

COSTRUZIONE DI UN PREAMPLIFICATORE PER CHITARRA ELETTRICA

Federico Polli
4G LiLu2 Savosa
2005/2006

INDICE

Prefazione	4
1. Introduzione teorica	5
1.1. Forze elettriche e campi elettrici	5
1.1.1. La carica elettrica	5
1.1.2. La legge di Coulomb	5
1.1.3. Il campo elettrico.....	7
1.2. Energia potenziale elettrica e potenziale elettrico	9
1.3. La corrente elettrica	11
1.3.1. Definizione di corrente elettrica	11
1.3.2. Legge di Ohm e resistenza	12
1.3.2.1. Resistenze nei circuiti.....	14
1.3.4. I principi di Kirchof.....	15
1.3.4.1. Esempi pratici	16
1.3.5. Potenza elettrica	18
1.3.6. Corrente alternata	18
1.3.6.1. Corrente	19
1.3.6.2. Potenziale elettrico	19
1.3.6.3. Legge di Ohm	19
1.3.6.4. Potenza elettrica.....	20
1.4. Magnetismo	21
1.4.1. I magneti	21
1.4.2. Il campo magnetico	22
1.4.3. Il flusso magnetico	22
1.4.4. La legge di Faraday-Neumann e l'induzione elettromagnetica	23
1.5. I tubi a vuoto	24
1.5.1. L'effetto termoionico	24
1.6. I semiconduttori	25
1.6.1. I semiconduttori	25
1.6.2. I semiconduttori drogati	25
1.6.2.1. Tipo P	25
1.6.2.2. Tipo N	26
1.6.3. Giunzioni PN.....	26
1.6.3.1. Giunzioni simmetriche	27
1.6.3.2. Giunzioni asimmetriche.....	27
1.6.4. Polarizzazione delle giunzioni PN	27
1.6.4.1. Polarizzazione diretta	28
1.6.4.2. Polarizzazione inversa	28
2. Componenti elettronici	29
2.1. Il resistore	29
2.1.1. La resistenza: principio	29
2.1.2. L'influenza della temperatura sulla resistenza di un conduttore	30
2.2. Il condensatore	32
2.2.1. Il condensatore: principio	32
2.2.2. Capacità.....	33
2.2.3. Il condensatore in corrente continua ed alternata	34
2.2.3.1. Corrente continua	34
2.2.3.2. Corrente alternata: reattanza capacitiva	34
2.3. La bobina	37
2.3.1. La bobina.....	37
2.3.2. Induttanza.....	38
2.3.3. La bobina in corrente continua ed alternata	38
2.3.3.1. Corrente continua	39
2.3.3.2. Corrente alternata: reattanza induttiva.....	39

2.4. Trasformatori	41
2.5. Tubi a vuoto	43
2.5.1. Diodo.....	43
2.5.2. Triodo.....	44
2.5.3. Tetodo e pentodo	45
2.6. Componenti a semiconduttori	46
2.6.1. Diodo.....	46
2.6.2. Transistor	47
3 Circuiti semplici	50
3.1. Circuiti RC.....	50
3.2. Circuiti RL.....	52
3.5. Circuiti amplificatori	53
3.5.1. Preamplificatori.....	54
3.5.2. Stadio di potenza.....	56
4 Realizzazione pratica di un preamplificatore.....	57
4.1. Materiale e metodi.....	57
4.1.1. Circuito.....	57
4.1.2. Materiale	58
4.1.3. Strumenti e metodo di lavoro	59
4.2. Costruzione	62
4.3. Risultati	65
4.4. Osservazioni.....	68
Conclusioni.....	69
Bibliografia.....	70
Allegati.....	71

Prefazione

Ho scelto questo lavoro di maturità spinto dalla curiosità.

Vedendo tutti i giorni apparecchiature elettroniche ed elettrodomestici mi sono domandato quali fossero i principi fisici sui quali questi si basassero nel loro funzionamento. La mia passione per la chitarra elettrica e l'elaborazione dei suoni mi ha molto influenzato nella scelta del progetto pratico. Chi come me suona questo strumento sicuramente sa che sul mercato si possono trovare i più disparati tipi di effetti elettronici per l'elaborazione del suono. È mia intenzione realizzare un progetto che mi consentirà l'elaborazione sonora più semplice: l'amplificazione. Sia perché all'inizio del mio lavoro nessun aspetto dell'elettromagnetismo era ancora stato trattato a lezione, sia per curiosità personale e voglia di sapere, mi sono soffermato particolarmente sulla parte teorica che è ricca di concetti, i quali non verranno tutti implicati nel progetto del preamplificatore, ma che costituiscono comunque un'interessante base per una migliore comprensione di questa interessante branca della fisica.

I concetti che vengono utilizzati nel lavoro pratico sono stati verificati sperimentalmente.

1. Introduzione teorica

1.1. Forze elettriche e campi elettrici

1.1.1. La carica elettrica

Le proprietà della carica Le principali proprietà della carica elettrica sono le seguenti: la carica si conserva, la carica è quantizzata, la forza d'attrazione/repulsione tra due cariche puntiformi è inversamente proporzionale al quadrato della distanza che le separa.

La prima Proprietà L'enunciazione della prima delle proprietà elencate sopra è dovuta agli esperimenti e di Benjamin Franklin. Egli, al contrario dei suoi predecessori, non era persuaso da un modello elettrico a due fluidi (positivo e negativo), ma credeva piuttosto in un modello ad un unico fluido che spiega la carica positiva e negativa di un oggetto come l'eccesso, rispettivamente la carenza, di questo fluido chiamato elettricità.

Per questo motivo non si può creare una carica elettrica ma solo trasferirla e questo implica la proprietà sopraccitata di conservazione della carica elettrica.

La seconda proprietà La seconda proprietà, quella che riguarda la carica quantizzata, ci indica, in parole più semplici che qualsiasi carica è multipla di un valore fondamentale di carica. Questa conclusione è stata tratta da Robert Millikan nel 1909 a seguito della scoperta dell'elettrone. Questo valore fondamentale di carica viene indicato con e . Possiamo dunque esprimere qualsiasi carica q con multipli di e ($1.60 \cdot 10^{-19} C$) (per C si intende l'unità di misura della carica elettrica, ossia il Coulomb). L'elettrone possiede una carica pari a $-e$ mentre il protone possiede carica $+e$.

La terza proprietà La terza proprietà della carica elettrica viene descritta dalla legge di Coulomb che tratteremo nel paragrafo seguente.

1.1.2. La legge di Coulomb

Per due cariche Secondo questa legge, la forza \vec{F} che una carica puntiforme q_1 esercita su una seconda carica puntiforme q_2 posta a distanza r ha la stessa direzione della retta che congiunge le due cariche ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza r . Se le due cariche hanno segno opposto si attraggono (Fig. 1a), mentre se hanno valori dello stesso tipo si respingono (Fig. 1b).

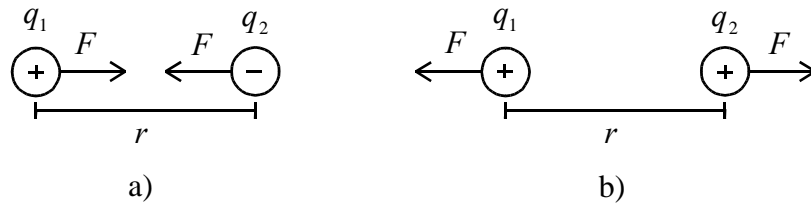


Fig. 1 - Due cariche con segno opposto si attraggono (a) mentre due cariche con segno uguale si respingono (b).

La forza di attrazione/repulsione viene calcolata con la seguente relazione:

Forza di coulomb

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

dove k è la costante di Coulomb ed è pari a $8.99 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

Possiamo notare una forte analogia di questa relazione con una formula che descrive l'attrazione gravitazionale di due corpi. Abbiamo solo analizzato l'esempio in cui due cariche interagiscono.

Per un sistema di più cariche

Nel caso in cui più cariche vengano prese in considerazione, per stabilire la forza elettrica agente su una delle cariche è necessario calcolare la somma vettoriale delle singole forze di interazione tra ogni carica e la carica considerata. Ad esempio Se poniamo una carica q_0 in un sistema di cariche q_1, q_2, q_3 (Fig. 2) possiamo definire la forza \vec{F} esercitata da queste tre cariche su q_0 come la somma vettoriale di tutte le forze esercitate da q_1, q_2, q_3 su q_0 .

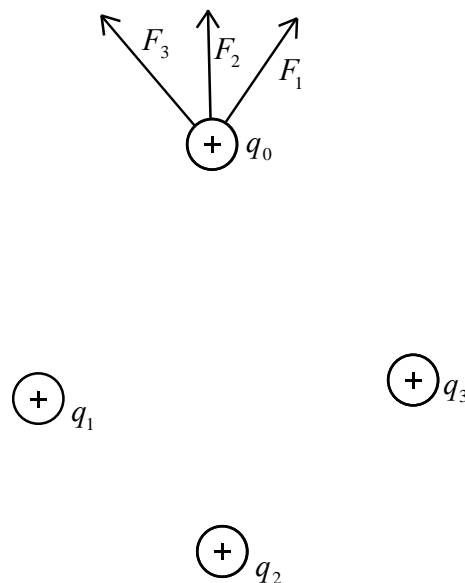


Fig. 2 – Carica di prova q_0 inserita in una sistema di cariche.

1.1.3. Il campo elettrico

Una carica modifica le proprietà dello spazio circostante

Una carica elettrica modifica indubbiamente le proprietà dello spazio a sé circostante. Basti pensare che qualsiasi altra carica posta in questo spazio ne subisce una forza attrattiva o repulsiva a distanza. Potremo calcolare questa forza grazie alla legge di coulomb

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} .$$

Per descrivere le proprietà dello spazio circostante una carica, introduciamo ora una nuova grandezza fisica: il campo elettrico. È fondamentale comprendere a pieno questo concetto perché più in avanti ci aiuterà a capire la causa del movimento delle cariche.

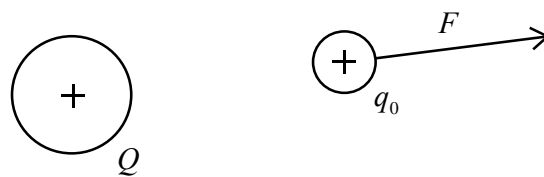


Fig. 3 – Una carica q_0 posta in prossimità di una seconda carica Q subisce una forza \vec{F} .

Definizione di campo elettrico

Se consideriamo il sistema riportato nella Fig. 3, il rapporto tra \vec{F} e q_0 fornisce l'intensità del campo elettrico \vec{E}

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Il campo elettrico è dunque legato alla carica che lo genera, in questo caso Q , e non dipende in nessun caso dalla carica che lo subisce. Bisogna precisare che il valore di q_0 deve essere piccolo rispetto a Q affinché q_0 non perturbi il campo elettrico di Q con il suo.

Nel caso in cui volessimo considerare una situazione più complessa, come quella in Fig. 2, dovremo comunque considerare il rapporto tra la forza agente sulla carica q_0 e la sua quantità di carica, bisognerà pertanto calcolare la somma vettoriale delle forze agenti su q_0 .

Il campo elettrico è dunque "una condizione nello spazio creato dal sistema di cariche puntiformi: questa condizione è descritta dal vettore \vec{E} " (TIPLER, 1991)

Linee di campo

Al fine di rappresentare la direzione del campo elettrico facciamo uso di linee di campo. Esse non sono altro che semplici linee con direzione tangente in ogni luogo alla forza elettrica. Facendo alcune considerazioni sui tipi di carica che Q e q_0 possono avere, possiamo dedurre che il campo elettrico può assumere un verso uguale o opposto al verso della forza elettrica (Fig. 4).

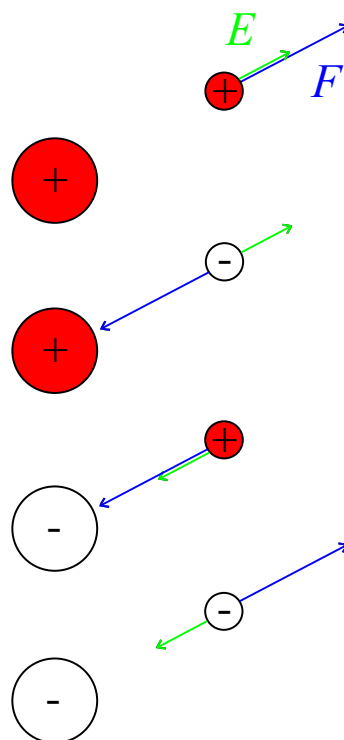


Fig. 4 - Forze e campi elettrici per i diversi tipi di carica che Q e q_0 possono assumere.

Osservando questi schemi è possibile affermare che il campo elettrico generato da una carica Q assume un verso che indica la carica se questa è negativa, o un verso opposto se questa è positiva. Per questo motivo le linee di campo partono dalle cariche positive e giungono sulle cariche negative.

