\text{tensione efficace costante} \rightarrow V = kA \leftarrow \text{ampiezza della oscillazione}$$

(in volt) (in volt)

costante di proporzionalità

$$\text{che vale } \frac{1}{\sqrt{2}} = (0,707) \text{ per la tensione alternata sinusoidale}$$

Lo stesso rapporto vale anche per le correnti (confronto fra corrente continua e corrente alternata v. anche 11.61-2).

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.4	Potenza
Argomento	:	14.40	Indice delle pagine

## Paragrafo 14.4 TRASFORMAZIONE E TRASMISSIONE DELL'ENERGIA

### Indice degli argomenti e delle pagine

#### arg. 14.41 - Informazioni preliminari

- pag. 1 — Vari modi di trasmissione dell'energia in generale
  - dell'energia motrice o di segnali
  - dell'energia meccanica
  - dell'energia elettrica
  - Trasmissione elettromagnetica dei segnali
- ” 2 — Non si può creare l'energia: la si può soltanto trasformare
- ” 3 — Potenza dei generatori naturali e artificiali
- ” 4 — Forme di energia e Trasformazioni
  - Apparecchiature che compiono la trasformazione

#### arg. 14.42 - Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche

- pag. 1 — Scambi alternati di energia cinetica e potenziale
  - Oscillazioni
  - Conservazione dell'energia oscillante
  - Il pendolo
- ” 2 — Trasmissione dell'energia oscillante. Radiazioni
  - Trasmissione meccanica delle oscillazioni pendolari
  - Trasmissione elasto-cinetica delle vibrazioni
  - Trasmissione elettro-magnetica delle radiazioni
  - Energia dispersa
  - Velocità di trasmissione
- ” 3 — Irradiazione sferica dell'energia
  - Generalità
  - Come diminuisce la potenza specifica con la distanza dell'emittente
  - Esempio: quanta potenza irradiata dal Sole arriva sulla Terra
- ” 4 — Meccanismo della propagazione dell'energia elettromagnetica
  - Premessa
  - Mezzo di trasmissione
  - Il "meccanismo" vero e proprio
- ” 5 — Esame della propagazione dell'antenna trasmittente all'antenna ricevente
- ” 6 — Entità di potenza ricevuta da una antenna ricevente
  - Impedenza caratteristica dello spazio vuoto
- ” 7 — Velocità di trasmissione o di propagazione nei materiali
  - Velocità di propagazione in rapporto ad altre grandezze
  - Lunghezza d'onda
- pag. 8 — Classificazione e principali caratteristiche dell'energia elettromagnetica
- ” 9 — Direzione di propagazione e mezzi attraversabili
- ” 10 — Suddivisione delle onde di propagazione a seconda del loro comportamento nell'atmosfera

segue

**APPUNTI DI  
ELETTRONICA**

<b>Codice</b>	<b>Pagina</b>	<b>Sezione</b> : 1      Grandezze fondamentali
14.40	2	<b>Capitolo</b> : 14      Energia e potenza
		<b>Paragrafo</b> : 14.4      Potenza
		<b>Argomento</b> : 14.40      Indice delle pagine

**arg. 14.43 - Energia acustica**

- pag. 1 — Irradiazione dell'energia acustica
  - Generalità
  - Limiti umani di percezione
  - Esempi
- " 3 — Velocità di propagazione dell'energia acustica Frequenze, Note musicali,  
Limiti di udibilità.

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	: 14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
<b>Argomento</b>	: 14.41	Informazioni preliminari

## VARI MODI DI TRASMISSIONE DELL'ENERGIA IN GENERALE

### Trasmissione dell'energia motrice o di segnali

La trasmissione attraverso l'etere di grosse quantità di energia allo scopo di alimentare motori o servomeccanismi è oggi ottenibile a mezzo delle apprecciatore **Laser**, ma il loro sfruttamento industriale è ancora di là da venire.

Per ora è abbastanza facile comandare a distanza un motore qualsiasi, il quale però prende energia da un'alimentazione locale: un bacino idroelettrico, un serbatoio di combustibile, dell'energia elettrica trasmessa a mezzo di cavi, ecc.

Per trasmettere bene l'energia a distanza bisogna ridurre al minimo le dispersioni. Attraverso lo spazio le dispersioni sono notevoli data la tendenza delle radiazioni di diffondersi in tutte le direzioni.

Per il momento, perciò, lo spazio elettromagnetico è destinato soltanto alla trasmissione di segnali i quali, comunque indeboliti dalle dispersioni, possono venire captati ad amplificati, purchè sufficientemente percettibili.

Le potenze in gioco per la trasmissione di segnali per notevoli che siano, sono sempre di modesta entità rispetto a quelle che servono per l'energia motrice.

Questa può essere trasmessa meccanicamente, termodinamicamente o elettricamente. L'energia elettrica è quella che si lascia trasmettere a grandi distanze con modeste perdite nelle linee.

### Trasmissione meccanica dell'energia

Avviene mediante il collegamento diretto di organi in movimento a mezzo di cinghie, ingranaggi, catene, ecc.

Una volta era molto diffuso, dato l'alto costo dei motori.

Oggi si preferisce installare un motore in ogni punto dove serve, data la facilità di ottenere motori per ogni valore di potenza ed a costi ragionevoli.

La trasmissione meccanica è ancora conveniente per distanze di pochi decimetri per alimentare organi accessori di macchine e motori o dove sia necessaria la perfetta sincronizzazione di movimenti a mezzo di ingranaggi o catene.

### Trasmissione termodinamica dell'energia

Avviene mediante distribuzione di pressione di gas, di vapori o liquidi in temperatura.

La distribuzione avviene in tubazioni e l'energia è sempre presente all'utilizzazione sotto forma potenziale, mediante la pressione o la temperatura del fluido veicolare dell'energia stessa.

Le distanze che si possono coprire in questo modo possono essere notevoli mediante opportuni accorgimenti intermedi per il mantenimento delle pressioni di spinta del fluido.

Si pensi alle reti di distribuzione urbane di gas, acqua, vapore, ecc.

Reti di distribuzione di vapore d'acqua, di aria compressa ecc., sono molto comuni negli stabilimenti industriali.

### Trasmissione elettrica dell'energia

È per ora il sistema più diffuso.

Può coprire distanze di svariate centinaia di chilometri senza particolari accorgimenti per compensare le cadute di tensioni, di sfasamenti, ecc.

La distribuzione avviene mediante conduttori isolati sotterranei o nudi e sospesi mediante opportuni sostegni che variano di foggia e di struttura a seconda dei casi.

### Trasmissione elettromagnetica dei segnali

Si tratta in generale di trasmissione di energia di piccola potenza che, irradiandosi su un fronte sferico, perde di potenza specifica man mano che si allontana dall'emittitore.

Questa energia serve per modulare fonti di energia locale (apparecchi riceventi) in modo che essi riproducano fedelmente le modulazioni della energia trasmessa e le forniscano la potenza necessaria per alimentare conseguentemente i servomeccanismi che possono essere: l'altoparlante della radio, lo schermo televisivo, i comandi della telescrivente ed altre apprecciatore industriali e commerciali.

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
Argomento	:	14.41	Informazioni preliminari

## NON SI PUO' CREARE ENERGIA: LA SI PUO' SOLTANTO TRASFORMARE

Si illustrano i seguenti fatti:

**l'energia esiste soltanto in natura,**

**noi poveri mortali non possiamo creare niente,**

**noi possiamo soltanto trasformare ciò che la natura ci dà.**

**L'energia non si produce**

Dobbiamo una volta per tutte sfatare l'illusione istintiva che l'energia si possa veramente «creare».

L'energia non si crea. Nessuno ha mai creato l'energia. Nessuno la potrà mai creare.

Essa esiste in natura sotto molteplici forme che, come abbiamo visto, sono state inquadrata in due grandi categorie trasformabili l'una nell'altra:

### **l'energia cinetica e l'energia potenziale**

È bene chiarire ancora una volta per tutte che l'eufemismo di «produrre» energia, come troviamo nel gergo corrente, deve soltanto significare una trasformazione di energia da una forma scomoda o inutilizzabile in una forma più comoda o sfruttabile per compiere un lavoro. Anche la materia è energia.

## **MOTORI**

La stessa benzina, che proviene da sofisticati procedimenti di raffinazione del petrolio, rappresenta energia potenziale, ma non servirebbe ad altro che a scaldarci, se non avessimo trovato il modo di trasformarla tramite il motore, nel lavoro di traslazione della nostra automobile o di azionamento di altre macchine trasformatrici od operatrici.

Queste apparecchiature che trasformano l'energia in lavoro effettivo si chiamano motori.

Quindi, ripetiamo, i motori non sono che trasformatori di energia in lavoro effettivo e possono assumere vari nomi come:

— mulini a vento, ad acqua  
— turbine ad acqua, a vapore, a gas

— reattori di spinta (jet)  
— motori elettrici, a scoppio, a combustione

## **GENERATORI**

Queste macchine trasformano l'energia di un tipo in energia di un altro tipo senza produrre lavoro esse stesse.

A seconda del tipo di trasformazione che essi operano, le macchine o i generatori prendono nomi diversi come segue.

**Reattori** quando producono trasformazioni di: sostanze chimiche in altre; energia chimica o nucleare in energia termodinamica, elettrica, ecc.

**Caldane** quando trasformano energia chimica in energia termica o termodinamica mediante combustione di sostanze.

**Batterie** quando trasformano energia chimica in energia elettrica e viceversa.

**Alternatori** quando trasformano energia meccanica fornita dai motori in energia elettrica di tipo alternato.

**Dinamo** quando trasformano energia meccanica fornita dai motori in energia elettrica di tipo continuo.

**Trasformatori** quando trasformano energia elettrica alternata in energia elettrica alternata di diverse caratteristiche.

**Convertitori** quando trasformano energia elettrica in altro tipo di energia elettrica.

**Trasmettitori** quando trasformano energia elettrica in altro tipo di energia elettrica che sia intelligibile (segnali, informazioni).

**Radiatori** quando trasformano energia termica di conduzione e convezione in energia termica radiente di tipo elettromagnetico.

**Antenne** quando trasformano energia elettrica in energia elettromagnetica radiante.

**Lampadine** quando trasformano energia elettrica in energia luminosa di tipo elettromagnetico.

**Altoparlanti** quando trasformano energia elettrica in energia acustica.

**Ecc.**

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	: 14.4	Trasformazione e Trasmissione dell'Energia
<b>Argomento</b>	: 14.41	Informazioni preliminari

## POTENZA DEI GENERATORI NATURALI E ARTIFICIALI

Per farci una idea delle dimensioni delle varie fonti di energia vale la pena di consultare la presente tabella.

### Mezzi di trasmissione

L'uomo generalmente usa lo spazio cosmico per trasmettere segnali.

Raramente per ora egli sfrutta lo spazio cosmico per trasmettere l'energia necessaria per compiere lavoro (14.41-1).

Per trasmettere questa energia che diremo motrice l'uomo si serve di canali, tubazioni, conduttori elettrici, a seconda della natura dell'energia stessa.

Solo la natura, principalmente con il sole, al quale oggi dobbiamo tutto ciò che esiste sulla terra perché possa esistere la nostra vita fin dalle sue origini, si serve dello spazio cosmico per trasmettere energia motrice.

L'uomo si serve dello spazio per trasmettere energia solo per riscaldamento ed illuminazione del proprio ambiente oltre che per trasmettere segnali a notevoli distanze.

### Potenza esercitata in modo continuo da varie fonti di energia

Fonte di energia	Potenza generata watt	Mezzo di trasmissione	Destinazione dell'energia
Il Sole	$3.86 \cdot 10^{26}$	spazio cosmico	vitale
Una centrale elettrica	$2.50 \cdot 10^8$	elettrodotti	motrice
Una condotta idroelettrica	$5.00 \cdot 10^7$	tubazione	motrice
Un generatore di vapore	$4.00 \cdot 10^7$	tubazioni	motrice
Un fiume	$3.00 \cdot 10^7$	canale	motrice
Una stazione radio trasmittente	$5.00 \cdot 10^5$	spazio cosmico	informazione
Una stufa	$1.00 \cdot 10^4$	spazio cosmico	riscaldamento
Un faro marittimo	$5.00 \cdot 10^3$	spazio cosmico	informazione
Una lampada stradale	$1.00 \cdot 10^3$	spazio cosmico	illuminazione

### Confronti

Il confronto più stridente è quello fra il sole e una centrale elettrica.

L'energia irradiata dal Sole è pari a quella prodotta da  $10^{18}$  (un miliardo di miliardi) centrali elettriche.

Rispetto a quella che arriva sulla terra (v. 14.42-3) essa corrisponde a quella prodotta da  $10^{11}$  (cento miliardi) centrali elettriche.

Il lettore probabilmente non si rende conto della enormità di simili grandezze.

Ne parleremo qualche volta altrove.

I rapporti fra le altre grandezze sono dell'ordine da  $10$  a  $10^5$  che sono più intuibili perché siamo più abituati a trattare con simili dimensioni.

**APPUNTI DI  
ELETTRONICA**

Codice  
14.41

Pagina  
4

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
Argomento : 14.41	Informazioni preliminari

## FORME DI ENERGIA E TRASFORMAZIONI

È interessante constatare in quanti modi l'energia può trasformarsi.

L'intera casistica è stata riassunta e si nota come, nei casi pratici, non sempre si passa direttamente da una forma all'altra.

Energia trasformata	Forma iniziale dell'energia					
	Termica	Mecchanica	Chimica	Nucleare	Elettrica e Magnetica	Radiante
<b>Termica</b>	Riscaldamento degli ambienti e dei fluidi in generale.  Scambiatori di calore.	Fenomeni di attrito.  Organi in movimento.  Freni.	Il calore prodotto dalle reazioni chimiche  Combustione ecc.	Il calore prodotto dalle reazioni nucleari  Fissione ecc.	Riscaldamento di conduttori attraversati da corrente elettrica.	Effetto serra  Assorbimento di radiazioni che si trasformano in calore
<b>Meccanica</b>	Azionamento turbine a gas, stantuffi Motori a vapore a scoppio, a combustione ecc.	Funzionamento di meccanismi Sfruttamento salti d'acqua nelle turbine, pompe ecc.	Mediazione del calore, elettricità ecc. prodotti da reazioni chimiche.  Battito del cuore	Mediazione del calore prodotto dalle reazioni nucleari.	Il funzionamento dei motori elettrici	La pressione delle radiazioni  Vento Solare.
<b>Chimica</b>	Reazioni chimiche endotermiche.	Reazioni chimiche che assorbono energia di compressione agitazione ecc.	Trasformazioni chimiche  Processi vitali.	Trasformazioni chimiche che derivano da processi nucleari.	Elettrolisi  Batterie sotto carica  Elettrochimica	Impressione fotochimica delle emulsioni fotografiche
<b>Nucleare</b>	Il calore ad altissima temperatura innesca reazioni nucleari  Enormi pressioni gravitazionali nel nucleo degli astri?	Trasformazione per ora sconosciuta  Enormi pressioni gravitazionali nel nucleo degli astri?	Trasformazione per ora sconosciuta	Reazioni a catena Radioattività indotta	Accelerazione di particelle (ciclosincrotron ecc.)	Le radiazioni ad altissima frequenza creano trasformazioni nucleari se posseggono sufficiente energia
<b>Elettrica e Magnetica</b>	Effetto termoelettrico ionizzazione	Funzionamento delle dinamo e dei generatori elettrici	Fenomeni bioelettrici  Batterie sotto scarica  Pile voltaiche	Le reazioni nucleari producono sempre fenomeni elettromagnetici	Funzionamento dei trasformatori elettrici	Funzionamento delle batterie solari  Effetto fotoelettrico
<b>Radiante</b>	L'energia termica si trasmette nello spazio sotto forma di radiazione	Le vibrazioni si trasmettono nella materia sottoforma di radiazioni (suono, ultrasuoni ecc.)	Lo stesso calore o la luce prodotti da una reazione chimica sono forme di radiazione	I fenomeni elettromagnetici prodotti dalle reazioni nucleari si trasmettono come radiazioni.	Le oscillazioni elettromagnetiche si trasmettono come radiazioni (onde radio, luce, calore ecc.)	Un corpo colpito da radiazione può a sua volta irradiare energia.

## SCAMBI ALTERNATI DI ENERGIA CINETICA E POTENZIALE

Si analizzano le oscillazioni partendo da quelle del pendolo che sono le più intuitive

### Oscillazioni

La più affascinante forma di energia è quella oscillante o alternata che domina incontrastata la natura, di cui essa è parte integrante, fin dall'inizio dell'universo.

Soltanto recentemente essa è stata ben analizzata, studiata e sfruttata a fondo.

Pensate soltanto come le radiazioni solari, il calore di una stufa, la luce di una lampadina, i suoni ed i rumori, sono fenomeni di trasmissione di energia di tipo oscillante o alternato: sono oscillazioni, sono vibrazioni, sono radiazioni.

La stessa materia, che pare inerte, è il risultato di miliardi di vibrazioni molecolari singolarmente consistenti, ma che danno una risultante complessiva esterna mediamente nulla.

Solo per questo il foglio che state leggendo se ne sta fermo sul tavolo senza apparentemente vibrare: non così ogni molecola di esso, che vibra tanto più forte quanto più alta è la sua temperatura.

### Conservazione dell'energia oscillante

Cos'è l'energia oscillante?

E lo scambio alternato di energia dalla forma potenziale alla cinetica e viceversa.

Evidentemente essa si può conservare se si riesce ad evitare che queste oscillazioni si trasmettano allo spazio circostante.

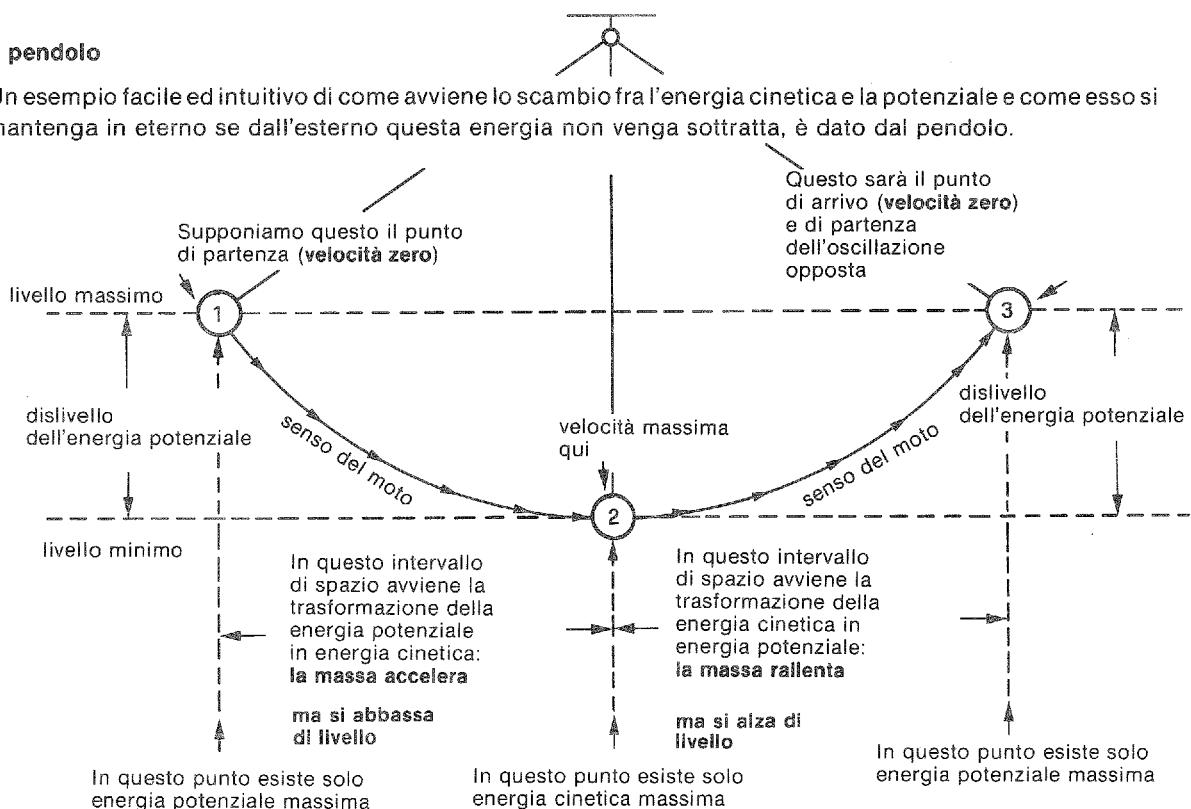
Mantenere, ad esempio, un liquido caldo in una bottiglia thermos, significa far mantenere le vibrazioni delle sue molecole.

Se queste si trasmettono allo spazio circostante il liquido si raffredda perché l'energia delle vibrazioni termiche si trasmette elettromagneticamente nello spazio, togliendola al liquido stesso.

Ma non è conservando questa energia che ci può essere utile: dobbiamo trasmetterla per trarre quei benefici che la natura ci mette a disposizione.

### Il pendolo

Un esempio facile ed intuitivo di come avviene lo scambio fra l'energia cinetica e la potenziale e come esso si mantenga in eterno se dall'esterno questa energia non venga sottratta, è dato dal pendolo.



Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
Argomento	:	14.42	Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche

## TRASMISSIONE DELL'ENERGIA OSCILLANTE. RADIAZIONI

Dall'esempio del pendolo si cerca di far intuire come le oscillazioni elettromagnetiche gli assomiglino.

### Trasmissione meccanica delle oscillazioni pendolari

Un pendolo può trasmettere energia ad un altro pendolo a spese della propria energia (ad es.: attraverso gli spostamenti d'aria).

Ciò può avvenire solo se i due pendoli possono oscillare alla medesima frequenza e alla fine entrambi oscilleranno in modo che l'energia di ciascuno sia la metà di quella che il primo possedeva.

Se le masse dei due pendoli, inoltre, sono uguali, anche le ampiezze delle due oscillazioni saranno uguali; diversamente le due energie, pur risultando uguali si estrinsecheranno in modo che a massa minore corrisponderà ampiezza maggiore e viceversa.

Infine, se i due pendoli non sono in grado di oscillare alla medesima frequenza, la trasmissione della energia avverrà in un modo fluttuante dall'uno all'altro e viceversa a seconda delle posizioni reciproche in cui essi si troveranno.

### Trasmissione elasto-cinetica delle vibrazioni

È quella che è visibile quando si percuote una corda tesa: l'energia potenziale non è più quella di posizione di una massa, ma è quella elastica di compressione e di trazione del materiale creato dalla massa della corda stessa.

Su questo fenomeno si basa la trasmissione delle vibrazioni acustiche nell'aria, nell'acqua e in tutti gli altri materiali in qualsiasi stato essi si trovino.

### Trasmissione elettro-magnetica delle radiazioni

Con i due precedenti esempi di trasmissione meccanica delle oscillazioni vogliamo mostrare che esiste una analogia anche con altri modi di trasmissione dell'energia e principalmente con quella elettromagnetica.

Una sorgente di trasmissione dell'energia possiede un «meccanismo» o comunque un dispositivo che fornisce energia al pendolo «trasmettitore» o circuito oscillante, man mano che questa lo perde per trasmetterla ai «pendolini» elementari elettromagnetici che formano il campo elettromagnetico dello spazio cosmico nel quale è compreso anche il nostro micromondo.