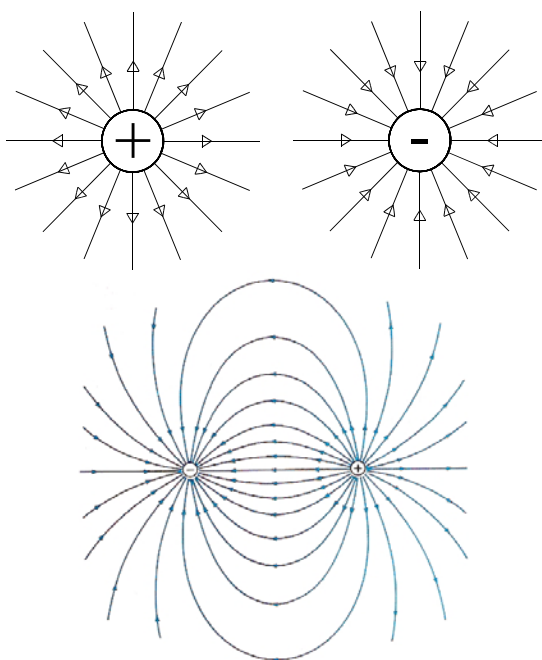


Fig. 5 – Rappresentazione del campo elettrico con linee di campo per una sfera carica positivamente (a sinistra), per una sfera carica negativamente (a destra) e interazione tra i campi elettrici di due cariche di segno opposto (TIPLER, 1991).

1.2. Energia potenziale elettrica e potenziale elettrico

Analogie tra campi elettrici e campi gravitazionali

Proprio come noi siamo soggetti al campo gravitazionale terrestre, le cariche elettriche sono soggette ai campi elettrici; e proprio come definiamo l'energia potenziale gravitazionale possiamo definire l'energia potenziale per le cariche elettriche soggette a campi elettrici. Prendiamo come esempio un bacino idrico posto in quota per elencare le proprietà e le relazioni che per analogia ci aiuteranno a trovare le formule che descrivono l'energia potenziale per le cariche elettriche. Secondo la relazione $m \cdot g \cdot h$, la massa d'acqua che si trova in quota possiede un'energia potenziale maggiore rispetto a quella che si trova a valle. L'acqua discende lungo il fiume trasformando la sua energia potenziale in energia cinetica. La forza di gravità è responsabile della corrente nel fiume. Se volessimo riportare in quota l'acqua, dovremmo investire un'energia pari alla differenza tra l'energia potenziale di quota e quella di valle.

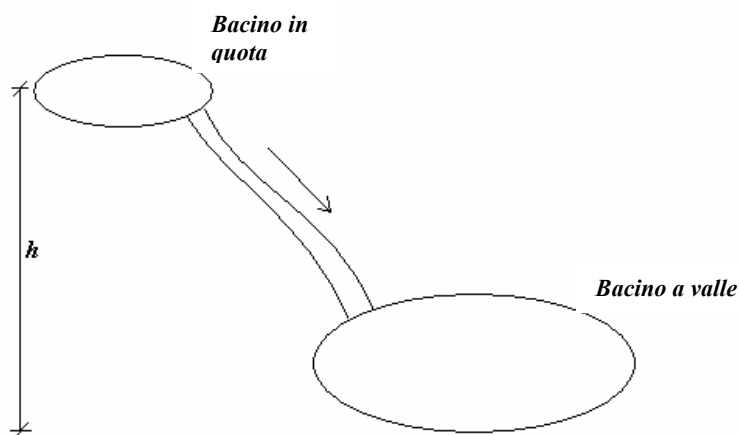


Fig. 6 – L'acqua scorre da monte a valle per effetto della forza di gravità.

Differenza di energia potenziale gravitazionale

Avremo dunque una differenza di energia potenziale tra valle e quota

$$\Delta E_{pot} = L = \int_{x_i}^{x_f} F(x) \cdot dx$$

Se la forza è costante

$$\Delta E_{pot} = L = F \cdot \Delta x = m \cdot g \cdot \Delta x$$

Differenza di energia potenziale elettrica

Allo stesso modo per una carica in un campo elettrico (Fig. 6) avremo una differenza di energia potenziale pari a

$$\Delta U = L = \int_{x_i}^{x_f} F_e(x) \cdot dx$$

Per una forza costante, come avviene in un campo elettrico

$$\Delta U = F_e \cdot \Delta x = q \cdot E \cdot \Delta x$$

Differenza di potenziale elettrico

Potremo allora esprimere la differenza di potenziale elettrico riferita all'unità di carica:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = -E \cdot \Delta x$$

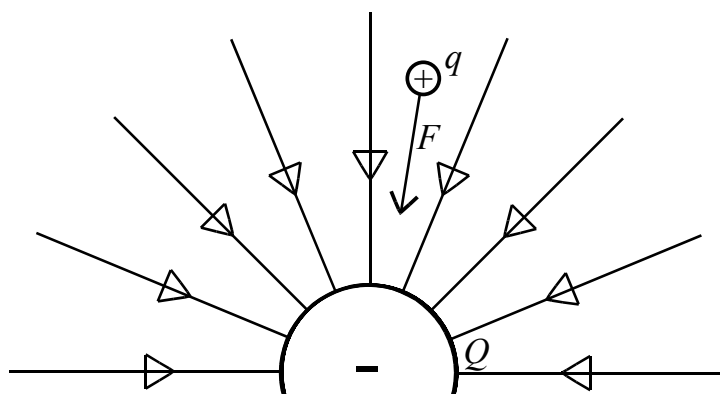


Fig. 7 – Una carica q posta in un campo elettrico generato da Q .

Energia potenziale elettrica e potenziale elettrico

È fondamentale evidenziare la diversità tra la differenza di energia potenziale e la differenza di potenziale elettrico. La differenza di energia potenziale è un'unità di misura di energia ed esprime il lavoro che bisogna compiere per portare l'intera quantità di carica da uno stato iniziale ad uno stato finale, la sua unità di misura è il joule ($1J = 1N \cdot m$). La differenza di potenziale elettrico è anch'essa un'unità di misura dell'energia, ma, a differenza della differenza di energia potenziale, esprime il lavoro che bisogna compiere per portare un'unica unità di carica da uno stato iniziale ad uno stato finale. Si tratta dunque di un "prezzo unitario" per la variazione dello stato della carica, la sua unità di misura è il Volt ($1V = 1\frac{J}{C}$). Nell'analisi dei circuiti elettrici si fa uso della misura del potenziale elettrico. Esso è effettivamente più comodo, dato che la quantità di carica trasportata non è nota a priori, essa dipende infatti dal circuito e dalla quantità di tempo che questo rimane acceso.

1.3. La corrente elettrica

1.3.1. Definizione di corrente elettrica

Il concetto di intensità di corrente elettrica può essere spiegato molto semplicemente con un'analogia. Consideriamo una tubatura in cui scorre dell'acqua ed immaginiamo di effettuare una sezione del tubo, perpendicolare alla direzione di quest'ultimo (Fig. 8).

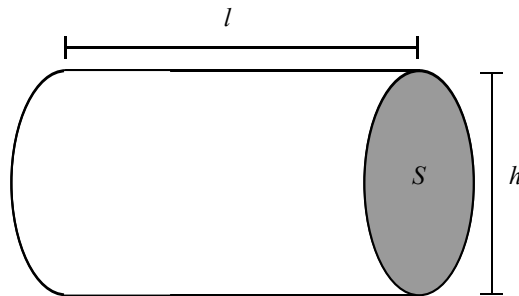


Fig. 8 – Tubatura cilindrica con sezione circolare S in grigio.

Possiamo ora misurare la portata della tubatura calcolando il rapporto tra la quantità d'acqua che passa dalla sezione in un intervallo Δt e Δt stesso. L'intensità di corrente in un materiale è definita esattamente nello stesso modo, ossia la quantità di carica che passa in un punto del materiale in un'unità di tempo.

Definizione di intensità di corrente

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

L'unità di misura dell'intensità di corrente è l'Ampère (A) equivalente a $1C/1s$.

Conduttori ed isolanti

La corrente può scorrere in diversi materiali che si comportano in maniera diversa: alcuni la lasciano passare ostacolandola poco e altri ne proibiscono totalmente il passaggio. I primi vengono detti conduttori mentre i secondi sono chiamati isolanti. Il perché di questa divisione - che non è una divisione netta e precisa dei materiali - va ricercata nella struttura della materia, presentata nel modello atomico proposto da Bohr. In questo modello, l'atomo viene descritto come un nucleo di protoni e i neutroni attorno al quale ruotano elettroni disposti su orbitali ben determinati a differenza delle energie che questi possiedono (Fig. 9). Il numero di protoni e neutroni varia a differenza dell'elemento in questione. Gli elettroni che orbitano attorno al nucleo possono occupare delle cosiddette bande di valenza. A ogni banda di valenza corrisponde un determinato livello di energia. Quando un'elettrone possiede sufficiente energia, questo passa nella banda di conduzione. In questa banda gli elettroni si possono muovere liberamente. Gli elementi conduttori sono quelli che

sull'orbitale più esterno hanno elettroni ai quali basta fornire poca energia affinché essi si spostino nella banda di conduzione.

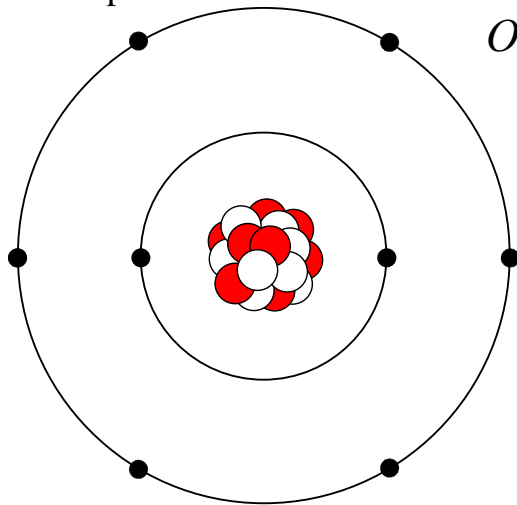


Fig. 9 – Un'atomo di ossigeno (O) rappresentato secondo il modello di Bohr. Il nucleo è composto da protoni (in rosso) e neutroni (in bianco), attorno al nucleo ruotano sugli orbitali gli elettroni (in nero). In quest'immagine non sono rispettate le proporzioni e le distanze tra le particelle subatomiche

Elementi isolanti sono quelli che sull'orbitale esterno hanno elettroni che difficilmente passano nella banda di conduzione.

Essendo la corrente elettrica un moto di cariche (più precisamente nei metalli le cariche in movimento sono gli elettroni), questa è molto facilitata in materiali conduttori in quanto le cariche possono muoversi facilmente.

1.3.2. Legge di Ohm e resistenza

Prendendo in esame un conduttore nel quale circola della corrente elettrica possiamo notare, compiendo le misure appropriate, che da un capo all'altro di questo avviene una caduta di potenziale. Questo significa che una differenza di potenziale è misurabile tra un capo e l'altro del conduttore. Questo fatto è facilmente dimostrabile in laboratorio: applicando diversi voltaggi ai morsetti del generatore si nota che la caduta di potenziale nel conduttore è pari alla differenza di potenziale dei morsetti del generatore (Vedi allegati).

Esperienza: la resistenza

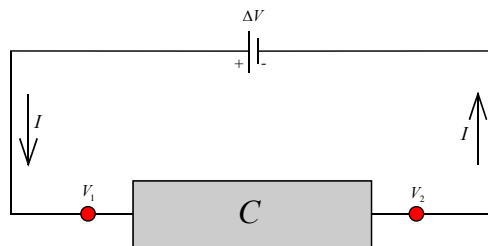


Fig. 10 – Circuito semplice composto da un generatore di corrente e da un conduttore metallico. La corrente scorre nel senso indicato, la differenza tra V_1 e V_2 è uguale alla differenza di potenziale ΔV del generatore.

Compiendo ulteriori misurazioni a diversi voltaggi del generatore possiamo osservare che la corrente nel circuito è proporzionale alla caduta di potenziale nel conduttore.

Definizione di resistenza e legge di Ohm

Corrente elettrica e caduta di potenziale sono legati dalla resistenza del conduttore da una relazione che viene descritta secondo la legge di Ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

dove R è la resistenza, ΔV la caduta di potenziale ai capi del conduttore e I l'intensità di corrente. La resistenza è la misura fisica della capacità di un conduttore di ostacolare la corrente. L'unità di misura della resistenza è l'Ohm ($1\Omega = 1\frac{V}{A}$).