L'energia comunque si trasmette dal punto che si trova a potenziale maggiore verso quelli che si trovano a potenziale minore.

### Energia dispersa

È quell'energia, sempre di natura oscillatoria, che di trova al potenziale più basso possibile nello spazio e tale da non trovare altri punti situati a potenziale inferiore per poter ricevere quell'energia.

È il caso dell'energia termica quando raggiunge la temperatura dello spazio cosmico.

### Radiazioni e frequenze di oscillazione

Le radiazioni acquistano caratteristiche diverse a seconda della frequenza con la quale esse sono generate. Esse possono essere visibili come luce, o dare la sensazione di calore, o penetrare nei corpi.

Nella tabella che segue le troviamo classificate e vale la pena fermarsi a meditare un pochino. (14-42-8).

### Velocità di trasmissione

La velocità di trasmissione delle radiazioni elettromagnetiche nello spazio, la cosiddetta **velocità della luce**, è praticamente di:

300.000 km/sec e cioè, in unità fondamentali:  $3 \cdot 10^8$  m/sec

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.4	Trasformazione e Trasmissione dell'Energia
Argomento : 14.42	Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche

## IRRADIAZIONE SFERICA DELL'ENERGIA

Dimostreremo che la potenza specifica diminuisce col quadrato della distanza dal punto emittente la radiazione.

### Generalità

L'energia si irradia allontanandosi uniformemente dal punto emittente in tutte le direzioni e forma perciò un fronte sferico che in tutta la sua superficie contiene sempre la potenza originaria emessa dal generatore. Allontanandosi dall'emittente, la superficie sferica del suo fronte aumenta, mentre, come abbiamo detto, la potenza totale resta costante, (se non ci sono dispersioni).

In questo caso, la potenza specifica, cioè la potenza per metro quadrato di superficie di fronte, diminuisce man mano che il fronte si allontana dal centro emittente.

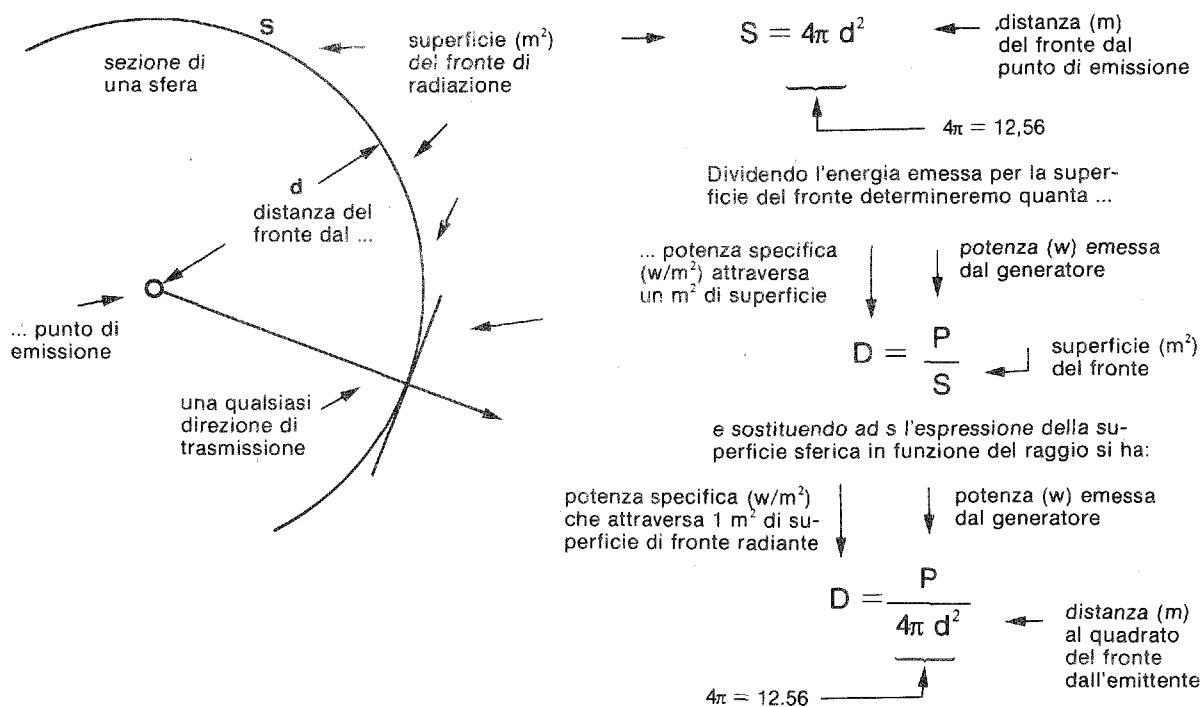
Vedremo ora come trovare una relazione che leggi la potenza specifica ( $w/m^2$ ) alla distanza (m) dal punto di emissione.

### Come diminuisce la potenza specifica con la distanza dall'emittente

Come abbiamo già detto, ogni watt di potenza, man mano che la sua radiazione si allontana, dal punto di emissione, si distribuisce su un fronte di superficie sempre più estesa.

La superficie è quella di una sfera di raggio pari alla distanza dal punto di emissione

(superficie sferica in funzione del raggio)



### Esempio: quanta potenza irradiata dal Sole arriva sulla Terra

potenza irradiata dal Sole (14.34-1)

$$\text{potenza specifica del fronte alla distanza della Terra} \rightarrow D = \frac{3,86 \cdot 10^{26}}{12,56 \cdot (1,5 \cdot 10^{11} \text{m})^2} = 1,37 \cdot 10^3 \text{ w/m}^2$$

distanza della Terra dal Sole

Ogni  $\text{m}^2$  di superficie terrestre esposto al Sole è perciò colpito da una potenza di  $1,37 \cdot 10^3 \text{ w}$ . L'intera superficie raccoglie ed in parte (per fortuna) riflette:

$$\text{Potenza totale che colpisce la terra} \rightarrow P_t = D \cdot 4\pi r^2 = 1,37 \text{ w/m}^2 \cdot 6,28 \cdot (6,37 \cdot 10^6 \text{ m})^2 = 3,48 \cdot 10^{17} \text{ w}$$

potenza specifica di arrivo sulla terra ↑ superfc. di terra esposta al sole

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
Argomento : 14.42	Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche

## MECCANISMO DELLA PROPAGAZIONE DELL'ENERGIA ELETTROMAGNETICA

### Premessa

Finora ci siamo occupati di constatare in quanti modi l'energia elettromagnetica venga trasmessa dai vari generatori naturali e artificiali e come essa venga recepita dal ricevitore più o meno opportunamente adattato al trasmettitore particolare.

Ora analizzeremo in che modo avviene la propagazione di questa energia.

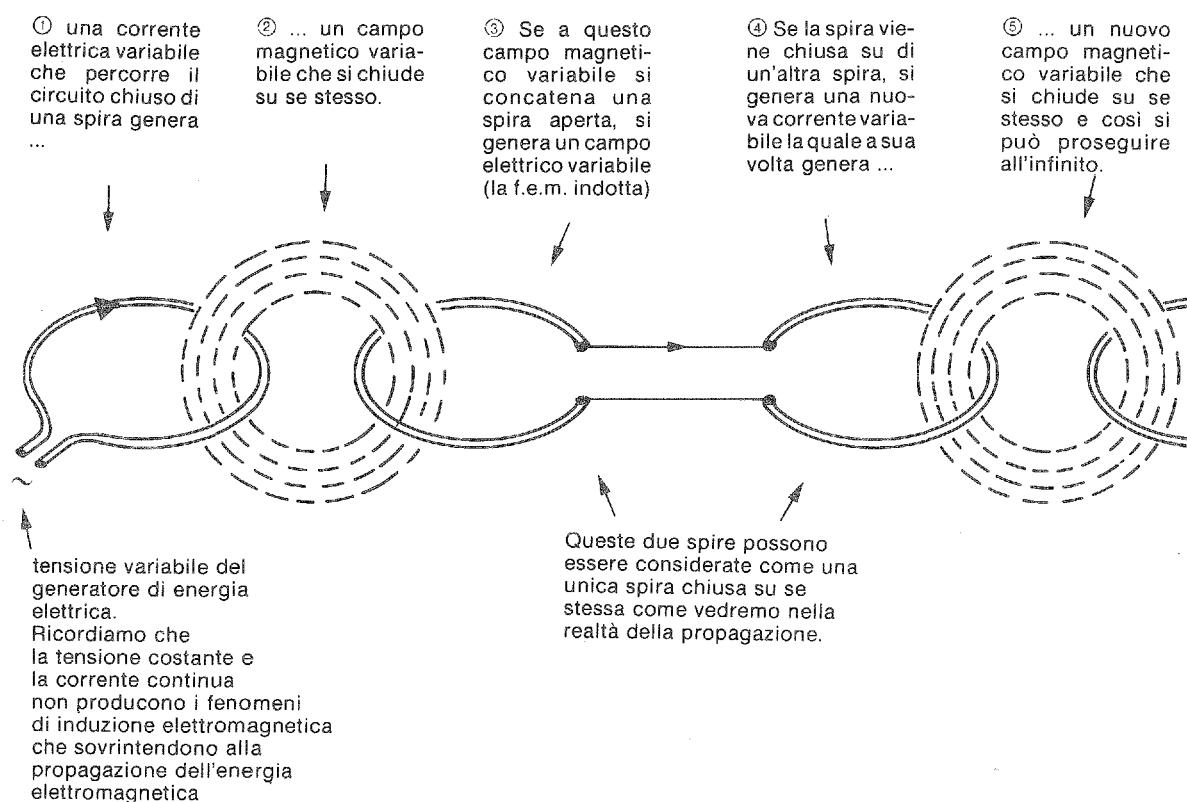
### Mezzo di trasmissione

Il mezzo di trasmissione dell'energia elettromagnetica è lo spazio nel quale si può esercitare il campo elettromagnetico.

La precisazione non è superflua, poiché si sono scoperte porzioni di spazio cosmico dove pare che il campo elettromagnetico non si possa esercitare (buchi neri).

### Il "meccanismo" vero e proprio

Nel cap. 12 riguardante i fenomeni elettromagnetici e particolarmente in 12.23-4 abbiamo osservato una certa concatenazione di cause ed effetti come segue



Sezione	: 1	Grandezze fondamentali
Capitolo	: 14	Energia e potenza
Paragrafo	: 14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
Argomento	: 14.42	Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche

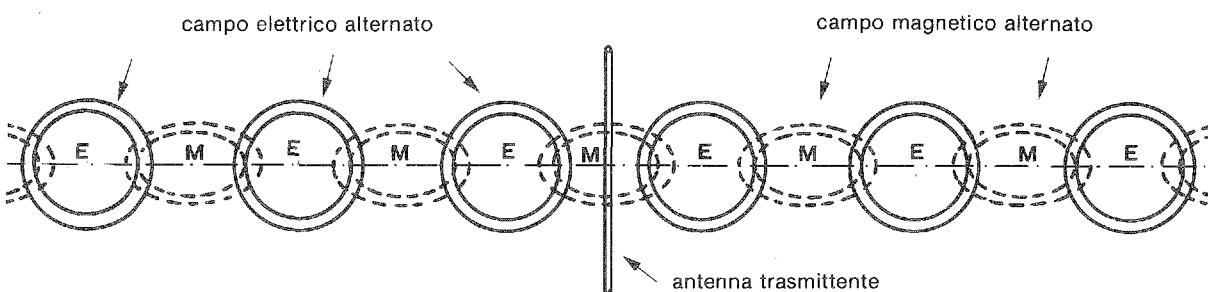
## ESAME DELLA PROPAGAZIONE DALL'ANTENNA TRASMITTENTE ALL'ANTENNA RICEVENTE

### Trasmissione

Sotto la sollecitazione delle correnti elettriche che percorrono l'antenna avanti e indietro (oscillazioni) alla frequenza di trasmissione, si formano attorno all'antenna dei campi magnetici oscillanti alla medesima frequenza.

Ormai sappiamo che un campo magnetico variabile genera forza elettromotrice (f.e.m.), che in questo caso oscilla pure alla medesima frequenza ed inoltre si chiude su se stessa, come se lo spazio fosse riempito di elettroni.

La chiusura della f.e.m. oscillante produce altra corrente e perciò altro campo magnetico oscillante e da questo, altro campo elettrico oscillante e così via.



La catena lineare, che in figura rappresenta il fenomeno in scala mastodontica, è ben lontano dalla realtà:

Con un po' di fantasia il lettore deve immaginare:

- che ogni anello M si concatena con più anelli E
- e che ogni anello E si concatena con più anelli M

e così via in modo da realizzare una propagazione spaziale a fronte sferico di un'onda che però diventa sempre meno densa di energia man mano che si allontana dal centro di sollecitazione (antenna trasmittente), proprio come la parete di un palloncino che diventa sempre più sottile man mano che noi seguitiamo a gonfiarlo.

Queste onde, il cui fronte si allontana dall'antenna proprio come le pareti di tanti palloncini che si gonfiano uno dentro l'altro (concentrici), colpiscono tutto ciò che incontrano e, a seconda della natura dell'ostacolo e delle sue dimensioni, subiscono il fenomeno della riflessione, quello della rifrazione, o passano indisturbate.

### Ricezione

In particolare, se l'ostacolo è di materiale conduttore esso diventa sede di f.e.m. alternata, di frequenza identica a quella dell'antenna trasmittente.

Se la massa di questo materiale conduttore è informe, le correnti che vi si generano si chiudono su se stesse e l'energia così catturata viene interamente dissipata sotto forma di calore.

Ma se all'ostacolo di materiale conduttore diamo un aspetto filiforme di lunghezza opportuna e lo disponiamo in modo che risulti tangente al fronte dell'onda incidente in f.e.m. alternata, sarà possibile sfruttare la f.e.m. che si produce ai suoi capi introducendola in una apparecchiatura che la amplifichi e la renda intelligibile ai nostri sensi.

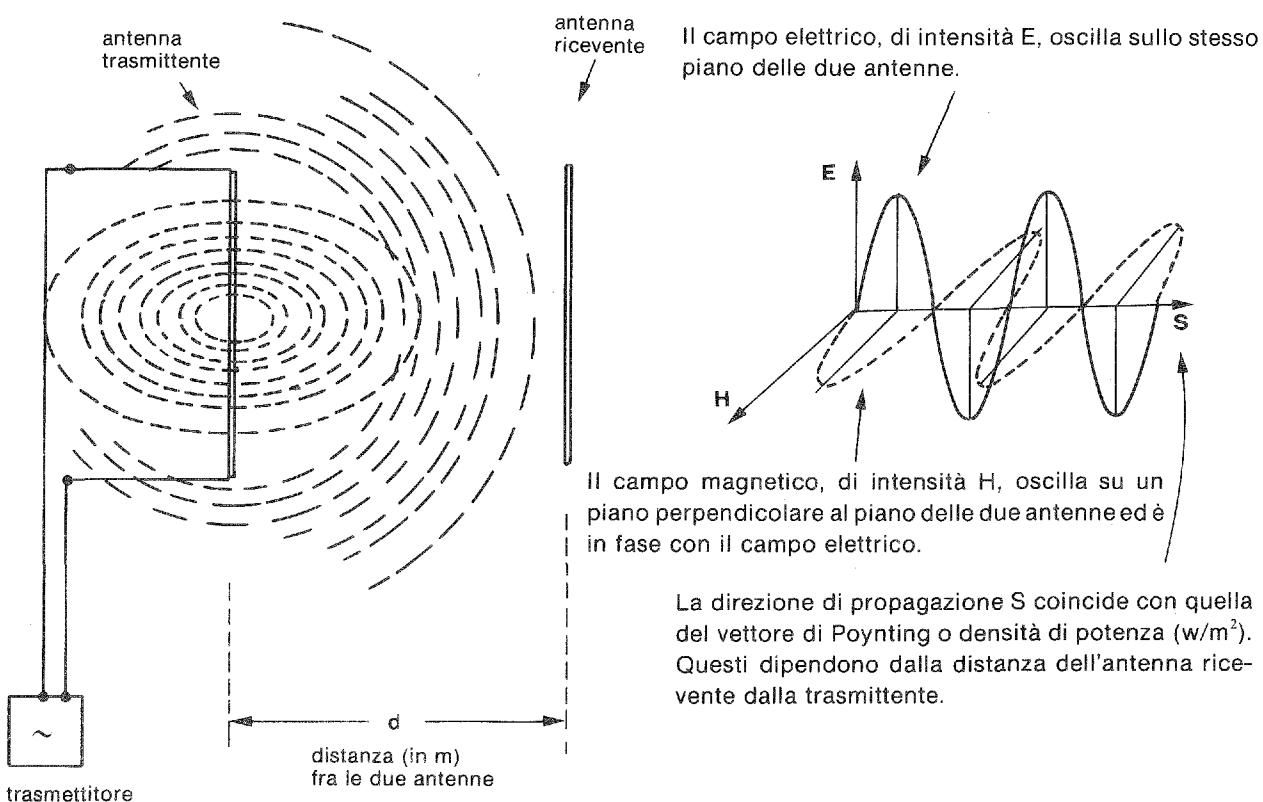
Abbiamo descritto l'antenna ricevente.

Elettricamente essa altro non è che un trasduttore che trasforma la potenza specifica ( $\text{w/m}^2$ ) del fronte dell'onda incidente in f.e.m. alternata.

Visto dall'apparecchiatura che ne amplificherà il segnale, l'antenna ricevente appare come un generatore di segnale con la sua impedenza interna.

### ENTITA' DI POTENZA RICEVUTA DA UN'ANTENNA RICEVENTE

Data la situazione in figura si determinano gli elementi che servono al calcolo.



Espressioni della densità di potenza  
o vettore di Poynting (in  $\text{w/m}^2$ )

$$S = \frac{P}{4\pi d^2}$$

Potenza (in w) irradiata dall'antenna trasmittente

Superficie (in  $\text{m}^2$ ) della sfera d'onda alla distanza  $d$  (in m) dalla trasmittente.

$$S = E \cdot H$$

intensità del campo elettrico  
(in  $\text{V/m}$ ) all'antenna ricevente

Intensità del campo magnetico in ( $\text{Asp/m}$ ) che attraversa l'unica spira formata dall'onda in propagazione nel punto dove si trova l'antenna ricevente.

### IMPEDENZA CARATTERISTICA DELLO SPAZIO VUOTO

Poiché entrambe le grandezze:  $E$  (intensità del campo elettrico)  
 $H$  (intensità del campo magnetico)

diminuiscono nella medesima proporzione, man mano che il punto dove vengono determinate si allontana dalla trasmittente, il loro rapporto

$$Z_0 = \frac{E}{H}$$

è costante in qualsiasi punto dello spazio ed ha le caratteristiche di una impedenza.  
Possiamo concludere che  $Z_0$  è l'**impedenza dello spazio**.

Sperimentalmente si è constatato che  $Z_0 = 377 \Omega$

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	: 14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
<b>Argomento</b>	: 14.42	Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche

### VELOCITA' DI TRASMISSIONE O DI PROPAGAZIONE NEI MATERIALI

L'energia elettromagnetica, tra cui la luce, si trasmette nello spazio cosmico a causa di serie di scambi di energia potenziale di tipo eletrostatico con energia cinetica di tipo elettromagnetico (v. cap. 12) fra loro concatenati dai fenomeni di induzione elettromagnetica.

La velocità di propagazione dell'energia elettromagnetica dipende dalla natura dei materiali stessi e dalle loro caratteristiche fisiche (temperatura, densità ecc.) oltre che dalla frequenza della radiazione stessa. Questo fenomeno è particolarmente importante per le frequenze luminose.

Diamo qui sotto un elenco di valori per quei mezzi solitamente sfruttati dall'uomo (la variabilità dipende da qualità e temperatura del materiale e dalla lunghezza d'onda della luce incidente)

Materiali	Condizioni fisiche	Velocità di propagazione m/sec
Spazio cosmico	inconsistente, ma rigido	$2,99 \cdot 10^8$
Vetro	stato solido	$1,86 \div 2,00 \cdot 10^8$
quarzo	stato solido	$1,77 \div 1,93 \cdot 10^8$
acqua	stato liquido	$2,25 \div 2,28 \cdot 10^8$
alcool	stato liquido	$2,20 \div 2,25 \cdot 10^8$

### VELOCITA' DI PROPAGAZIONE IN RAPPORTO AD ALTRE GRANDEZZE

È affascinante constatare come la velocità delle radiazioni elettromagnetiche nel vuoto si trovi in relazione molto semplice con le costanti dielettriche e magnetiche

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

velocità delle radiazioni  
 (in m/sec) → costante dielettrica del vuoto ↑  
↓ costante magnetica del vuoto  
 $\epsilon_0 = 8,858 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$        $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$

### Lunghezza d'onda

La conoscenza della lunghezza d'onda di una radiazione non è molto importante poiché come vedremo essa dipende dalla conoscenza della frequenza e dalla velocità di propagazione della radiazione stessa. Questa grandezza assume importanza quando il suo valore deve essere posto in relazione alle dimensioni fisiche di ostacoli, particelle ecc.

Ancora oggi, anche se la sua importanza va attenuandosi, si dà risalto a questa grandezza per abitudine basata sulla consuetudine passata.

Ecco la relazione che la lega alla frequenza e alla velocità di propagazione

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

lunghezza d'onda (metri)  
 della radiazione      velocità di propagazione (m/sec)  
 diviso  
 frequenza di emissione (hertz)

**APPUNTI DI  
ELETTRONICA**

Codice  
14.42

Pagina  
8

Sezione : 1	Grandezze fondamentali
Capitolo : 14	Energia e potenza
Paragrafo : 14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
Argomento : 14.42	Analisi e propagazione delle oscillazioni elettromagnetiche