In un circuito semplice (Fig. 10) possiamo quindi regolare la corrente a nostro piacimento conoscendo la differenza di potenziale del generatore e intervenendo sulla resistenza. Ad esempio, ammettiamo una differenza di potenziale di $9V$, desideriamo nel circuito una corrente di $1A$, calcoliamo la resistenza come segue:

$$R = \frac{9V}{1A} = 9\Omega$$

Caduta di potenziale

I resistori

È importante sottolineare che in un circuito semplice, come quello illustrato nella Fig. 10, la caduta di potenziale ai capi del conduttore è sempre pari alla differenza di potenziale dei morsetti del generatore. Utilizzando le diverse proprietà dei materiali, come la resistività e il coefficiente di temperatura di cui tratteremo in seguito, sono stati sviluppati dall'industria diversi tipi di resistori, componenti elettronici che svolgono il compito di resistenza in un circuito (vedi 2.1.). Possiamo trovare resistori di varia resistenza e funzionamento, ad esempio i termoresistori che variano la loro resistenza in funzione della temperatura del componente, resistenze variabili altrimenti chiamate trimmer o potenziometri e i foto resistori regolati dall'intensità luminosa che irradia il componente. Questo elemento è fondamentale nella realizzazione di circuiti perché consente di regolare corrente e caduta di potenziale affinché agli altri componenti non vengano sollecitati oltremodo o inadeguatamente alle esigenze di funzionamento.

1.3.2.1. Resistenze nei circuiti

Quello preso in considerazione sopra è un circuito semplice composto da un generatore e una resistenza. La domanda che possiamo porci è cosa capita in un circuito in cui entrano in gioco più resistenze di differente valore.

Componenti in serie

Per iniziare ad analizzare il problema bisogna porre una premessa. Un qualsiasi componente elettronico può essere inserito in un circuito in serie o in parallelo rispetto ad altri elementi del circuito stesso. I componenti vengono detti in serie se verranno posizionati nel circuito come in Fig. 11.



Fig. 11 – Due resistenze R_1 e R_2 in serie.

I componenti in serie sono sottoposti tutti alla stessa corrente.

Componenti in parallelo

Al contrario vengono definiti in parallelo se vengono posti come nella Fig. 12.

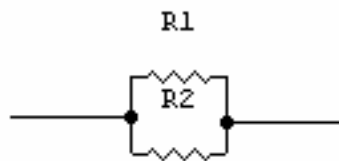


Fig. 12 – Due resistenze R_1 e R_2 in parallelo

I componenti in parallelo hanno tutti la stessa differenza di potenziale ai loro capi.

Fatta questa premessa possiamo analizzare il primo caso che ci si presenta, ossia circuito con più resistenze in serie

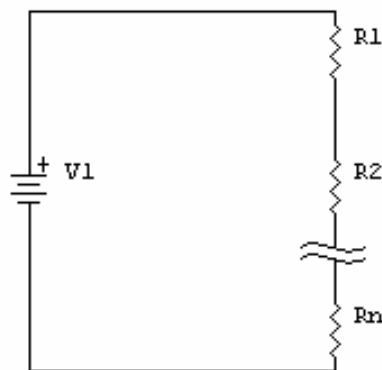


Fig. 13 – Circuito con più resistenze in serie.

Resistenze in serie

Prendiamo in considerazione circuito con n resistenze in serie. Per poter calcolare i valori che ci interessano con la legge Ohm possiamo immaginare che questa serie di resistenze come un'unica resistenza R_e detta anche resistenza equivalente. La resistenza equivalente R_e nel caso di resistenze in serie si calcola sommando i valori delle varie resistenze:

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Resistenze in parallelo

A questo punto è facile gestire il problema con la relazione $U = R \cdot I$ della legge di Ohm per calcolare qualsiasi valore ci sia utile. Nel caso delle resistenze in parallelo si procede allo stesso modo, cambia solo il modo di calcolare la resistenza equivalente:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

1.3.4. I principi di Kirchhoff

Con i concetti espressi nel paragrafo precedente siamo ora in grado di calcolare l'andamento della corrente in un circuito semplice. Per studiare circuiti più complessi, queste semplici regole non sono sufficienti per questo ci vengono in aiuto i due principi di Kirchhoff:

Principio delle maglie

- In un circuito chiuso (maglia) la somma degli aumenti di potenziale è equivalente alla somma delle cadute di potenziale.

Principio dei nodi

- In ogni punto del circuito in cui la corrente possa dividersi (nodo) la somma delle correnti in entrata è equivalente alla somma delle correnti in uscita.

1.3.4.1. Esempi pratici

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Esempio 1

Si consideri il circuito dell'esempio 1. Calcoliamo il valore della corrente, il senso di circolazione e R2.

Sapendo che la somma degli aumenti di potenziale equivale alla somma delle cadute di potenziale scriviamo la seguente equazione, supponendo che la corrente circoli in senso orario.

$$9V = 5\Omega \cdot I + 3V + 15\Omega \cdot I + 12V + 9\Omega \cdot I$$

Risolvendo rispetto a I si ha:

$$I = \frac{-6V}{29\Omega} \cong -0,206A$$

Il segno negativo significa che il senso della corrente è inverso rispetto a quello supposto, dunque la corrente circola in senso antiorario.

Per calcolare R2 basta applicare la legge di Ohm:

$$R2 = \frac{U2}{I} = \frac{3V}{0,206A} = 2,794\Omega$$

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Esempio 2

Calcoliamo ora il valore della corrente nel circuito dell'esempio 2.

Secondo il principio di Kirchhoff dei nodi, la somma delle correnti I_1 , I_2 e I_3 corrisponde all'intensità di corrente I , dunque:

$$\begin{aligned}I_1 + I_2 + I_3 &= I \\ \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} &= I \\ \frac{6V}{3\Omega} + \frac{6V}{5\Omega} + \frac{6V}{12\Omega} &= I \\ I &= 3,7A\end{aligned}$$

1.3.5. Potenza elettrica

Definizione di potenza La potenza è per definizione il lavoro compiuto in un'unità di tempo. Se volessimo calcolare la potenza di un certo tratto di circuito, ad esempio di un generatore, dovremmo calcolare la differenza di potenziale tra i suoi poli - che, ricordiamo, è equivalente al lavoro compiuto dal generatore su un'unità di carica - e poi moltiplicarla per l'intensità di corrente, ossia la quantità di carica che subisce il lavoro in un dato intervallo di tempo.

Potenza elettrica

Quindi:

$$P = \Delta V \cdot I = \frac{U}{Q} \cdot \frac{Q}{\Delta t} = \frac{U}{\Delta t}$$

L'unità di misura della potenza è il Watt ($1W = 1V \cdot \frac{C}{s} = \frac{J}{C} \cdot \frac{C}{s} = \frac{J}{s}$).

Lavoro

Se moltiplichiamo P per un intervallo di tempo Δt otteniamo il lavoro che il tratto di circuito da noi esaminato esegue nell'intervallo di tempo.

$$W = \Delta V \cdot I \cdot t = P \cdot t$$

1.3.6. Corrente alternata

Definizione La corrente alternata è una corrente il cui valore varia nel tempo in maniera che questa scorra prima in una direzione e successivamente nell'altra in un periodo determinato. Le definizioni di intensità di corrente, differenza o caduta di potenziale e di potenza rimangono valide, ma varia sostanzialmente il modo in cui queste grandezze fisiche vengono espresse. Infatti, essendo delle grandezze che variano nel tempo, verranno espresse grazie a delle funzioni o a dei valori medi. Per semplificare tratteremo la corrente alternata come se il suo andamento fosse sinusoidale. Sappiamo però che nella realtà è raro trovarsi a confronto con un segnale puro come quello che esamineremo; infatti, in molti altri casi la corrente segue andamenti a onda quadrata, a dente di sega o addirittura irregolari come quello illustrato in Fig. 14.

Diversi tipi di corrente alternata

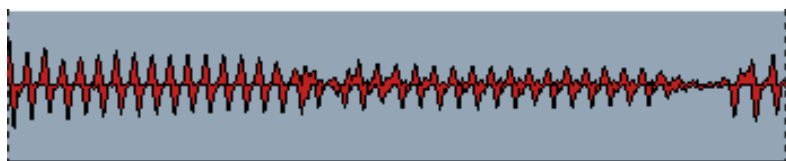


Fig. 14 – Onda sonora di una chitarra elettrica rappresentata graficamente.

Teorema di Fourier

L'onda rappresentata nella Fig. 14 è il segnale di una chitarra elettrica registrato e rappresentato graficamente. Notiamo che il suo segnale è alternato ma irregolare. In questo caso potremo pensare a questa onda come alla somma di onde sinusoidali a periodi definiti con diverse ampiezze. Possiamo fare questo grazie al teorema di Fourier, il quale ci assicura che qualsiasi segnale può essere descritto come la somma di onde sinusoidali di frequenza particolare.

1.3.6.1. Corrente

Per esprimere il valore della corrente in funzione del tempo utilizzeremo:

$$I(t) = I_{MAX} \cdot \sin \omega t$$

Per fare ciò abbiamo utilizzato un altro sistema per esprimere la grandezza che è quello dell'intensità di picco massimo di corrente I_{max} . Possiamo anche usare l'intensità di corrente media:

$$I_{Media} = \frac{1}{2} \cdot I_{MAX}$$

oppure il valore efficace

$$I_{Eff} = \sqrt{(I^2)_{Medio}} = \sqrt{\frac{1}{2} I^2_{MAX}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_{MAX}$$

1.3.6.2. Potenziale elettrico

Lo stesso vale per le differenza di potenziale:

$$\Delta V(t) = \Delta V_{MAX} \cdot \sin \omega t$$

$$\Delta V_{Medio} = \frac{1}{2} \cdot \Delta V_{MAX}$$

$$\Delta V_{Eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \Delta V_{MAX}$$

1.3.6.3. Legge di Ohm

Considerando una corrente alternata sinusoidale, calcoleremo il valore della resistenza secondo la legge di Ohm come segue:

$$R = \frac{\Delta V(t)}{I(t)} = \frac{\Delta V_{MAX}}{I_{MAX}} = \frac{\Delta V_{Eff}}{I_{Eff}}$$

1.3.6.4. Potenza elettrica

Anche la potenza può essere espressa in funzione del tempo:

$$P(t) = I_{MAX} \cdot \sin \omega t \cdot \Delta V_{MAX} \cdot \sin \omega t = I_{MAX} \cdot \Delta V_{MAX} \cdot \sin^2 \omega t$$

oppure come potenza media

$$P_{Media} = \frac{1}{2} I_{MAX} \cdot \Delta V_{MAX} = I_{Eff} \cdot \Delta V_{Eff}$$

1.4. Magnetismo

1.4.1. I magneti

Come ben sappiamo vi sono alcuni materiali che sono in grado di attrarre il ferro e le sue leghe. Molto spesso chiamiamo questi materiali calamite o magneti.

Magneti naturali e magneti artificiali

I magneti possono essere di tipo naturale, cioè composti da materiali con caratteristiche magnetiche fisse, oppure artificiali, ovvero ottenuti tramite determinati processi di magnetizzazione. I magneti artificiali si suddividono in due gruppi: i permanenti, che una volta magnetizzati conservano permanentemente le caratteristiche magnetiche, e i temporanei, i quali perdono le loro proprietà magnetiche al termine del processo che li rende magneticamente attivi. Tra questi ultimi possiamo ritrovare gli elettromagneti, speciali magneti artificiali che vengono magnetizzati grazie a una corrente elettrica.

Per un magnete due poli

Ogni magnete possiede due poli: nord e sud, così chiamati perché in caso di libertà di movimento questi poli si dispongono in direzione dei corrispettivi poli geografici della terra. Ogni polo viene attratto dal suo opposto e respinto dal suo simile (Fig. 15)

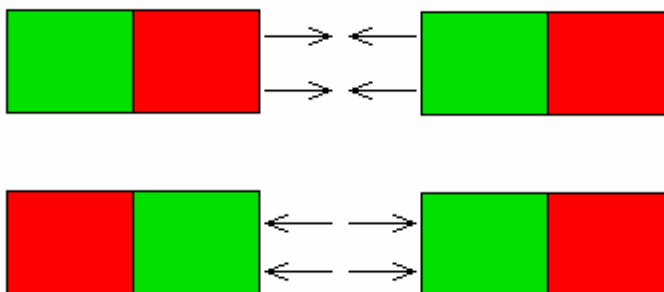


Fig. 15 – Rappresentazione schematica dell'interazione fra magneti: i poli opposti si attraggono mentre i poli uguali si respingono.

Un'interessante proprietà dei magneti permanenti ci fa intuire come possa essere costituito un magnete: se prendiamo un magnete permanente e lo spezziamo in due parti ognuna di queste due parti sarà anch'essa un magnete con i suoi corrispettivi poli, ripetendo tale processo diverse volte otteniamo sempre dei magneti via via più piccoli. Da ciò possiamo dedurre che ogni singolo atomo del magnete si comporti proprio come un magnete.

Forza magnetica

Si diceva sopra dell'attrazione tra due magneti; possiamo affermare che, se tra due corpi c'è attrazione o repulsione tra questi intercorre una forza, che in questo caso definiremo magnetica.