**CLASSIFICAZIONE E PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELL'ENERGIA  
ELETTROMAGNETICA**

FREQUENZA	DENOMINAZIONE	DISPOSITIVO GENERATORE	DISPOSITIVO RIVELATORE	IMPIEGHI PRINCIPALI
inferiore a 30 Hz. 300 Hz	onde a frequenza industriale e acustica per telefonia	dispositivi elettrici ed elettronici	dispositivi elettrici ed elettronici	industriali, telefonia diretta
3 kHz	onde mirametriche VLF a bassissima frequenza			riscaldamento a induzione radionavigazione
30 kHz	onde chilometriche LF a bassa frequenza			radiodiffusione (onde lunghe), radionavigazione
300 kHz	onde ettometriche MF a media frequenza	oscillatori elettronici con tubi a vuoto o a transistor	dispositivi elettronici con tubi a vuoto o a transistor	radiodiffusione (onde medie), modulazione di ampiezza
3 MHz	onde decametriche HF ad alta frequenza			radiodiffusione (onde corte), modulazione di frequenza
30 MHz	onde metriche VHF ad altissima frequenza			radiodiffusione, televisione, modulazione di frequenza
300 MHz	onde decimetriche, UHF a frequenza ultra alta	oscillatori elettronici con tubi a vuoto o a transistor idrogeno interstellare		televisione, sistemi radar (banda L)
3 GHz	onde centimetriche, SHF a frequenza ultra alta			sistemi radar (bande S, C, X, K), laser
30 GHz	onde millimetriche EHF a frequenza estremamente alta	oscillatori elettronici con klystron, magnetron, tubi a onda viaggiante		laser, sperimentali
300 GHz				
3000 GHz	radiazioni infrarosse	corpi caldi, molecole	bolometri, convertitori di immagine e altri dispositivi basati su effetti del riscaldamento, organi del tatto	riscaldamento, laser, fotografia infrarossa
$3 \cdot 10^{13}$ Hz				
$3 \cdot 10^{14}$ Hz	radiazioni visibili	corpi molto caldi, atomi molecole	occhio, spettrometro, fotografia, fotocellule, fotomoltiplicatori	analisi chimica, fotografia, sintesi clorofilliana
$3 \cdot 10^{15}$ Hz	radiazioni ultraviolette	atomi nelle scariche, e negli archi	fotografia, fotocellule, fotomoltiplicatori	analisi chimica, fotografia ultravioletta
$3 \cdot 10^{16}$ Hz				
$3 \cdot 10^{17}$ Hz	raggi X	atomi nelle scariche, bombardamento elettronico di solidi, Orbite interne dell'atomo, annichilazione elettrone-positone	fotografia e altri dispositivi basati sulla ionizzazione	roentgenscopia (medica e industriale), roentgenterapia
$3 \cdot 10^{18}$ Hz				
$3 \cdot 10^{19}$ Hz				
$3 \cdot 10^{20}$ Hz	raggi y	nuclei radioattivi	dispositivi basati sulla ionizzazione	terapia, gammascopia, radioisotopi
$3 \cdot 10^{21}$ Hz				
$3 \cdot 10^{22}$ Hz	raggi y della radiazione cosmica	corpi celesti e materiale interstellare	dispositivi basati sulla ionizzazione	
$3 \cdot 10^{23}$ Hz				

### DIREZIONE DI PROPAGAZIONE E MEZZI ATTRAVERSABILI

Si dice che la luce, come ogni radiazione elettromagnetica, "viaggia in linea retta" per significare che il fronte di avanzamento dell'onda sferica è sempre concentrato rispetto al punto di emissione.

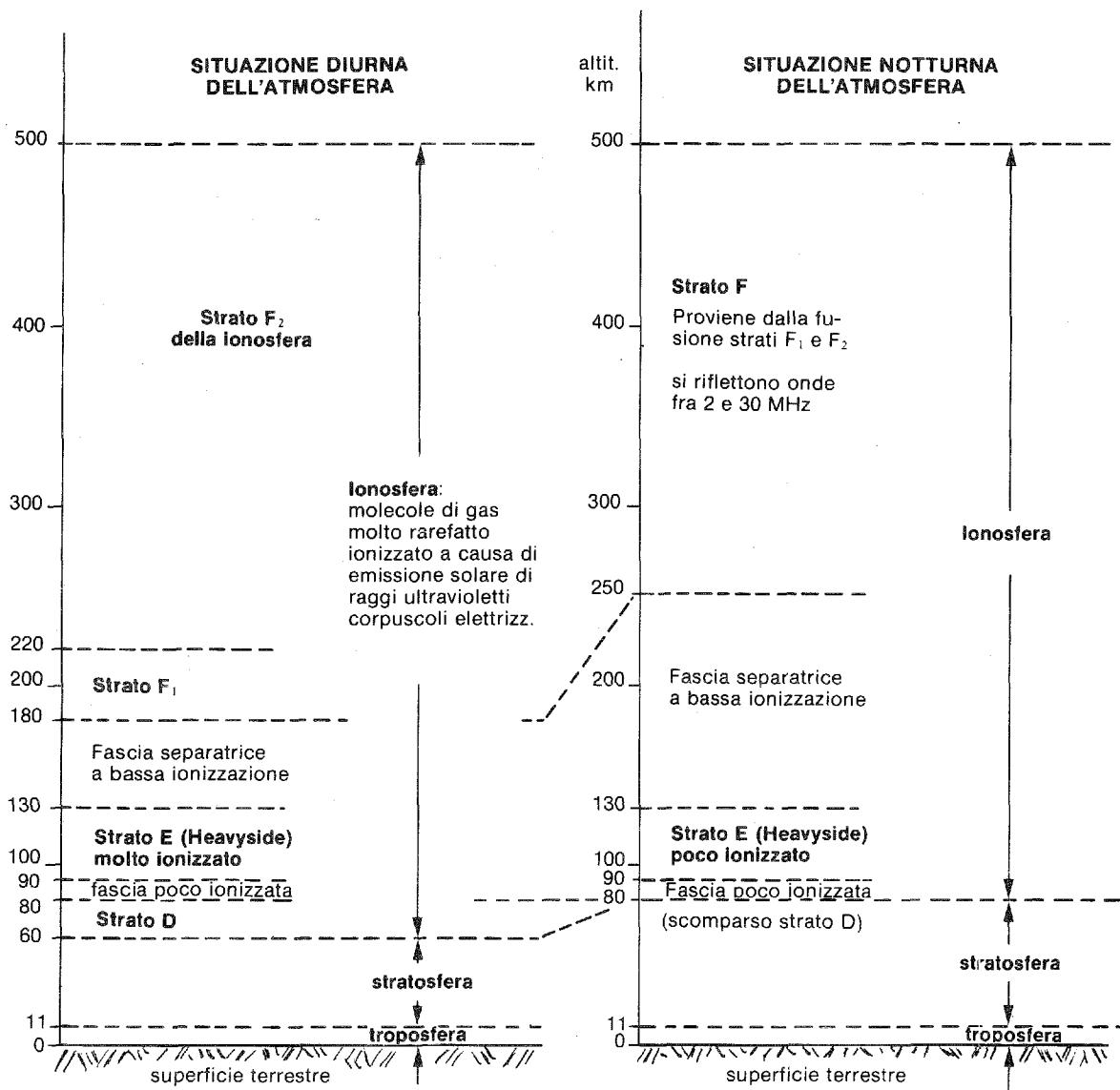
Questo va bene finché le caratteristiche del mezzo di trasmissione si mantengono inalterate come succede nello spazio cosmico, ma già Einstein aveva previsto che il campo gravitazionale influenza la direzione di propagazione.

Inoltre la direzione di propagazione si modifica quando la radiazione si trova ad attraversare mezzi consistenti, ma comunque non conduttori, come l'acqua, il vetro ecc. (fenomeno della rifrazione).

Certe radiazioni infine, come le radioonde, non riescono ad attraversare i materiali conduttori, ma si lasciano riflettere.

In ogni caso, propagazione, riflessione o rifrazione non avvengono senza dispersione.

Vediamo, come è costituita elettricamente la struttura spaziale dei primi 500 km al disopra del suolo terrestre.



### SUDDIVISIONE DELLE ONDE DI PROPAGAZIONE A SECONDA DEL LORO COMPORTAMENTO NELL'ATMOSFERA

Abbiamo già accennato nelle pagine precedenti di questo argomento, che una antenna normale, cioè sprovvista di dispositivi che privilegino una particolare direzione di propagazione, irradia in tutte le direzioni (propagazione sferica).

Ostacoli di natura atmosferica e terrestre, però, creano riflessioni e deviazioni (rifrazioni) che condizionano notevolmente la captazione delle onde irradiate, a seconda della direzione di propagazione.

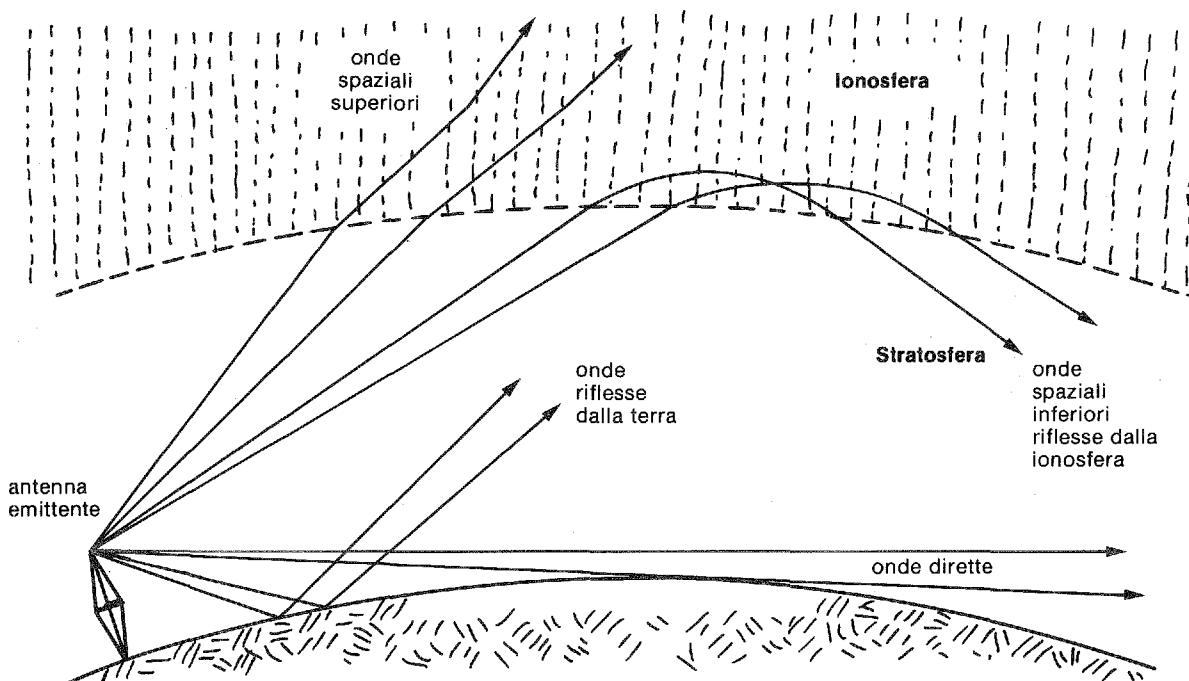
Cercheremo di illustrare nella figura che segue l'influenza della superficie terrestre e della ionosfera nella propagazione delle onde elettromagnetiche.

#### Onde spaziali superiori

Al disopra di un certo angolo critico di elevazione, che dipende dalla frequenza dell'onda emessa, la direzione di propagazione non è riflessa dalla ionosfera e la radiazione prosegue nello spazio cosmico. Le onde con frequenza superiore ai 30 MHz proseguono in ogni caso, qualunque sia l'angolo di direzione.

#### Onde spaziali inferiori

Sono quelle la cui direzione di propagazione si trova al disotto dell'angolo critico e, a causa di continue rifrazioni, non riescono ad attraversare la ionosfera e vengono rimandate sulla terra. Possono essere riflesse più volte fra suolo e ionosfera se non vengono assorbite dal suolo stesso. L'innalzamento notturno della ionosfera diminuisce il numero di riflessioni consentendo una migliore ricezione a lunga distanza.



#### Onde riflesse dalla terra

Le onde di qualsiasi frequenza vengono riflesse dal suolo o, meglio, da montagne che in questo caso sono di notevole aiuto per la diffusione.

Queste onde si trovano sfasate di  $180^\circ$  rispetto alle corrispondenti dirette con le quali possono interferire ed annullarsi in certe zone, dove è perciò impossibile captare segnali di una data emittente.

Onde di frequenza inferiore ai 500 kHz vengono assorbite dalla terra e, non possono essere riflesse.

#### Onde dirette

Sono le onde captate "a vista dalla posizione dell'antenna ricevente".

Le onde al disopra dei 30 MHz non subiscono riflessioni e possono essere captate solo direttamente.

#### Onde superficiali

Non sono rappresentate in figura perché seguono la superficie terrestre e anche la sua curvatura, se la loro energia non è eccessivamente assorbita dalla natura del suolo.

Si trasmettono bene onde di frequenza inferiore ai 500 kHz (onde medie e lunghe).

<b>Sezione</b>	: 1	Grandezze fondamentali
<b>Capitolo</b>	: 14	Energia e potenza
<b>Paragrafo</b>	: 14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
<b>Argomento</b>	: 14.43	Energia acustica

## IRRADIAZIONE DELL'ENERGIA ACUSTICA

Anche l'energia acustica, pur avendo bisogno di un mezzo consistente, si propaga con le stesse leggi sferiche che abbiamo appena viste. L'orecchio umano ha dei limiti di percezione e di sopportazione che esamineremo in questo foglio.

### Generalità

Poichè in elettronica si devono produrre anche segnali che siano intelligenziali acusticamente, che non diano fastidio e che tanto meno siano dannosi all'organo dell'udito, è indispensabile conoscere le dimensioni energetiche di propagazione dell'energia acustica.

Per quanto concerne la propagazione sferica valgono ovviamente le stesse leggi di distribuzione viste precedentemente.

Vi sono però due fattori che intervengono a modificare le cose e che è indispensabile accennare anche se non è argomento di trattazione in questo foglio:

- a) la potenza, globale dal fronte di propagazione si attenua a causa delle dispersioni dovute al mezzo di propagazione che in questo caso è consistente (aria, acqua, corpi solidi)
- b) lo spazio di propagazione non è libero da ostacoli (pareti, oggetti, suolo) che possono costituire riflessioni che tendono ad aumentare la potenza specifica in alcune direzioni rispetto ad altre.

### Limiti umani di percezione

Sono dati sperimentali molto importanti

**Minimo** La minima potenza acustica specifica mediamente percepibile dall'orecchio umano è, alla frequenza di 1000 Hz:  $D_{\min} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

**Massimo** La massima potenza acustica specifica generalmente sopportabile dall'orecchio umano è, alla frequenza di 1000 Hz:  $D_{\max} = 100 \text{ W/m}^2$

### Esempi

Per farci un'idea delle dimensioni del problema, calcoleremo le potenze minime e massime che le apparecchiature devono produrre acusticamente per essere ascoltate a varie distanze.

Si riprende, in funzione della distanza, la relazione della

potenza specifica ( $\text{W/m}^2$ ) del fronte di propagazione →

$$D = \frac{P}{4\pi d^2}$$

← potenza generata (w)  
← distanza (m) al quadrato dal generatore

superficie ( $\text{m}^2$ ) del fronte di propagazione in funzione della distanza del generatore e la risolve rispetto alla potenza generata P che diventa funzione dei due limiti D e della distanza; cioè:

$$P = 4\pi D d^2$$

Ecco in tabella alcuni esempi:

distanza di ascolto metri	Potenza dell'apparecchiatura	
	minima per essere udibile watt	massima per essere sopportabile watt
1	$1.256 \cdot 10^{-11}$	$1.256 \cdot 10^3$
10	$1.256 \cdot 10^{-9}$	$1.256 \cdot 10^5$
100	$1.256 \cdot 10^{-7}$	$1.256 \cdot 10^7$

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.4	Trasformazione e trasmissione dell'energia
Argomento	:	14.43	Energia acustica

**VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELL'ENERGIA ACUSTICA**

Il suono si trasmette meccanicamente in un mezzo consistente aeriforme, liquido o solido per fenomeni elasto-cinetici, cioè di scambio alternativo di energia potenziale di tipo elastico con energia di movimento molecolare a causa delle deformazioni elastiche dei materiali.

La velocità di propagazione dell'energia acustica dipende dalla natura dei materiali stessi e dalle loro caratteristiche fisiche (temperatura, densità ecc.).

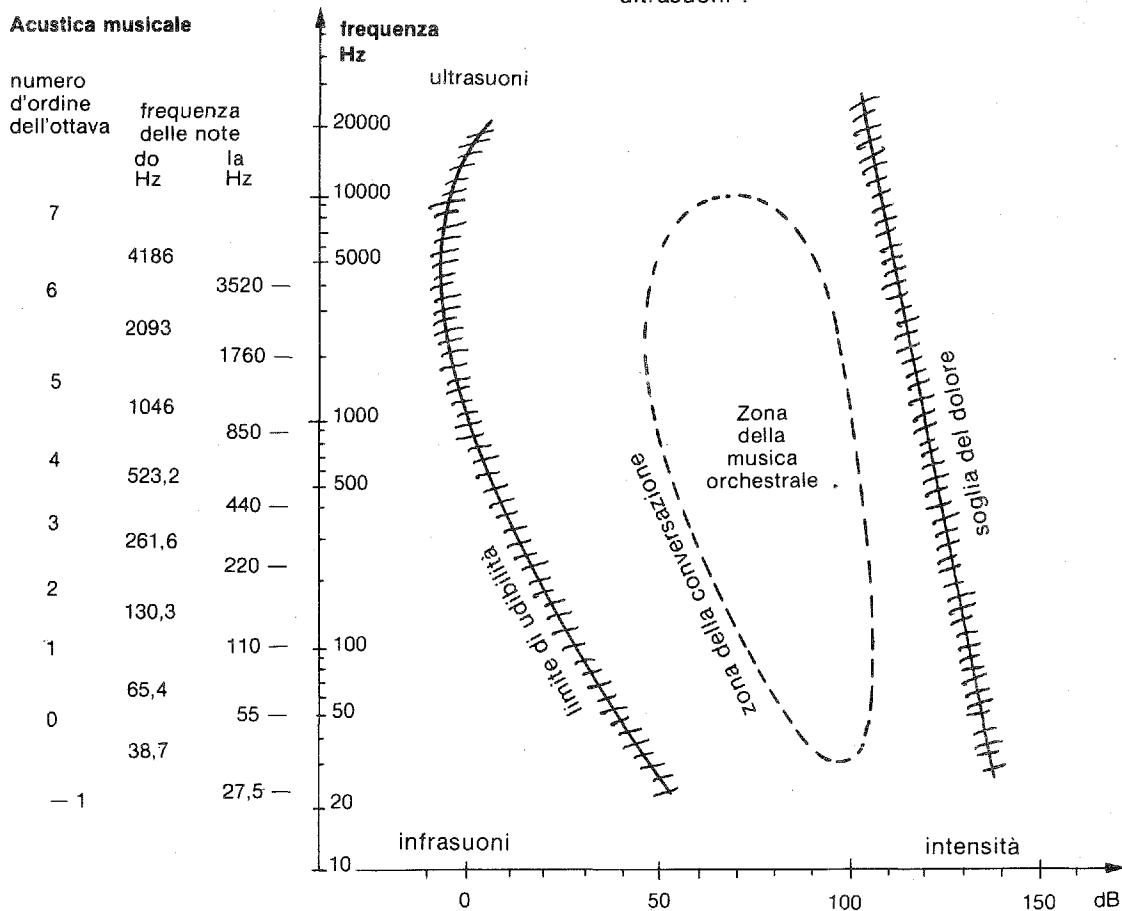
Diamo qui sotto un elenco di valori.

Materiali	Condizioni fisiche pressione e temperatura	velocità di propagazione m/sec
Aria	760 mm. Hg e 0°C	331,4
Idrogeno	760 mm. Hg e 0°C	1270,0
Acqua	760 mm. Hg e 0°C	1500,0
Acciaio	25°C	5960
Vetro	25°C	3980

**FREQUENZE, NOTE MUSICALI, LIMITI DI UDIBILITÀ'**

Il diagramma sotto riportato riassume in sostanza che:

- le note musicali sono caratterizzate da una frequenza ben precisa per ciascuna
- le frequenze sono divise per ottave
- per ottava si intende l'intervallo di frequenze fra quella di un "do" e quella che possiede frequenza doppia che si chiama pure "do".
- la frequenza di ogni nota è doppia della medesima appartenente all'ottava inferiore
- per convenzione si è presa come "la" della 3<sup>a</sup> ottava la frequenza di 440 Hz
- le altre note della medesima ottava sono caratteriz-
- zate da rapporti di frequenza semplici e rigorosamente stabiliti
- i limiti di udibilità in intensità sono da 0 dB ( $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>), quale limite inferiore di percezione, fino a 140 dB (100 W/m<sup>2</sup>), quale soglia del dolore, ma variano da individuo a individuo e dipendono anche dalla frequenza presa in esame
- l'udibilità in frequenza è compresa fra i 20 Hz e i 20 kHz
- le frequenze inferiori a 20 Hz si chiamano "infrasuoni" e le frequenze superiori a 20 kHz si chiamano "ultrasuoni".



Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.5	Amplificazione e attenuazione
Argomento	:	14.50	Indice delle pagine

## Paragrafo 14.5

# AMPLIFICAZIONE E ATTENUAZIONE

### Indice degli argomenti e delle pagine

#### arg. 14. 51 — Amplificazione - Attenuazione Guadagno

- pag. 1 — Amplificazione e attenuazione
  - Generalità
  - Trasduttori attivi
  - Trasduttori passivi
  - Rapporti di potenze
- " 2 — Guadagno - Il Decibel
  - Il rapporto non è sufficiente: si preferisce il suo logaritmo
  - Alcune particolarità
  - Il Decibel
  - Alcune particolarità sul decibel
- " 3 — Guadagno di tensione e di corrente
  - Il decibel in funzione delle tensioni e delle correnti

#### arg. 14. 52 — Livelli energetici nell'acustica

- pag. 1 — Necessità di conoscenza dei livelli acustici
  - Suono
  - Limitazioni
  - Livelli energetici in decibel
  - Limite di confronto
  - Limite massimo
  - Avvertenze

#### arg. 14. 53 — Tabelle di trasformazione

- pag. 1 — Trasformazione di Decibel in Rapporti
  - " 2 — Trasformazione di Rapporti in Decibel

Sezione	: 1	Grandezze fondamentali
Capitolo	: 14	Energia e potenza
Paragrafo	: 14.5	Rapporti fra potenze
Argomento	: 14.51	Amplificazione Attenuazione Guadagno

## AMPLIFICAZIONE E ATTENUAZIONE

**Si studiano i valori dei rapporti fra potenza uscente e potenza entrante nei dispositivi elettronici.**

### Generalità

L'elettronica in generale si occupa di far pilotare dei servomeccanismi (altoparlanti, schermi televisivi, servomotori, telescriventi ecc.) da segnali comunque trasmessi (via cavo, circuiti interni, spazio ecc.).

I servomeccanismi però generalmente richiedono potenze molto superiori a quelle del segnale che li deve pilotare: è quindi necessario ricorrere ad una sorgente di energia (alimentatore) e ad un dispositivo (amplificatore, trasduttore, ecc.) che sia in grado di usare il segnale per manipolare l'energia proveniente dalla sorgente al fine di pilotare il servomeccanismo con la potenza che gli compete.

Questi trasduttori si chiamano attivi.

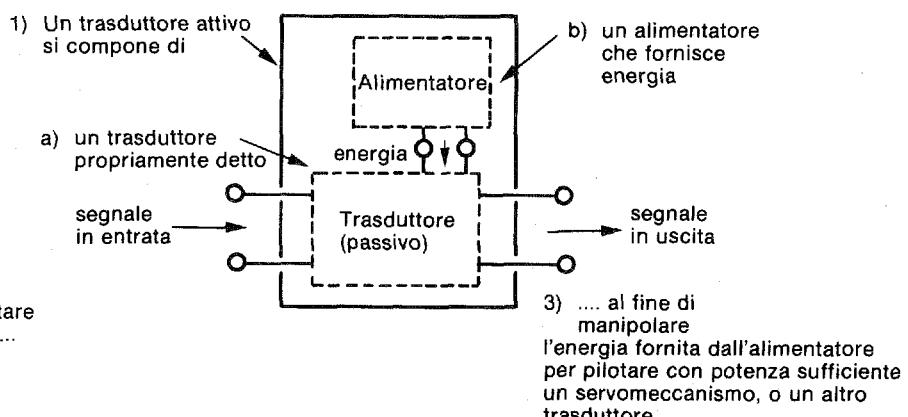
Vi sono trasduttori che manipolano il segnale (naturale o amplificato) senza richiedere intervento di energia dall'esterno (partitori, sfasatori, trasformatori ecc.).