1.4.2. Il campo magnetico

Una carica in movimento genera un campo magnetico

Come nel caso del campo elettrico, vogliamo descrivere le proprietà dello spazio circostante ad un elemento con caratteristiche magnetiche. Questa proprietà è detta campo magnetico. Per descrivere il campo magnetico dobbiamo ricorrere ad un principio fondamentale dell'elettromagnetismo che è il seguente: ogni carica in movimento, come una corrente elettrica in un conduttore, genera un campo magnetico. Necessitiamo di questo principio proprio perché, come il campo elettrico attrae (o respinge) solo le cariche elettriche, il campo magnetico attrae o respinge altri oggetti magnetici, abbiamo perciò bisogno di un corpo sufficientemente piccolo che possieda un campo magnetico da introdurre nel campo magnetico che vogliamo definire, questo corpo consiste in una piccola carica q in movimento ad una velocità \vec{v} .

Definizione di campo magnetico

Il campo magnetico è dunque definito dalla seguente formula:

$$\vec{F}_B = |q| * \vec{v} \times \vec{B}$$

la quale ci suggerisce che la forza \vec{F}_B che agisce su una carica in moto in un campo magnetico è sempre perpendicolare sia alla direzione della velocità, sia al campo magnetico \vec{B} .

L'unità di misura del campo magnetico è il Tesla ($1 \cdot T = 1 \cdot \frac{N/C}{m/s} = \frac{N}{A \cdot m}$)

1.4.3. Il flusso magnetico

Il flusso magnetico è definito come il prodotto tra campo magnetico e l'area su cui questo agisce. Ovviamente si tiene conto della componente di B perpendicolare all'area.

$$\phi_m = B_{\perp} \cdot A$$

L'unità di misura del flusso magnetico è il Weber ($1 \cdot Wb = 1 \cdot T \cdot m^2$)

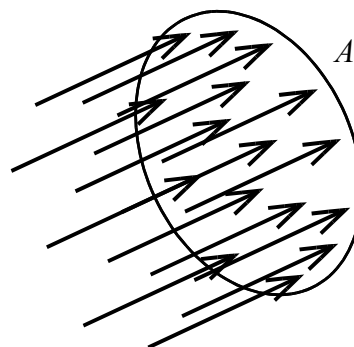


Fig. 16 – Campo magnetico che agisce sulla superficie A perpendicolarmente

1.4.4. La legge di Faraday-Neumann e l'induzione elettromagnetica

Enunciazione

Questa legge afferma che variando il flusso magnetico nel tempo è possibile generare una forza elettromotrice in un circuito. Gli esperimenti sono facilmente riproducibili.

Esperimento: forza elettromotrice indotta

Prendiamo del filo di ferro come conduttore e applichiamo ai suoi capi un amperometro. Facciamo in modo che in un punto del circuito il conduttore crei una spira, cioè un circuito chiuso (Fig. 17)

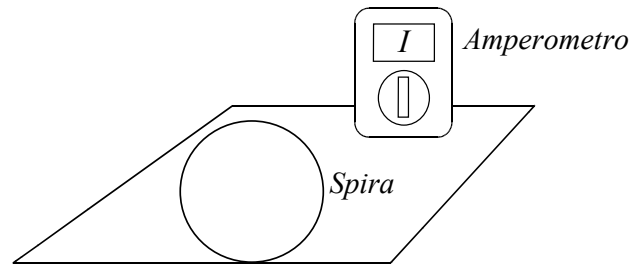


Fig. 17 – Circuito sperimentale: il conduttore si avvolge in una spira, la corrente nel circuito viene misurata grazie ad un amperometro

Avremo dunque un flusso magnetico pari al prodotto dell'area della spira con il campo magnetico.

Muovendo il magnete all'interno della spira variamo l'intensità del flusso magnetico e ci accorgiamo, grazie all'amperometro, che vi è una corrente nel circuito. Se c'è presenza di corrente sicuramente ai capi del conduttore è presente una differenza di potenziale ε quantificabile come segue:

Definizione della forza elettromotrice indotta

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi(t)}{dt}$$

La forza elettromotrice che viene generata, che non è altro che una differenza di potenziale, è misurabile ai capi del conduttore; è così dimostrato che a una variazione di flusso magnetico corrisponde appunto una forza elettromotrice indotta, che secondo, l'enunciato della legge, "ha un verso tale da opporsi alla variazione che la produce" (TIPLER, 1991)

1.5. I tubi a vuoto

1.5.1. L'effetto termoionico

I tubi a vuoto, altrimenti conosciuti come valvole termoioniche, funzionano sulla base appunto dell'effetto termoionico. Si constata sperimentalmente che se un oggetto viene riscaldato emette elettroni; ciò avviene perché le molecole che compongono l'oggetto acquistano energia cinetica secondo la nota relazione

$$\overline{E_{cin}} = \frac{3}{2} k_B T$$

che esprime l'energia cinetica media delle particelle in relazione alla temperatura. Anche gli elettroni liberi presenti nell'oggetto aumentano la loro energia cinetica e quelli vicini alla superficie dell'oggetto si staccheranno dallo stesso. Perdendo elettroni, il corpo si caricherà positivamente, questa carica fa sì che gli elettroni distaccatisi ritornino nell'oggetto per attrazione elettrica. Se l'oggetto riscaldato è un conduttore, la quantità di elettroni emessa sarà maggiore.

1.6. I semiconduttori

1.6.1. I semiconduttori

Le proprietà dei semiconduttori I semiconduttori sono dei materiali che fanno da conduttori in alcuni casi e da isolanti in altri. La loro capacità di condurre correnti elettriche è controllabile per via elettrica. Tra i semiconduttori più noti troviamo il germanio ed il silicio. Tutt'e due questi materiali appartengono al IV gruppo della tavola periodica degli elementi ed hanno quindi valenza quattro. Ciò significa che sull'orbitale esterno presentano quattro elettroni di valenza, che possono cioè formare dei legami covalenti con altre molecole.

Se prendiamo un cristallo per esempio di silicio e ci immaginiamo di poter indagare nella struttura atomica della materia, potremmo figurarci l'immagine di tanti nuclei di atomi di silicio disposti ordinatamente e legati tra loro da legami covalenti formati dai loro elettroni più esterni.

Gli elettroni che formano questi legami passano nella banda di conduzione con un minimo apporto d'energia e quindi, già a temperatura ambiente, possiamo supporre che i legami si rompano. Avremo dunque un moto disordinato di cariche. Se poniamo però una differenza di potenziale tra un capo e l'altro del cristallo, queste cariche si muoveranno ordinatamente agevolando così il passaggio di corrente.

Il fatto stesso che i semiconduttori siano influenzati nel loro funzionamento da fattori termici costituisce un difetto di questa tecnologia.

1.6.2. I semiconduttori drogati

Possiamo introdurre delle sostanze dette impurità all'interno del cristallo per renderlo in maggior parte composto da lacune (cariche positive) o da elettroni (cariche negative).

1.6.2.1. Tipo P

Se introduciamo nel cristallo delle sostanze appartenenti al III gruppo della tabella periodica degli elementi e quindi con valenza tre, questi si legheranno con gli atomi di silicio. Tuttavia queste sostanze sono in grado di formare solo tre legami e non quattro, per questo motivo il cristallo sarà ora composto da lacune in prevalenza ed elettroni in minoranza.

Per la prevalenza di cariche positive questo tipo di semiconduttore viene definito di tipo P.

Fig. 18 – Drogaggio di un semiconduttore mediante impurità trivalenti (BOSSI-SESTO, 2002)

1.6.2.2. Tipo N

Se al contrario iniettiamo nel cristallo impurità di tipo pentavalente, appartenenti dunque al V gruppo, queste soddisferanno tutti e quattro i legami richiesti dagli atomi di silicio ed avranno un elettrone in avanzo. Avremo dunque una struttura cristallina formata in prevalenza da elettroni.

Per la prevalenza di cariche negative questo tipo di semiconduttore viene definito di tipo N.

Fig. 19 - Drogaggio di un semiconduttore mediante impurità pentavalenti (BOSSI-SESTO, 2002)

1.6.3. Giunzioni PN

La zona di svuotamento

Ponendo a contatto due cristalli di tipo diverso, uno P e l'altro N, otterremo un elemento dalle interessanti caratteristiche elettriche. Dal momento della giunzione delle due zone ha inizio un processo detto di diffusione: gli elettroni in eccesso nella zona N vanno a combinarsi con le lacune nella zona P. questo processo crea una zona definita di svuotamento che contiene da una parte ioni negativi e, dall'altra, ioni positivi (Fig. 20). La formazione di questi ioni è dovuta alla cessione degli elettroni da parte degli atomi pentavalenti in favore degli atomi tetraivalenti.

Tuttavia non l'intero numero di elettroni in eccesso della zona N si sposta nella zona P, infatti con la creazione della zona di svuotamento, si forma pure una differenza di potenziale tra la zona P e la zona N che frena il passaggio di elettroni. Questa differenza di potenziale ha un valore tipico per ogni tipo di semiconduttore.

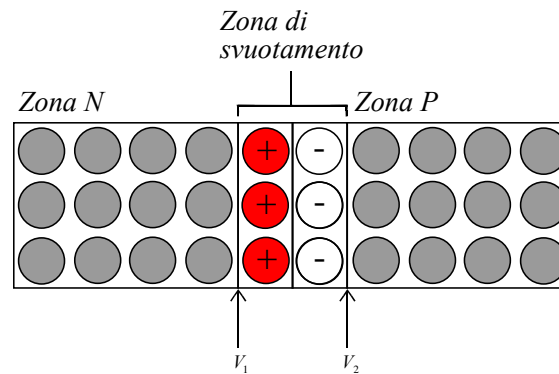


Fig. 20 – Rappresentazione schematica di una giunzione PN. Nella zona di svuotamento vediamo gli ioni positivi (in rosso) e negativi (in bianco) mentre nella zona P e nella zona N troviamo gli atomi neutri (in grigio). V_1 è maggiore di V_2 .

Questa conformazione è assai interessante in quanto base tecnica per la creazione di diodi a semiconduttori e transistor.

1.6.3.1. Giunzioni simmetriche

Viene definita simmetrica una giunzione PN le cui zone hanno la stessa concentrazione di cariche elettriche (lacune ed elettroni liberi).

1.6.3.2. Giunzioni asimmetriche

Una giunzione PN viene detta asimmetrica se la concentrazione di cariche nelle due zone non è uguale, ovvero se in una zona è maggiore che nell'altra.

1.6.4. Polarizzazione delle giunzioni PN

“Per polarizzazione di una giunzione si intende l'applicazione di una differenza di potenziale tra la zona P e la zona N per il controllo della conduzione” (BOSSI, SESTO, 2002).

Sappiamo di fatto che una giunzione possiede una zona di svuotamento che impedisce il flusso di elettroni e dunque di corrente. Siamo però in grado di regolare l'ampiezza di questa zona di svuotamento applicando una differenza di potenziale ai capi della giunzione (Fig. 21).

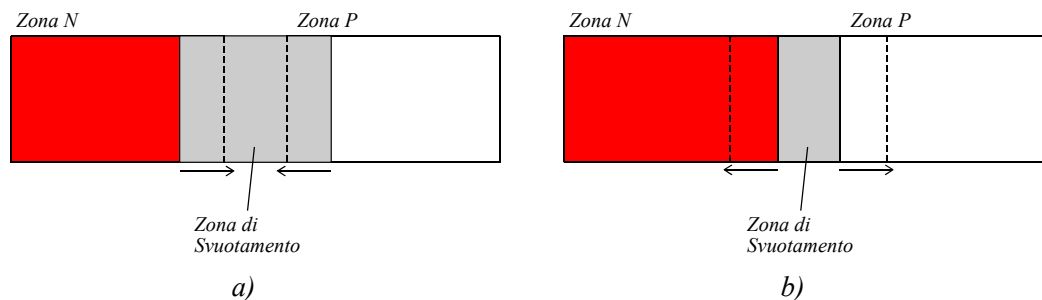


Fig. 21 – È possibile modificare le proprietà di conduzione elettrica delle giunzioni PN applicando una differenza di potenziale ai capi della stessa. È possibile restringere la zona di svuotamento (a) o è possibile allargarla (b).

1.6.4.1. Polarizzazione diretta

Il caso della figura 21a), ovvero il restringimento della zona di svuotamento, si ottiene con una polarizzazione diretta della giunzione. Per polarizzazione diretta si intende il porre a potenziale positivo la zona P e a potenziale negativo la zona N, in modo da neutralizzare gli ioni nella zona di svuotamento. Così facendo, gli elettroni della zona P si sposteranno verso il polo positivo del generatore, rompendo, ad una certa differenza di potenziale, i legami ionici degli ioni negativi, lo stesso processo avviene nella zona N ma in modo inverso: il generatore fornisce elettroni alla zona N in modo che gli ioni positivi vengano resi neutri. Se la differenza di potenziale è maggiore o uguale alla differenza di potenziale della zona di svuotamento, allora quest'ultima viene completamente neutralizzata; se invece è minore, la zona di svuotamento viene parzialmente neutralizzata e rimane dunque ostacolo per la corrente.