Nella migliore delle ipotesi questi trasduttori, che generalmente formano parte integrante dei circuiti, effettuano la manipolazione del segnale senza variazione di potenza, ma siccome sappiamo che ciò non è possibile, risulterà alla fine della manipolazione (uscita), una perdita di potenza rispetto all'entrata.

Questi trasduttori si chiamano passivi,

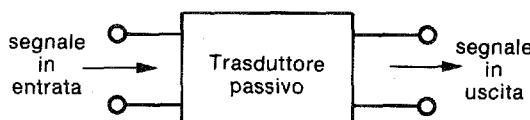
### Trasduttori attivi

Riassumendo:



### Trasduttori passivi

Riassumendo: in un trasduttore passivo non esistono sorgenti di energia



In esso il segnale in entrata viene manipolato senza apporto di energia e pertanto esso perde di potenza a causa delle inevitabili dispersioni.

### Rapporti di potenze

Il rapporto  $\frac{\text{potenza di uscita (watt)}}{\text{potenza di entrata (watt)}}$  =  $A = \frac{P_u}{P_a}$  si chiama:

**amplificazione** se esso è maggiore di 1 ( $A > 1$ ) cioè quando la potenza di uscita è maggiore della potenza di entrata ( $P_u > P_a$ ).

**attenuazione** se esso è minore di 1 ( $A < 1$ ) cioè quando la potenza di uscita è minore della potenza di entrata ( $P_u < P_a$ ).

Sezione	:	1	Grandezze fondamentali
Capitolo	:	14	Energia e potenza
Paragrafo	:	14.5	Rapporti fra potenze
Argomento	:	14.51	Amplificazione Attenuazione Guadagno

**GUADAGNO IL DECIBEL**

Il confrontare potenze attraverso un semplice rapporto non accontenta il tecnico elettronico: egli preferisce concetti più complicati.

**Il rapporto non è sufficiente: si preferisce il suo logaritmo.**

Anzichè il semplice rapporto fra potenze per definire l'amplificazione o l'attenuazione, si preferisce prendere in considerazione

il **logaritmo decimale** di detto rapporto

$$\text{guadagno} \quad \xrightarrow{\text{(in bel)}} \quad G = \log \frac{P_u}{P_e} \quad \begin{array}{l} \xleftarrow{\text{potenza di uscita (watt)}} \\ \xleftarrow{\text{potenza di entrata (watt)}} \end{array}$$

Symbol B

Il motivo di questa scelta pare legato ad un fenomeno psicologico relativo alla percezione uditiva di un segnale che passa come "legge psicofisica" di Weber e Fechner.

Il motivo per cui nell'era dei calcolatori questa notazione antiquata venga ancora largamente usata, resta avvolta nel più fitto mistero: non ho trovato autore che mi abbia soddisfatto questa curiosità.

**Alcune particolarità**

$$\text{Poiché } (14.51 - 1) \quad \frac{P_u}{P_e} = A$$

$$\text{logaritmo decimale} \quad \downarrow \quad \begin{array}{l} \text{avremo che} \\ \text{guadagno (in bel)} \end{array} \quad G = \log A \quad \begin{array}{l} \text{ampl. + atten.} \end{array}$$

Inoltre, a titolo di esempio, avremo il guadagno di **zero bel** quando la potenza di uscita è uguale alla potenza di entrata.

Infatti, poiché in questo caso l'amplificazione  $A = 1$ , si ha che  $\log 1 = 0$

Avremo ancora il guadagno di **1 bel** (1 B) quando sarà  $A = 10$

Infatti  $\log 10 = 1$

Infine avremo il guadagno di **-1 bel** (-1 B) quando sarà  $A = 0,1$  (attenuazione). Infatti  $\log 0,1 = -1$

**IL DECIBEL**

Siccome il concetto non era ancora abbastanza complicato, è stato inventato il **decibel** (simbolo dB) cancellando che il "bel" era una unità di misura troppo grande e costringeva i tecnici a trattare quindi con cifre troppo piccole!!!

Il decibel è la decima parte di un bel. Perciò  
un bel      1 B = 10 dB    dieci decibel, e  
un decibel    1 dB = 0,1 B    un decimo di bel.

Riassumendo, diamo la relazione che lega il decibel al rapporto fra potenze (amplificazione e attenuazione).

$$\text{guadagno (in dB)} \rightarrow \quad G = 10 \log \frac{P_u}{P_e} \quad \begin{array}{l} \xleftarrow{\text{potenza di uscita (watt)}} \\ \xleftarrow{\text{potenza di entrata (watt)}} \end{array}$$

In (14.53) troverete le tavole comparative dei due sistemi di misura.

**Alcune particolarità sul decibel**

L'unica coincidenza numerica fra i due sistemi di misura si ha per

$$G = 10 \text{ dB} \quad \text{che corrisponde ad} \quad A = 10$$

essendo  $\log 10 = 1$  si ha

$$G = 10 \log_{10} 10 = 10 \text{ dB.}$$

Sezione	: 1	Grandezze fondamentali
Capitolo	: 14	Energia e potenza
Paragrafo	: 14.5	Rapporti fra potenze
Argomento	: 14.51	Amplificazione attenuazione Guadagno

## GUADAGNO DI TENSIONE E DI CORRENTE

La potenza si può esprimere anche in funzione della tensione o in funzione della corrente.

In questo argomento esprimeremo il guadagno in funzione del rapporto fra tensioni o fra correnti in uscita e in entrata di un trasduttore.

### Il decibel in funzione delle tensioni o delle correnti

La terza e finalmente ultima complicazione sta nel fatto che, quando dobbiamo esprimere in dB (decibel) un guadagno di tensione o di corrente **non possiamo** limitarci a fare il rapporto.

$$A = \frac{V_u}{V_e}$$

amplificazione di tensione

tensione di uscita (volt)

tensione di entrata (volt)

$$A = \frac{I_u}{I_e}$$

amplificazione di corrente

corrente di uscita (amp)

corrente di entrata (amp)

ma dobbiamo ricordarci, anche quando non ci serve, che quando si parla di **decibel** ci si riferisce sempre al logaritmo di un rapporto di potenze.

Essendo perciò (14.34-5)  
rispetto alla tensione

$$P = YV^2$$

potenza (watt)  
apparente

tensione (volt) al quadr.  
ammittenza (siemens)

oppure (14.34-5)  
rispetto alla corrente

$$P = ZI^2$$

potenza (watt)  
apparente

corrente (amp) al quadr.  
impedenza (ohm)

guadagno di  
corrente (bel)

si avrà, considerando uguali fra loro le ammettenze di uscita e di entrata (per evitare una quarta complicazione):

guadagno di  
tensione (bel)

$$\begin{aligned} G_v &= \frac{P_u}{P_e} = \\ &= \log \frac{YV_u^2}{YV_e^2} = \\ &= \log \left( \frac{V_u^2}{V_e^2} \right) \\ &= 2 \log \frac{V_u}{V_e} \end{aligned}$$

perciò, in decibel

$$G_v = 20 \log_{10} \frac{V_u}{V_e}$$

tensione uscita  
(volt)

tensione entrata  
(volt)

20 volte il  
logaritmo  
decimale

$$\begin{aligned} G_i &= \frac{P_u}{P_e} = \\ &= \log \frac{ZI_u^2}{ZI_e^2} = \\ &= \log \left( \frac{I_u^2}{I_e^2} \right) \\ &= 2 \log \frac{I_u}{I_e} \end{aligned}$$

perciò, in decibel

$$G_i = 20 \log_{10} \frac{I_u}{I_e}$$

corrente uscita  
(amp)

corrente entrata  
(amp)

20 volte il  
logaritmo  
decimale

### NECESSITA' DI CONOSCENZA DEI LIVELLI ACUSTICI

Quando l'elettronica interessa quei segnali che devono essere percepiti dall'orecchio, è indispensabile conoscere i limiti di funzionamento di questo organo, in termini assoluti come potenza specifica ( $\text{w/m}^2$ ) o relativi (dB)

#### Suono

Come è noto, il suono è energia prodotta da vibrazioni che si trasmettono attraverso l'aria, i gas, i liquidi e i solidi, e che vengono percepiti dall'orecchio umano.

#### Limitazioni

L'orecchio umano ha le seguenti estreme limitazioni alla percezione:

frequenza: da 20 a 20.000 Hz (normalmente da 30 a 15.000 Hz)

potenza relativa: da 0 dB (limite di percezione) a 140 dB (soglia del dolore) (rispetto ad una minima potenza presa come riferimento) v. 14.43-1.

#### Livelli energetici in decibel

L'uso del decibel anche per definire misure assolute di livelli energetici in acustica è quanto mai improprio ed è fonte di notevoli perplessità per i neofiti.

Poichè il decibel è tipicamente una grandezza relativa e definisce una misura di confronto dato che dipende dal rapporto fra due grandezze, sentir dire che un certo suono viene percepito con l'intensità, ad esempio, di 20 dB, il minimo che ci si possa domandare è: "rispetto a che cosa?"

#### Limite di confronto

È necessario perciò determinare un limite di confronto.

Esso è stato stabilito, ed universalmente accettato, nel minimo livello energetico percepibile dall'orecchio umano (v.14.43-1).

Questo livello deve avere le dimensioni di una potenza specifica ( $\text{w/m}^2$ ), ed ha il seguente valore.

grandezza di confronto  
per la misura dei livelli acustici  $10^{-12} \text{ w/m}^2$  cioè  $1 \text{ pw/m}^2$

Questo limite è stato assunto come **livello 0** (zero) quando si vuole esprimere la potenza acustica in **decibel**. Cioè, in altre parole, quando si parla di intensità acustica di 0 dB, significa un livello energetico della potenza specifica di  $1 \text{ pw/m}^2$ .

#### Limite massimo

Il limite massimo, inteso anche come "soglia del dolore" corrisponde statisticamente al livello di 140 dB.

Risolvendo in termini assoluti (14.51-2) questo livello corrisponde ad una potenza specifica  $10^{14}$  volte quella di confronto (poichè  $140 \text{ dB} = 14 \text{ B}$ ), cioè

$$10^{-12} \text{ w/m}^2 \cdot 10^{14} = 10^2 \text{ w/m}^2$$

↑                      ↑

energia minima percepibile      fattore di moltiplicazione corrisponde a 140 dB

In altre parole, il livello massimo sopportabile è

$100 \text{ w/m}^2$

#### Avvertenze

A scanso di perplessità o di delusioni è indispensabile che le misure di un generatore acustico indichino a che distanza dal generatore esse sono state effettuate, se all'aperto senza pareti riflettenti, in locale chiuso afono oppure riverberante ecc.