1.6.4.2. Polarizzazione inversa

Polarizzando inversamente la giunzione otterremo la situazione illustrata nella figura 21b). Ponendo la zona P a potenziale negativo e la zona N a potenziale positivo favoriremo la creazione di nuovi ioni nella zona di svuotamento secondo un processo inverso a quello descritto sopra e perciò l'allargamento della stessa.

2. Componenti elettronici

2.1. Il resistore

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 22 – Assortimento di resistenze, potenziometri e trimmer.

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 23 – Simboli schematici delle resistenze (a sinistra) e delle resistenze variabili (a destra).

2.1.1. La resistenza: principio

Il principio che spiega perché qualsiasi conduttore oppone una resistenza alla corrente elettrica è molto semplice. La materia è costituita da atomi; la corrente elettrica in un conduttore è un flusso di elettroni. Il campo elettrico degli elettroni in movimento interagisce con il campo elettrico degli atomi, in modo da trasferire parte della loro energia cinetica agli atomi del conduttore che aumenta così la sua temperatura. Questo effetto viene chiamato effetto di Joule. Il flusso di elettroni viene quindi ostacolato dal conduttore in misura maggiore o minore secondo i seguenti criteri:

I fattori che determinano la resistenza di un conduttore

- la resistenza aumenta all'aumentare della lunghezza del conduttore
- la resistenza aumenta se la sezione del conduttore diminuisce
- la resistenza dipende dal materiale che compone il conduttore

Algebricamente possiamo scrivere:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Dove l [m] indica la lunghezza del conduttore, S [mm²] la sua sezione e ρ [mm²/m] la resistività del materiale.

La resistività

La resistività è una caratteristica della materia. È intesa come la resistenza del conduttore costituito da un materiale di dimensioni unitarie e cambia al variare della temperatura. Mentre nei metalli l'aumento della temperatura comporta un aumento della resistività, negli altri materiali l'aumento della temperatura porta a una diminuzione della resistività. Negli isolanti l'aumento non porta a una diminuzione della resistività se non per sostanziali aumenti di temperatura, al seguito dei quali gli isolanti perdono la loro principale proprietà.

2.1.2. L'influenza della temperatura sulla resistenza di un conduttore

Il coefficiente di temperatura α

L'influenza della temperatura sulla resistività varia da materiale a materiale. Tale variazione viene descritta con il coefficiente di temperatura α .

La variazione della resistività in funzione della temperatura è sintetizzata nella seguente relazione:

$$\rho_1 = \rho_0 [1 + \alpha_0 (\theta_1 - \theta_0)]$$

dove ρ_1 indica la resistività alla temperatura θ_1 , ρ_0 la resistività a temperatura θ_0 e α_0 rappresenta il coefficiente di temperatura.

È necessario precisare che questo coefficiente di temperatura α varia anch'esso in funzione della temperatura. I coefficienti corrispondenti ai vari materiali e alle varie temperature possono essere consultati in tabelle simili a quella riportata sotto (Tabella 1).

Il discorso inerente le variazioni della resistività legate alla temperatura si estende semplicemente alla resistenza in quanto le due grandezze sono legate da proporzionalità diretta.

La relazione può dunque essere espressa come segue:

$$R_1 = R_0 [1 + \alpha_0 (\theta_1 - \theta_0)]$$

Temperatura di riferimento 0 [°C]			
	Materiale	Resistività elettrica r_0 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	Coefficiente di temperatura a_0 [$1/^\circ\text{C}$]
Buoni conduttori	Argento	0,015	$4 \cdot 10^{-3}$
	Rame	0,016	$4,2 \cdot 10^{-3}$
	Oro	0,021	$3,9 \cdot 10^{-3}$
	Alluminio	0,026	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Conduttori	Tungsteno (Wolframio)	0,05	$4,5 \cdot 10^{-3}$
	Stagno	0,115	$4,3 \cdot 10^{-3}$
	Ferro dolce	0,13	$4,8 \cdot 10^{-3}$
	Piombo	0,2	$4,2 \cdot 10^{-3}$
	Manganina (Cu, Mn, Ni)	0,4	$0,01 \cdot 10^{-3}$
	Costantina (Cu, Ni)	0,5	~ 0
	Ferro-Nichel	0,85	$0,6 \cdot 10^{-3}$
	Mercurio	0,951	$0,9 \cdot 10^{-3}$
Semiconduttori	Carbone	30	negativo
	Germanio purissimo	$5 \cdot 10^5$	negativo
	Silicio purissimo	$25 \cdot 10^8$	negativo
Isolanti	Olio minerale	$\sim 1 \cdot 10^{17}$	
	Porcellana	$\sim 1 \cdot 10^{18}$	
	Mica	$\sim 1 \cdot 10^{20}$	
	Polistirolo	$\sim 1 \cdot 10^{22}$	

Tabella 1 – resistività elettrica e coefficiente di temperatura di alcuni materiali (<http://web.infinito.it/utenti/e/egidiorezzaghi/IAELETTT/TERZA/RETIEL/RETIEL32.HTM>)

2.2. Il condensatore

QuickTime™ and a
TIFF (Non compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 24 - Condensatore elettrolitico e condensatore a placche.

QuickTime™ and a
TIFF (Non compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 25 - Simboli di rappresentazione schematica di un condensatore elettrolitico e di un condensatore a placche.

2.2.1. Il condensatore: principio

Processo di carica

Il condensatore è un elemento fondamentale per l'elettronica. Questo componente si basa sull'interazione tra due campi elettrici. Se poniamo due lastre di conduttore (armature) separate da uno spazio tra loro ed attacchiamo ognuna di queste ad un morsetto di un generatore (Fig. 26), possiamo osservare che questo preleverà le cariche dall'armatura a polo positivo per portarle su quella a polo negativo.

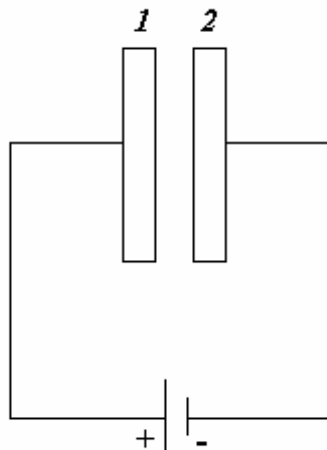


Fig. 26 – Due armature poste a distanza e collegate ad un generatore.

Si creerà dunque questa situazione: l'armatura 1 sarà carica positivamente, l'armatura 2 sarà carica negativamente (Fig. 27), tra le due armature ci sarà una differenza di potenziale.

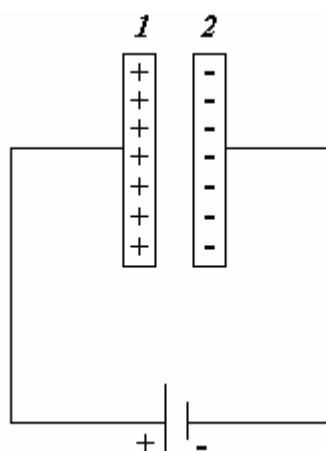


Fig. 27 – Le armature si caricano l'una positivamente (1) e l'altra negativamente (2).

Questo viene detto processo di carica del condensatore. È importante sottolineare che questo processo non è lineare. Infatti, intensità di corrente e differenza di potenziale ai poli del condensatore variano in funzione del tempo. Spiegheremo i dettagli di questo fenomeno più avanti con un esperimento.

Conservazione della carica

Dal momento che il condensatore è carico possiamo staccare il generatore lasciando il circuito aperto (le due armature non sono collegate tra loro) e verificare che le due armature mantengono la loro carica. Questo avviene grazie al campo elettrico. Le cariche sull'armatura 2 sono attratte dalle cariche opposte sulla prima armatura ma queste vengono mantenute separate dallo spazio tra le due armature (dielettrico).

Processo di scarica

Insomma le cariche sulle due armature si attraggono a vicenda. Per questo motivo le armature mantengono le loro cariche. Collegando le due armature assisteremo ad un fenomeno di scarica, inverso a quello di carica, in cui le cariche opposte potranno ricongiungersi creando così una corrente nel circuito e riportando il sistema in equilibrio.

2.2.2. Capacità

Esaminiamo più a fondo gli aspetti del procedimento di carica e di scarica di un condensatore. Da dati sperimentali (vedi allegati) possiamo vedere che il condensatore è completamente carico, e dunque non circola più corrente, solo quando il voltaggio dei due poli raggiunge un valore uguale a quello della differenza di potenziale ai morsetti del generatore. Dal grafico (vedi allegati) notiamo che la crescita del voltaggio ai capi del condensatore non è lineare.

Possiamo attribuire l'aumento della differenza di potenziale allo spostamento delle cariche da un'armatura del condensatore all'altra, che aumenta il campo elettrico tra le due armature. L'aumento della differenza di potenziale e la quantità di carica spostata sono quindi direttamente proporzionali. Infatti, il rapporto tra carica spostata (Q) e corrispondente differenza di potenziale (V) ci fornisce una costante tipica del condensatore, ovvero la capacità

$$C = \frac{Q}{V}$$

“La capacità è l'attitudine a immagazzinare carica per una data differenza di potenziale” (TIPLER, 1991) ed esprime che quantità di carica si può spostare in base alla differenza di potenziale applicata.

L'unità di misura della capacità è il Farad (F) ($1F = 1 \cdot \frac{C}{V}$)

2.2.3. Il condensatore in corrente continua ed alternata

2.2.3.1. Corrente continua

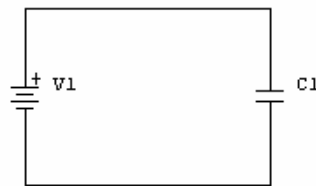


Fig. 28 – Circuito semplice composto da un generatore ed un condensatore.

Se osserviamo un circuito composto da un generatore ed un condensatore, notiamo che, se il generatore è a corrente continua, la corrente nel circuito diminuisce fino a diventare nulla al termine del processo di carica. Possiamo dunque presumere che per un condensatore a bassissima capacità si abbia una presenza praticamente nulla di corrente nel circuito. Questa caratteristica torna utile per uno dei maggiori utilizzi di questo componente, ossia quello di bloccare la corrente continua ad esempio in alcuni rami di circuito.

Il condensatore blocca la corrente continua

2.2.3.2. Corrente alternata: reattanza capacitiva

Il condensatore non blocca la corrente alternata Se, al contrario, il generatore fornisce corrente alternata (Fig. 29) notiamo che la corrente è sempre presente. Questo avviene perché alternandosi la differenza di potenziale ai capi del generatore assistiamo a continui processi di carica e di scarica alternati tra loro. Possiamo intuire che per una data frequenza di corrente un

condensatore con tempo di carica inferiore al semiperiodo della variazione di corrente ostacoli il fluire della corrente alternata seppur non bloccandola. Questo avviene in quanto nel periodo di carica il condensatore si carica completamente bloccando la corrente fino al processo di scarica successivo. Dunque, a parità di capacità, maggiore è la frequenza, minore è la resistenza del condensatore; a parità di frequenza, maggiore la capacità, minore è la resistenza. Cerchiamo ora una relazione matematica per esprimere il valore di questa resistenza.

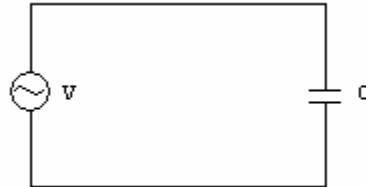


Fig. 29 – Circuito semplice, composto da un generatore di corrente alternata e da un condensatore.

Sapendo che la caduta di potenziale ai capi di un condensatore è:

$$V = \frac{Q}{C}$$

e sapendo che il variare della caduta di potenziale in funzione del tempo è:

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C} = V_{MAX} \cdot \sin \omega t$$

ovvero

$$Q(t) = V_{MAX} \cdot C \cdot \sin \omega t$$

per ricavare la variazione della corrente in funzione del tempo facciamo ricorso ad una analogia con l'oscillatore armonico dove abbiamo

$$x = A \cdot \cos \omega t$$

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = -\omega \cdot A \cdot \sin \omega t = -v_0 \cdot \sin \omega t$$

e quindi avremo

$$I(t) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \omega \cdot V_{MAX} \cdot C \cdot \cos \omega t = I_{MAX} \cdot \cos \omega t$$

Essendo per $I(t) = I_{max}$ il valore $\cos \omega t = 1$, si ottiene:

$$I_{MAX} = \omega \cdot V_{MAX} \cdot C$$

Da questa equazione possiamo ricavarne un'altra molto simile alla legge di Ohm che mette in relazione intensità di corrente e caduta di potenziale:

$$I_{MAX} = \omega \cdot V_{MAX} \cdot C = \frac{V_{MAX}}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = \frac{V_{MAX}}{X_c}$$

Analogamente, per il valore efficace:

$$I_{eff} = \frac{V_{eff}}{X_c}$$

Reattanza capacitiva

Il valore X_c è detto reattanza capacitiva e dipende dalla frequenza della corrente e dalla capacità; possiamo notare che maggiori sono queste grandezze minore è la reattanza capacitiva, come detto sopra. Qua sotto possiamo vedere un grafico (Fig. 30) che ci mostra il comportamento della reattanza capacitiva al variare della frequenza per un condensatore di capacità nota.

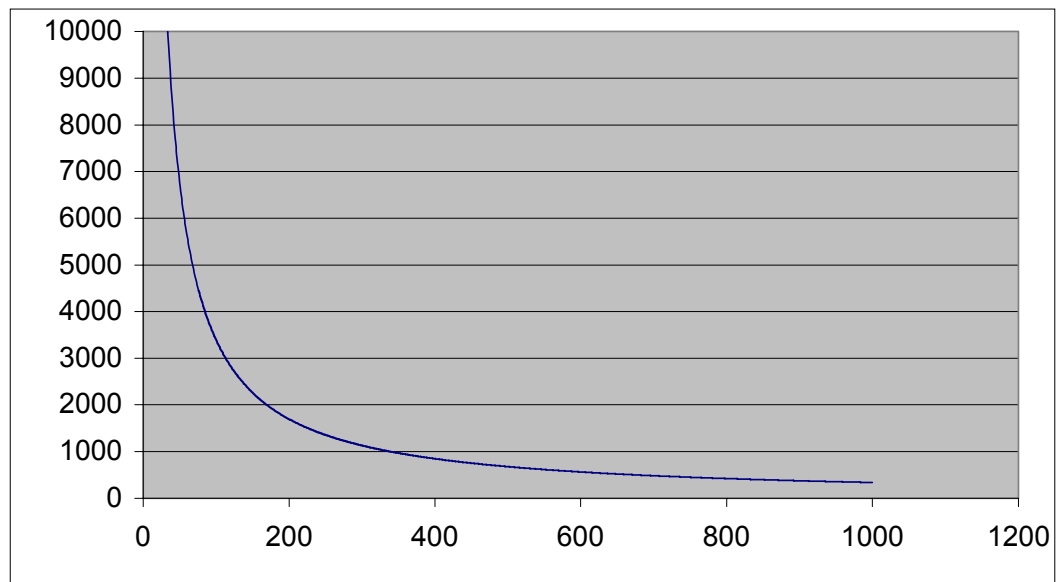


Fig. 30 – Andamento della reattanza capacitiva in funzione della frequenza per un condensatore di 470 nF. A basse frequenze corrispondono alti valori di reattanza.

2.3. La bobina

QuickTime™ and a
TIFF (Non compress) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 31 - Bobina

QuickTime™ and a
TIFF (Non compress) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 32 - Simbolo per rappresentazioni circuitali.

2.3.1. La bobina

Abbiamo visto che una carica in movimento genera un campo magnetico perpendicolare alla direzione del suo moto (Fig. 33)

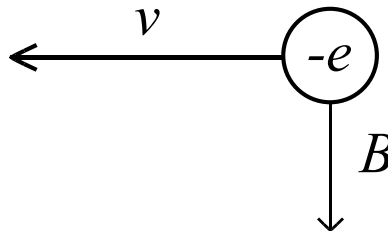


Fig. 33 – Un elettrone in movimento genera un campo magnetico.

La bobina, altrimenti nota come induttanza, sfrutta questo fenomeno. La bobina è, di fatto, un filo conduttore arrotolato su se stesso, questo consente di concentrare il campo magnetico della corrente prodotto da ogni singolo elettrone in movimento nel componente all'interno della spira. Ad ogni campo magnetico corrisponde una forza magnetica che in questo caso è anch'essa concentrata all'interno dell'induttanza, perpendicolare sia al moto delle cariche, sia al campo magnetico, orientata secondo la regola della mano destra (terna positiva) (Fig. 34)

***Il campo
magnetico e la
forza magnetica
sono
concentrati
nella spira***

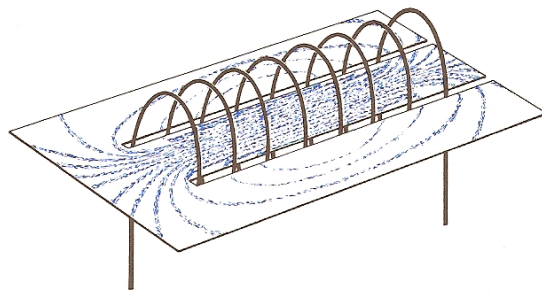


Fig. 34 – Una corrente che circola in una bobina genera un campo magnetico e una forza magnetica secondo la regola della terna positiva. Qui vediamo la disposizione del campo magnetico generato da una bobina. (BOSSI-SESTO, 2002)

Autoinduzione Se all'interno della bobina varia l'intensità di corrente, vi sarà di conseguenza una variazione di campo magnetico e quindi di flusso magnetico. Questa variazione di flusso magnetico genera, secondo la legge di Faraday-Neumann, una forza elettromotrice che si oppone al cambiamento di corrente. Tale forza elettromotrice è detta indotta; questo effetto è chiamato autoinduzione.

2.3.2. Induttanza

Definizione Per quantificare la forza elettromotrice indotta si ricorre ad un coefficiente L , definito induttanza, che rappresenta la quantità di flusso magnetico che una bobina genera quando è attraversata da $1A$ di corrente.

$$\phi = L \cdot I$$

Variando la corrente all'interno del componente, varierà pure il flusso magnetico all'interno dello stesso. Definiremo dunque la forza elettromotrice indotta con:

$$V_m = -\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

La bobina come "inerzia" È possibile interpretare la bobina come un componente che si comporta come un'inerzia che si oppone alla variazione di corrente nel circuito.

2.3.3. La bobina in corrente continua ed alternata

Vediamo ora come si comporta la bobina in circuiti a corrente continua e in circuiti a corrente alternata.

2.3.3.1. Corrente continua

Esaminiamo dapprima la situazione a corrente continua. Come visto, questo componente si oppone alle variazioni della corrente; dunque, in un circuito come quello in Fig. 35, il suo effetto è presente solo all'accensione ed allo spegnimento del generatore, che causa appunto variazione di corrente nel circuito.

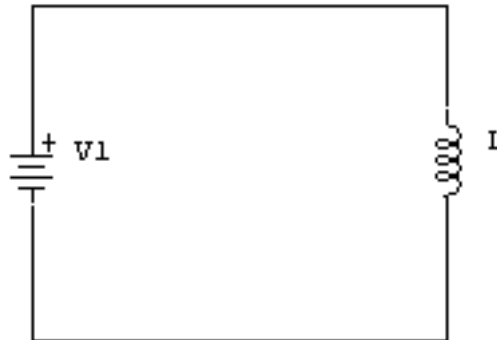


Fig. 35 – Circuito semplice con un generatore ed un'induttanza.

Una volta acceso il generatore si presenterà una forza elettromotrice indotta che si opporrà alla variazione di corrente facendola così aumentare lentamente. Quando questa avrà raggiunto un valore stabile, la forza elettromotrice si estinguerà.

2.3.3.2. Corrente alternata: reattanza induttiva

Prendiamo in considerazione un circuito a corrente alternata, presupponiamo che la caduta di potenziale ai capi della bobina sia uguale alla caduta di potenziale ai morsetti del generatore, abbiamo:

$$V(t) = U(t) = E_m = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = V_{MAX} \cdot \sin \omega t$$

Come fatto per il condensatore procediamo per analogia all'oscillatore armonico e determiniamolo dunque la corrente:

$$I(t) = -I_{MAX} \cdot \cos \omega t = -\frac{V_{MAX}}{\omega L} \cdot \cos \omega t$$

con

$$I_{MAX} = \frac{V_{MAX}}{\omega L}$$

Possiamo scrivere, grazie all'identità trigonometrica $\cos \omega t = -\sin(\omega t - 90^\circ)$, che:

$$I = I_{MAX} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$$

Ciò significa che la tensione ai capi dell'induttore è in anticipo di un quarto di periodo rispetto alla tensione del generatore. Tutte queste considerazioni ci permettono di esprimere, come nel caso del condensatore, una formula simile alla legge di Ohm:

Reattanza induttiva

$$I_{MAX} = \frac{V_{MAXx}}{\omega L} = \frac{V_{MAX}}{X_L}$$

Questa formula può essere espressa anche in termini di valori efficaci

$$I_{Eff} = \frac{V_{Eff}}{\omega L} = \frac{V_{Eff}}{X_L}$$

ed esprime il concetto di reattanza induttiva, che è la resistenza opposta da un induttore a correnti alternate, in base alla frequenza di queste ed è riassumibile come:

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L$$

Essendo la reattanza induttiva una grandezza fisica indicante una resistenza, la sua unità di misura è l'ohm (Ω).

Facciamo ora qualche considerazione. Più la frequenza della corrente sarà alta, più X_L avrà un valore alto. Le alte frequenze sono ostacolate dall'induttore che, come si è detto, si oppone alle variazioni di corrente. Maggiore è la frequenza, maggiore sarà la velocità con cui la corrente varia e quindi anche la forza elettromotrice indotta.

2.4. Trasformatori

Il trasformatore è un oggetto utilizzato frequentemente nella vita quotidiana. Basti pensare ai trasformatori per la ricarica delle batterie dei più disparati elettrodomestici o agli alimentatori di computer, stereo e televisori.

Il trasformatore serve a “trasformare” una certa corrente fornita ad una certa tensione in un’altra corrente di valore differente a tensioni diverse.

Mutua induzione

Il trasformatore funziona secondo il principio della mutua induzione. Prendiamo in esame un circuito 1, costituito da una bobina, accoppiato magneticamente ad un secondo circuito 2 simile grazie ad un nucleo comune di ferro (Fig. 36).

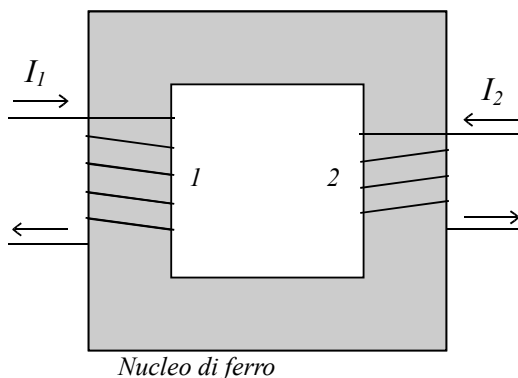


Fig. 36 – Due circuiti accoppiati magneticamente grazie ad un nucleo comune di ferro.

Accoppiamento magnetico

Per accoppiamento magnetico si intende che i flussi magnetici dei due circuiti possono interagire tra di loro.

Se facciamo passare una corrente alternata I_1 all’interno di 1 avremo delle continue variazioni di flusso magnetico che, grazie all’accoppiamento magnetico, si ripercuoteranno anche in 2 causando una corrente sempre alternata I_2 .

Avendo quindi, supposto che la forza elettromotrice indotta sia pari alla differenza di potenziale del generatore,

$$V_1 = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta\phi_S}{\Delta t} \cdot N_1$$

con $\Delta\phi_S$ pari al flusso magnetico per una spira e N il numero di spire, e

$$V_2 = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta\phi_S}{\Delta t} \cdot N_2$$

avremo, per un trasformatore ideale, senza dissipazione di flusso magnetico

$$-\frac{V_1}{N_1} = -\frac{V_2}{N_2}$$

quindi

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_1$$

cioè la tensione ai capi di 2 sarà determinata da V_1 moltiplicato per il rapporto tra il numero di spire di 2 e in numero di spire di 1.

2.5. Tubi a vuoto

QuickTime™ and a
TIFF (non compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 37 - Triodo.

QuickTime™ and a
TIFF (Non compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 38 - Simboli schematici dei pentodi, tetrodi, triodi e diodi a tubo a vuoto.

2.5.1. Diodo

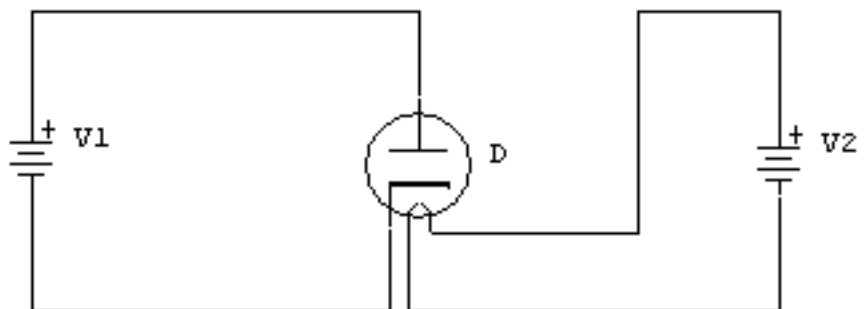


Fig. 39 – Circuito semplice con un diodo a tubo a vuoto.

Le componenti del diodo

Nella Fig. 39 vediamo schematizzato un circuito all'interno del quale è posto un diodo a tubo a vuoto. Il diodo è composto principalmente da tre parti: il filamento, l'anodo, ed il catodo. Questi tre elementi sono posti in un ambiente a vuoto spinto, i loro terminali fuoriescono dal tubo di vetro affinché possano essere collegati al circuito.