Tabella di confronto	
dB	$\text{w/m}^2$
0	$10^{-12}$
10	$10^{-11}$
20	$10^{-10}$
30	$10^{-9}$
40	$10^{-8}$
50	$10^{-7}$
60	$10^{-6}$
70	$10^{-5}$
80	$10^{-4}$
90	$10^{-3}$
100	$10^{-2}$
110	$10^{-1}$
120	1
130	$10^{-1}$
140	$10^{-2}$

Tabella di trasformazione da DECIBEL IN RAPPORTI

dB	Rapporti				Rapporti				
	Tensione e Corrente		Potenza		Tensione e Corrente		Potenza		
	Ampl.	Atten.	Ampl.	Atten.	Amplific.	Attenuazione	Amplificazio.	Attenuazione	
0.1	1.01	0.989	1.02	0.997	8.0	2.51	0.398	6.31	0.158
0.2	1.02	0.977	1.05	0.955	8.5	2.66	0.376	7.08	0.141
0.3	1.03	0.966	1.07	0.966	9.0	2.82	0.355	7.94	0.126
0.4	1.05	0.955	1.10	0.912	9.5	2.98	0.335	8.91	0.112
0.5	1.06	0.944	1.12	0.891	10.0	3.16	0.316	10.00	0.100
0.6	1.07	0.933	1.15	0.871	11.0	3.55	0.282	12.6	0.079
0.7	1.08	0.923	1.17	0.851	12.0	3.98	0.251	15.8	0.063
0.8	1.10	0.912	1.20	0.832	13.0	4.47	0.224	19.9	0.050
0.9	1.11	0.902	1.23	0.813	14.0	5.01	0.199	25.1	0.040
1.0	1.12	0.891	1.26	0.794	15.0	5.62	0.178	31.6	0.032
1.1	1.13	0.881	1.29	0.776	16.0	6.31	0.158	39.8	0.025
1.2	1.15	0.871	1.32	0.759	17.0	7.08	0.141	50.1	0.020
1.3	1.16	0.861	1.35	0.741	18.0	7.94	0.126	63.1	0.016
1.4	1.17	0.851	1.38	0.724	19.0	8.91	0.112	79.4	0.013
1.5	1.19	0.841	1.41	0.708	20.0	10.00	0.100	100.0	0.010
1.6	1.20	0.832	1.44	0.692	25.0	17.8	0.056	$3.16 \times 10^2$	$3.16 \times 10^{-2}$
1.7	1.22	0.822	1.48	0.676	30.0	31.6	0.032	$10^3$	$10^{-3}$
1.8	1.23	0.813	1.51	0.661	35.0	56.2	0.018	$3.16 \times 10^3$	$3.16 \times 10^{-4}$
1.9	1.24	0.803	1.55	0.646	40.0	100.0	0.010	$3.16 \times 10^2$	$3.16 \times 10^{-2}$
2.0	1.26	0.794	1.58	0.631	45.0	177.8	0.006	$3.16 \times 10^4$	$3.16 \times 10^{-5}$
2.2	1.29	0.776	1.66	0.603	50.0	316	0.003	$10^5$	$10^{-5}$
2.4	1.32	0.759	1.74	0.575	55.0	562	0.002	$3.16 \times 10^5$	$3.16 \times 10^{-6}$
2.6	1.35	0.741	1.82	0.550	60.0	1,000	0.001	$10^6$	$10^{-6}$
2.8	1.38	0.724	1.91	0.525	65.0	1,780	0.0006	$3.16 \times 10^6$	$3.16 \times 10^{-7}$
3.0	1.41	0.708	1.99	0.501	70.0	3,160	0.0003	$10^7$	$10^{-7}$
3.2	1.44	0.692	2.09	0.479	75.0	5,620	0.0002	$3.16 \times 10^7$	$3.16 \times 10^{-8}$
3.4	1.48	0.676	2.19	0.457	80.0	10,000	0.0001	$10^8$	$10^{-8}$
3.6	1.51	0.661	2.29	0.436	85.0	17,800	0.00006	$3.16 \times 10^8$	$3.16 \times 10^{-9}$
3.8	1.55	0.646	2.40	0.417	90.0	31,600	0.00003	$10^9$	$10^{-10}$
4.0	1.58	0.631	2.51	0.398	95.0	56,200	0.00002	$3.16 \times 10^9$	$10^{-10}$
4.2	1.62	0.617	2.63	0.380	100.0	100,000	0.00001	$10^{10}$	$10^{-10}$
4.4	1.66	0.603	2.75	0.636	105.0	178,000	0.000006	$3.16 \times 10^{10}$	$3.16 \times 10^{-10}$
4.6	1.70	0.589	2.88	0.347	110.0	316,000	0.000003	$10^{11}$	$10^{-11}$
4.8	1.74	0.575	3.02	0.331	115.0	562,000	0.000002	$3.16 \times 10^{11}$	$3.16 \times 10^{-12}$
5.0	1.78	0.562	3.16	0.316	120.0	1,000,000	0.000001	$10^{12}$	
5.5	1.88	0.531	3.55	0.282	130.0	$3.16 \times 10^6$	$3.16 \times 10^{-7}$	$10^{13}$	$10^{-14}$
6.0	1.99	0.501	3.98	0.251	140.0	$10^7$	$10^{-7}$	$10^{14}$	$10^{-14}$
6.5	2.11	0.473	4.47	0.224	150.0	$3.16 \times 10^7$	$3.16 \times 10^{-8}$	$10^{15}$	$10^{-15}$
7.0	2.24	0.447	5.01	0.199	160.0	$10^8$	$10^{-8}$	$10^{16}$	$10^{-16}$
7.5	2.37	0.422	5.62	0.178	170.0	$3.16 \times 10^8$	$3.16 \times 10^{-9}$	$10^{17}$	$10^{-17}$

Avvertenze:

Il rapporto in amplificazione si intende per valori positivi di dB.  
 Il rapporto in attenuazione si intende per valori negativi di dB.

Tabella di trasformazione di RAPPORTI IN DECIBEL

Rapporto	dB equivalente		Rapporto	dB equivalente		Rapporto	dB equivalente	
	Potenza	Tensione o Corrente		Potenza	Tensione o Corrente		Potenza	Tensione o Corrente
0.01	— 20.00	— 40.00	0.80	— 0.97	— 1.94	11.0	10.41	20.83
0.02	— 16.99	— 33.98	0.85	— 0.71	— 1.41	12.0	10.79	21.58
0.03	— 15.23	— 30.46	0.90	— 0.46	— 0.92	13.0	11.14	22.28
0.04	— 13.98	— 27.96	0.95	— 0.22	— 0.45	14.0	11.46	22.92
0.05	— 13.01	— 26.02	1.00	0.00	0.00	15.0	11.76	23.52
0.06	— 12.22	— 24.44	1.10	0.41	0.83	16.0	12.04	24.08
0.07	— 11.55	— 23.10	1.20	0.79	1.58	17.0	12.30	24.61
0.08	— 10.97	— 21.94	1.30	1.14	2.28	18.0	12.55	25.11
0.09	— 10.46	— 20.92	1.40	1.46	2.92	19.0	12.79	25.58
0.10	— 10.00	— 20.00	1.50	1.76	3.52	20.0	13.01	26.02
0.11	— 9.59	— 19.17	1.60	2.04	4.08	22.0	13.42	26.85
0.12	— 9.21	— 18.42	1.70	2.30	4.61	24.0	13.80	27.60
0.13	— 8.86	— 17.72	1.80	2.55	5.11	26.0	14.15	28.30
0.14	— 8.54	— 17.08	1.90	2.79	5.58	28.0	14.47	28.94
0.15	— 8.24	— 16.48	2.00	3.01	6.02	30.0	14.77	29.54
0.16	— 7.96	— 15.92	2.20	3.42	6.85	32.0	15.05	30.10
0.17	— 7.70	— 15.39	2.40	3.80	7.60	34.0	15.32	30.63
0.18	— 7.45	— 14.90	2.60	4.15	8.30	36.0	15.56	31.13
0.19	— 7.21	— 14.42	2.80	4.47	8.94	38.0	15.80	31.60
0.20	— 6.99	— 13.98	3.00	4.77	9.54	40.0	16.02	32.04
0.22	— 6.58	— 13.15	3.20	5.05	10.10	42.0	16.23	32.46
0.24	— 6.20	— 12.40	3.40	5.32	10.63	44.0	16.43	32.87
0.26	— 5.85	— 11.70	3.60	5.56	11.13	46.0	16.63	33.26
0.28	— 5.53	— 11.06	3.80	5.80	11.60	48.0	16.81	33.63
0.30	— 5.23	— 10.46	4.00	6.02	12.04	50.0	16.99	33.98
0.32	— 4.95	— 9.90	4.20	6.23	12.46	55.0	17.40	34.81
0.34	— 4.69	— 9.37	4.40	6.43	12.87	60.0	17.78	35.56
0.36	— 4.44	— 8.88	4.60	6.63	13.26	65.0	18.13	36.26
0.38	— 4.20	— 8.40	4.80	6.81	13.62	70.0	18.45	36.90
0.40	— 3.98	— 7.96	5.00	6.99	13.98	75.0	18.75	37.50
0.42	— 3.77	— 7.53	5.50	7.40	14.81	80.0	19.03	38.06
0.44	— 3.57	— 7.13	6.00	7.78	15.56	85.0	19.29	38.59
0.46	— 3.37	— 6.74	6.50	8.13	16.26	90.0	19.54	39.08
0.48	— 3.19	— 6.38	7.00	8.45	16.90	95.0	19.78	39.55
0.50	— 3.01	— 6.02	7.50	8.75	17.50	100.0	20.00	40.00
0.55	— 2.60	— 5.19	8.00	9.03	18.06	$10^3$	30.00	60.00
0.60	— 2.22	— 4.44	8.50	9.29	18.59	$10^4$	40.00	80.00
0.65	— 1.87	— 3.74	9.00	9.54	19.08	$10^5$	50.00	100.00
0.70	— 1.55	— 3.10	9.50	9.78	19.55	$10^6$	60.00	120.00
0.75	— 1.25	— 2.50	10.00	10.00	20.00	$10^7$	70.00	140.00

## Avvertenza:

Per quei valori che non compaiono nella presente tabella si può sfruttare la seguente proprietà:  
la moltiplicazione del rapporto per  $10^n$  corrispondente alla aggiunta al corrispondente valore in decibel  
di 10 n per i rapporti in potenza  
di 20 n per i rapporti in tensione e corrente.

Esempio

Un rapporto di tensione di 2200 corrisponde a  $26.85 + 40 = 66.85$  dBUn rapporto di potenza di 2200 corrisponde a  $13.42 + 20 = 33.42$  dBe ancora un rapporto di potenza  $0.22 \cdot 10^{-3}$  corrispondente a  $-6.58 - 30 = -36.58$  dB.

Supplemento al n. 3 di

## SPERIMENTARE

Rivista mensile di elettronica pratica; Editore: J.C.E. - Direttore responsabile: RUBEN CASTELFRANCHI - Direttore Editoriale: GIANPIETRO ZANGA - Capo redattore: GIANNI DE TOMASI - Redazione: SERGIO CIRIMBELL, DANIELE FUMAGALLI, TULLIO LACCHINI, MARTA MENEGARDO - Grafica e impaginazione: MARCELLO LONGHINI - Laboratorio: ANGELO CATTANEO, LORENZO BARRILE - Contabilità: ROBERTO OSTELLI, M. GRAZIA SEBASTIANI - Diffusione e abbonamenti: PATRIZIA GHIONI - Collaboratori: LUCIO VISINTINI, FILIPPO PIPIONE, LUCIO BIANCOLI, FEDERICO CANCARINI, LODOVICO CASCIANINI, SANDRO GRISOSTOLO, GIOVANNI GIORGINI, ADRIANO ORTILE, AMADIO GOZZI, PIERANGELO PENSA, GIUSEPPE CONTARDI - Direzione, Redazione, Amministrazione: Via dei Lavoratori, 124 - 20092 Cinisello Balsamo - Milano, Telefono 6172671 - 6172641. - Sede legale: Via Vincenzo Monti, 15 - 20123 Milano. - Autorizzazione alla pubblicazione: Tribunale di Monza, numero 258 del 28-11-1974. - Stampa Litografia del Sole - Albairate (MI). - Concessionario esclusivo per la diffusione in Italia e all'Estero SODIP - Via Zuretti, 25 - 20125 Milano. - Spedizione in abbonamento postale gruppo III/70.



JACOPO CASTELFRANCHI EDITORE

© Tutti i diritti di riproduzione e traduzione degli articoli pubblicati sono riservati.



Mensile associato all'USPI  
Unione Stampa Periodica Italiana