Funzionamento Il funzionamento e la funzione del filamento sono presto spiegati: proprio come il filamento di una lampadina, quando viene attraversato da una corrente diventa incandescente permettendo il riscaldamento del catodo. Questo essendo riscaldato emette degli elettroni per effetto termoionico che viaggiano nell'ambiente sottovuoto del tubo per essere raccolti nell'anodo (Fig. 40).

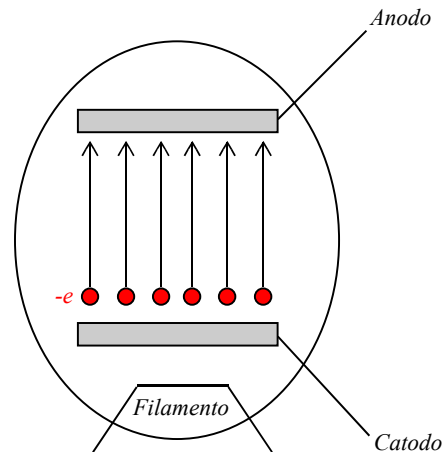


Fig. 40 – Moto degli elettroni in un diodo.

Componente polarizzato

Da questo si intuisce che la corrente nel diodo passa in un solo verso. Esso si dice quindi componente polarizzato. Se vogliamo che la corrente passi nel diodo dobbiamo dunque posizionarlo in modo che la corrente entri nel catodo ed esca dall'anodo. La convenzione ci suggerirebbe di porre l'anodo al polo negativo del generatore ed il catodo al polo positivo, ma, non corrispondendo tale convenzione - che vuole che la corrente si muova dal positivo al negativo - nella realtà, è opportuno polarizzare il diodo in maniera inversa a quanto detto sopra. Avremo dunque il catodo polarizzato negativamente con un eccesso di elettroni che verranno emessi per effetto termoionico e raccolti nell'anodo, polarizzato positivamente e quindi con lacuna di elettroni, per effetto di campo elettrico. È fondamentale sottolineare che se tra anodo e catodo non ci fosse differenza di potenziale gli elettroni emessi dal catodo si ricombinerebbero con gli atomi del catodo stesso; non ci sarebbe così corrente nel circuito.

2.5.2. Triodo

Il principio di funzionamento del triodo è uguale a quello del diodo eccetto una piccola differenza che consta in una griglia che nel triodo è situata tra il catodo e l'anodo. Polarizzando tale griglia positivamente o negativamente si può regolare il flusso degli elettroni tra catodo ed anodo. Questa griglia è detta di controllo.

2.5.3. Tetrodo e pentodo

Un successo nella tecnologia delle valvole termoioniche è sicuramente rappresentato dai tetrodi ed i pentodi. Il principio di funzionamento è sempre il medesimo, ma al loro interno questi componenti contengono altre griglie oltre a quella di controllo: il tetrodo quella di schermo, il pentodo sia quella di schermo che quella di soppressione. Queste griglie consentono il passaggio di correnti molto intense e con frequenze anche molto alte, che non sono sopportate dai triodi.

2.6. Componenti a semiconduttori

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 41 - Alcuni transistor con diversi contenitori.

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 42 - Simboli schematici di diodi e transistor.

2.6.1. Diodo

Una giunzione PN

Polarizzazione di un diodo

Questo componente è fondamentalmente una giunzione PN (vedi 1.6.3.). Ricordiamo che il diodo è un componente che lascia passare la corrente al suo interno in un solo senso. Polarizzando una giunzione PN possiamo ottenere questo effetto. Se polarizziamo inversamente la giunzione, ovvero ponendo la zona P, corrispondente all'anodo, al negativo del generatore e la N, corrispondente al catodo, al positivo, la differenza di potenziale tra le due zone aumenta a causa della creazione di nuovi ioni e, quindi dell'allargamento della zona di svuotamento (Fig. 43).

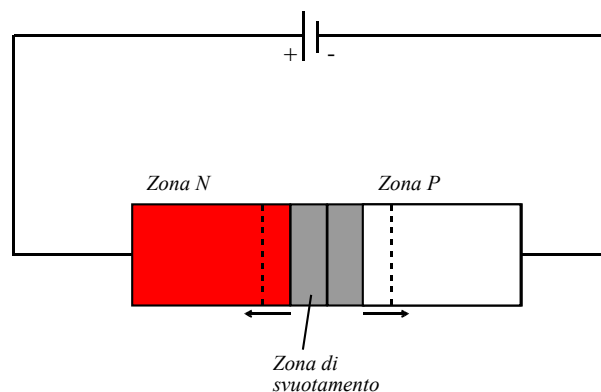


Fig. 43 - Con una polarizzazione inversa del diodo la zona di svuotamento si allarga, il passaggio di corrente è così impedito.

In questo modo la corrente non può certamente passare nel circuito. Se diversamente polarizziamo indirettamente la giunzione, con P al positivo ed N al negativo, la differenza di potenziale verrà annullata consentendo il passaggio della corrente.

Rappresentando la situazione in un grafico (Fig. 44),

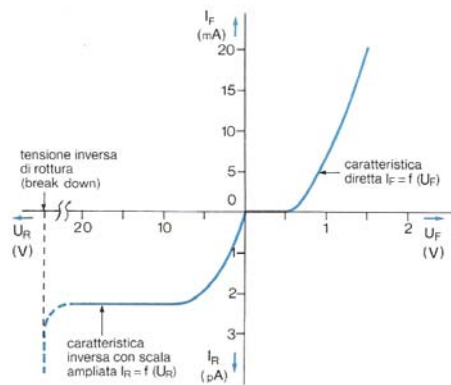


Fig. 44 – Caratteristica voltamperica di un diodo al silicio. (BOSSI, SESTO 2002) Notare che per la parte inferiore del grafico la scala è in μA mentre nella parte superiore è in mA .

notiamo che per una polarizzazione inversa abbiamo un passaggio di corrente, ma così debole che si può considerare nullo. Per una polarizzazione diretta abbiamo invece il passaggio di corrente, ma solo per valori della differenza di potenziale applicata ai capi del diodo superiori ad una costante che varia da materiale a materiale e che corrisponde alla differenza di potenziale della zona di svuotamento della giunzione.

Rottura della giunzione

Se osserviamo attentamente il grafico notiamo che per una data differenza di potenziale inversa abbiamo passaggio di corrente. Questo perché a determinati valori della differenza di potenziale inversa gli elettroni hanno abbastanza energia per urtare le molecole e determinare un effetto di distacco degli elettroni dagli atomi a catena. Tale fenomeno è chiamato rottura della giunzione, che non consiste nella rottura fisica del componente, a meno che in questo venga dissipata una potenza maggiore a quella sopportata.

2.6.2. Transistor

Componente a bigiunzione

Il transistor è un componente molto importante che ha consentito uno sviluppo enorme in campo elettronico. Come il diodo è un componente a semiconduttore ed è costituito da due giunzioni, per questo motivo viene chiamato componente a bigiunzione.

NPN e PNP

Il transistor è costituito da tre zone di grandezze e drogaggi differenti. Esistono due tipi di transistor: gli NPN e i PNP, il funzionamento del componente è uguale per tutti e due i tipi perciò potremo limitarci a spiegare il funzionamento in uno solo di essi, in questo caso quello NPN, ed applicare gli stessi ragionamenti all'altro.

Le tre zone del transistor e le

La prima zona N è detta emettitore ed è fortemente drogata, la seconda zona di tipo P è chiamata base ed è di dimensioni minori

loro proprietà

rispetto alle altre mentre la terza zona di tipo N è denominata collettore ed è debolmente drogata (Fig. 45) .

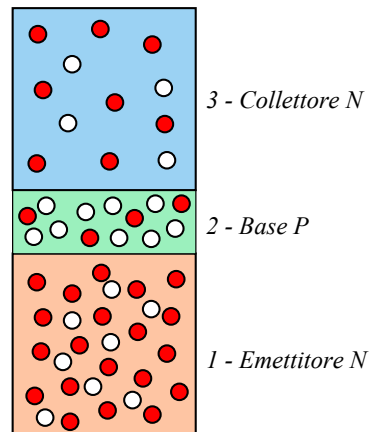


Fig. 45 - Rappresentazione schematica della configurazione elettrica di una transistor NPN. Nelle zone N vi è prevalenza di elettroni (in rosso) mentre nella zona P vi è prevalenza di cariche positive (in bianco).

Polarizzazione di un transistor

Per far sì che il transistor funzioni, è necessario polarizzarlo in maniera univoca: la prima giunzione (1-2) in modo diretto, in questo caso la base al positivo e l'emettitore al negativo; la seconda giunzione (2-3) indirettamente, cioè il collettore al positivo. Polarizzando la prima giunzione in tal modo verificheremo che la corrente può passare nel circuito *E-B*. A questo punto si verifica un fenomeno che è la base del funzionamento del transistor: essendo la base più corta rispetto alla capacità di percorrenza degli elettroni in movimento, questi ultimi tendono a riversarsi nella terza zona, che, pur essendo polarizzata in modo inverso, non costituisce un grande ostacolo alla corrente essendo debolmente drogata. Perciò parte della corrente dell'emettitore si riversa nella base e parte (la maggior parte) nel collettore (Fig. 45).

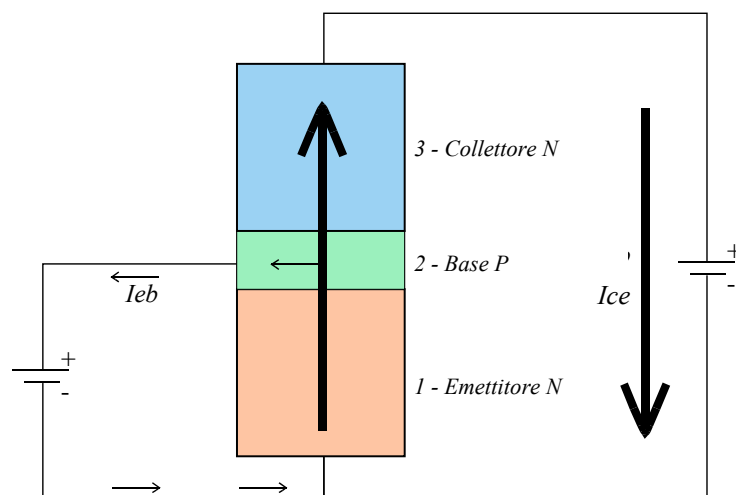


Fig. 46 - Correnti in un transistor polarizzato correttamente.

È possibile regolare la corrente tra emettitore e collettore variando la

corrente tra base ed emettitore: per una maggiore I_{eb} si avrà una maggiore I_{ec} .

3 Circuiti semplici

3.1. Circuiti RC

Abbiamo visto come i condensatori non blocchino la corrente continua e come questi oppongano una resistenza alla corrente alternata.

Proprio per queste proprietà, i condensatori vengono utilizzati come filtri per la corrente. Prendiamo in esame il circuito mostrato in Fig. 47.

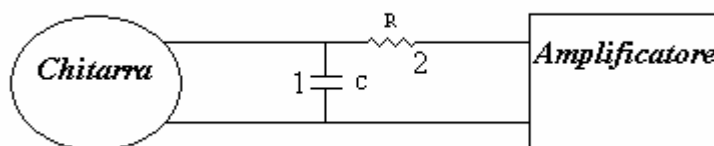


Fig. 47 - Il segnale della chitarra passa da un circuito RC dove il condensatore porta a massa.

Sappiamo che il segnale inviato dalla chitarra all'amplificatore è a corrente alternata e corrisponde alla somma delle varie frequenze delle armoniche dello strumento.

Conoscendo il valore di C (ad es. 470nF) e sapendo che lo spettro delle frequenze della chitarra si estende da 20Hz a 3kHz, tracciamo un grafico che rappresenta la reattanza capacitiva di C per ogni frequenza dello spettro (Fig. 48).

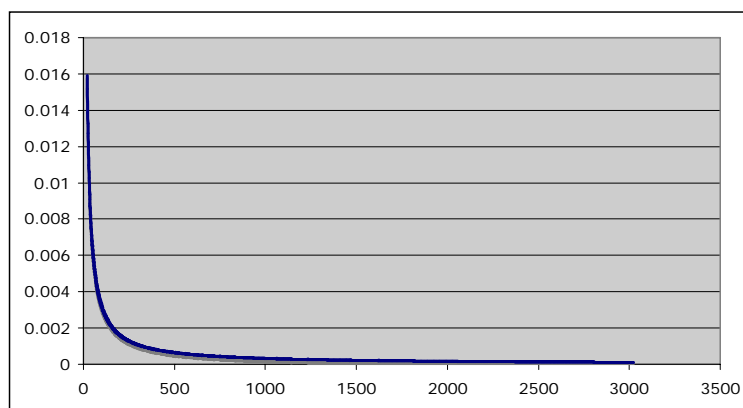


Fig. 48 - Grafico della reattanza capacitiva di un condensatore di 470nF per una banda di frequenza tra i 20 Hz e i 3kHz.

Secondo principi di Kirchhoff sui nodi, la corrente si dividerà nei rami 1 e 2 del circuito. Se per una certa frequenza $X_c > R$, la corrente passerà prevalentemente in 2, viceversa, se $X_c < R$ allora passerà prevalentemente in 1. Scegliendo dunque opportunamente il valore di R , possiamo determinare la frequenza di taglio del filtro. Questo tipo di filtro è detto passa-basso passivo, in quanto le frequenze alte, per

cui $X_c < R$, vengono cortocircuitate e quindi sottratte dal segnale. Se invece esaminiamo un circuito come quello nella Fig. 49

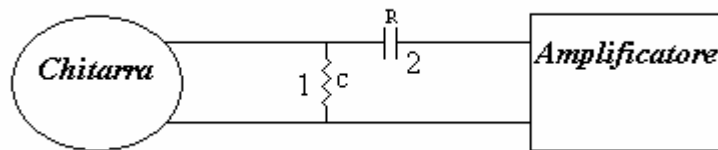


Fig. 49 - Il segnale della chitarra passa da un circuito RC dove il resistore porta a massa.

notiamo che vale esattamente il contrario: solo le frequenze per cui vale $X_c < R$ passeranno prevalentemente da 2, giungendo all'amplificatore come segnale, mentre quelle frequenze per cui $X_c > R$ verranno cortocircuitate. Questa configurazione è detta passa alto passivo in quanto per le alte frequenze vale $X_c < R$ mentre per le basse frequenze vale $X_c > R$.

3.2. Circuiti RL

Come esaminato nel precedente paragrafo, le basse frequenze sono meno ostacolate dalla bobina rispetto alle alte. Secondo questo principio è possibile esaminare due circuiti basilari che fungono da filtro, composti da un resistore ed un induttore.

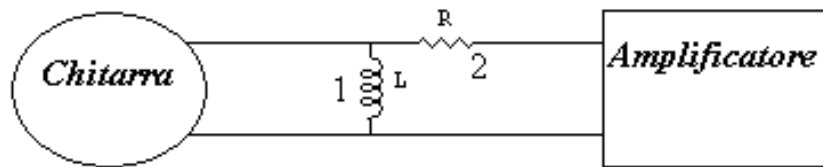


Fig. 50 - Il segnale della chitarra passa da un circuito RL dove l'induttore porta a massa.

Prendiamo come generatore di segnale una chitarra elettrica. In questo caso (Fig. 50) le frequenze per cui $XL < R$ verranno cortocircuitate e non arriveranno all'amplificatore come segnale. Invece le frequenze per cui $XL > R$ arriveranno all'amplificatore.

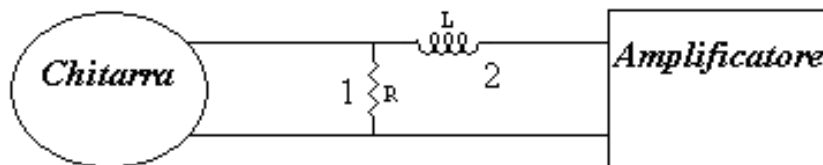


Fig. 51 - Il segnale della chitarra passa da un circuito RL dove il resistore porta a massa.

In questo caso (Fig. 51) è valido il contrario: le frequenze con $XL > R$ vengono tagliate mentre quelle con $XL < R$ no.

3.5. Circuiti amplificatori

Gli amplificatori hanno la funzione di amplificare dei segnali che possono essere di vario tipo (segnali audio, radio, eccetera).

Un'amplificatore viene definito quadripolo perché presenta quattro poli (Fig. 52).



Fig. 52 – Un amplificatore come quadripolo. Nei primi due poli si applica il segnale d'entrata rappresentato dalla differenza di potenziale $V1$. Il segnale di uscita è rappresentato dalla differenza di potenziale $V2$

Nei primi due si applica il segnale in entrata, dai secondi due esce il segnale amplificato.

Due stadi di amplificazione

In svariate applicazioni, soprattutto in quelle legate all'audio, un'amplificatore si compone di più stadi, i quali possono essere considerati come circuiti indipendenti. Fondamentalmente possiamo ridurre il numero degli stadi a due. Il primo stadio, a cui viene applicato il segnale in entrata, è lo stadio preamplificatore. Questo stadio consente di amplificare segnali deboli in modo che possano essere successivamente modificati, ad esempio con dei filtri di frequenza, prima di arrivare allo stadio di potenza. Quest'ultimo permette l'amplificazione del segnale in arrivo in modo da poter essere utilizzato successivamente. Se pensiamo ad un'amplificatore audio, lo stadio di potenza è quello che permette al segnale di raggiungere una potenza tale per cui risulti udibile attraverso l'altoparlante. La potenza dissipata in uno stadio preamplificatore è solitamente minore di 1 Watt mentre la potenza di uno stadio di potenza può raggiungere valori come 2000 Watt o anche maggiori. Alcuni parametri che definiscono un amplificatore o un singolo stadio sono il rapporto tra differenza di potenziale del segnale uscente e quello entrante, detto guadagno, e la banda di frequenza passante.

3.5.1. Preamplificatori

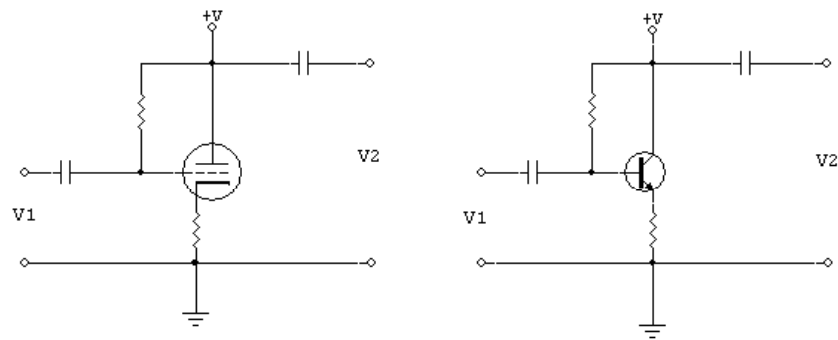


Fig. 53 – Preamplificatore realizzato con valvola (a sinistra) e a transistor (a destra).

È possibile ottenere un preamplificatore con dei circuiti come quelli in Fig. 53.

Nel primo vediamo un preamplificatore a valvola, nel secondo, uno a transistor. Il concetto fondamentale è pressochè identico per tutte e due le varianti perciò mi limiterò a spiegare la prima variante, cioè quella a transistor.

Abbiamo visto nel paragrafo 2.6.2. che nel circuito *EB* di un transistor la corrente *I_{eb}* è proporzionale alla corrente *I_{ec}* del circuito *EC*.

Ponendo dunque un segnale all'ingresso di *EB*, questo segnale verrà riprodotto nel circuito *EC* ma con intensità di corrente maggiore e con differenza di potenziale maggiore ai capi di *EC*. Quindi in un circuito preamplificatore non solo *I_{ec}* è proporzionale a *I_{eb}*, ma anche *V_{ec}* è proporzionale a *V_{eb}*. Questo è il concetto fondamentale che ci permette di comprendere come funziona questo circuito. Lo stesso ragionamento è applicabile al circuito a valvola sostituendo il circuito *EB* con il circuito Catodo-Griglia e il circuito *EC* con quello Catodo-Anodo. Con questa configurazione circuitale risulta ovvio che il segnale in uscita sarà sfasato di 180° rispetto al segnale in ingresso, dato che i due segnali circolano in sensi diversi.

Esaminiamo alcuni dettagli. Ricordiamo che nel circuito *EB* la corrente può passare in un solo senso. Sapendo ciò si può pensare che solo parte di un segnale a corrente alternata venga amplificata. In realtà non è così. Infatti nel circuito *EB* circola continuamente una corrente continua. Questa corrente si somma al segnale in modo che questo sia costituito da una corrente non costante ma che circola comunque in un solo senso. Il segnale viene così conservato ma in corrente continua. I condensatori impediscono che questa corrente continua "aggiunta" esca dallo stadio insieme al segnale.

In alcune situazioni potremo incontrare un preamplificatore con lo schema circuitale rappresentato nella Fig. 54. La resistenza *R_r* rappresenta un cosiddetto blocco di retroazione che permette di

ottenere un guadagno uniforme e un'amplificazione più stabile.

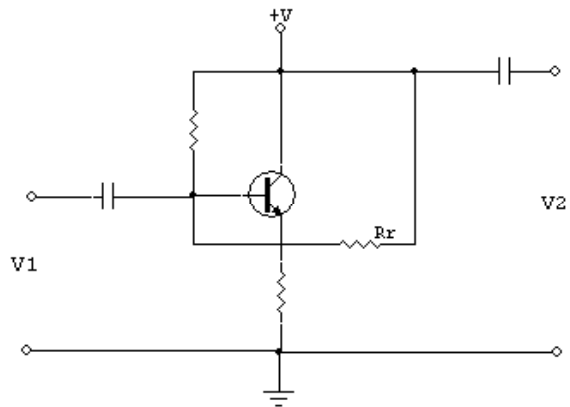


Fig. 54 – Preamplificatore a transistor con blocco di retroazione.

Al fine di ottenere dei valori di guadagno più elevati senza dover sottoporre il transistor o la valvola (a dipendenza dei casi) a eccessivi parametri che potrebbero provocare alterazioni del segnale in uscita, è possibile adottare una configurazione a stadi multipli in cascata (Fig.55).

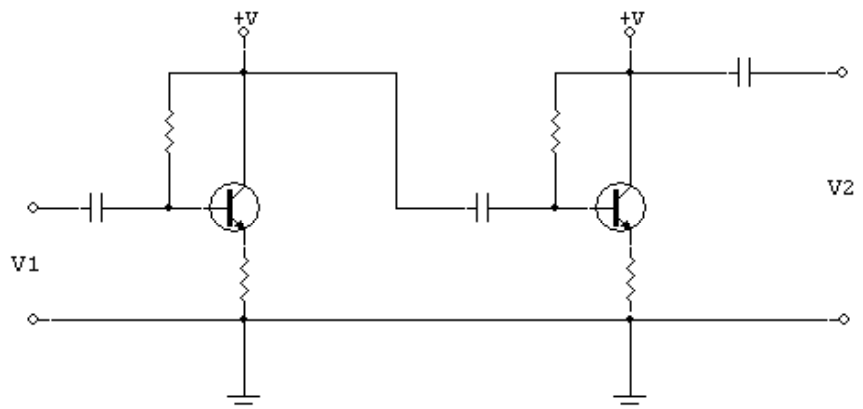


Fig. 55 - Preamplificatore a doppio stadio in cascata.

Questa configurazione è composta da più stadi preamplificatori affiancati tra loro in serie. Il guadagno complessivo si ottiene moltiplicando il guadagno di ogni piccolo stadio.

3.5.2. Stadio di potenza

In questo caso però avremo bisogno di due componenti per realizzare il circuito (Fig.56). Necessiteremo di un transistor NPN e di un PNP. A differenza del preamplificatore nei rispettivi circuiti EB dei transistor non circola alcuna corrente continua.

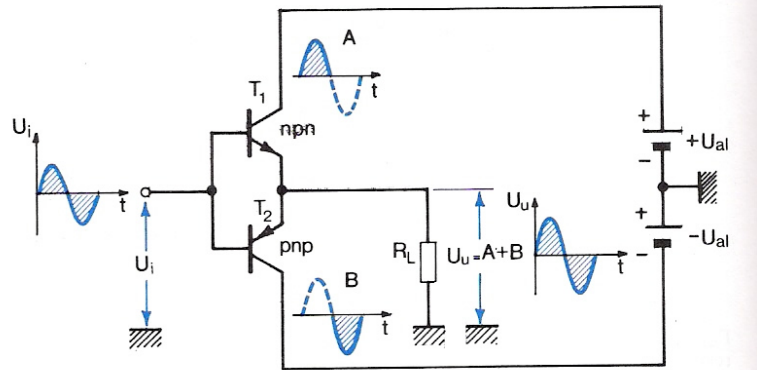


Fig. 56 - Schema di principio di un amplificatore di potenza. (BOSSI, SESTO 2002)

I due componenti vengono attivati unicamente dal segnale ricevuto dal preamplificatore. A ognuno dei due transistor viene assegnato il compito di amplificare le parti del segnale che circolano in sensi diversi. Prendendo come esempio un segnale sinusoidale, il transistor NPN amplificherà unicamente la semionda positiva mentre il PNP amplificherà unicamente la semionda negativa. Vengono utilizzati dei transistor speciali per questo compito, capaci di dissipare potenze che normali transistor non sopporterebbero. Vengono perciò detti transistor di potenza.

4 Realizzazione pratica di un preamplificatore

4.1. Materiale e metodi

4.1.1. Circuito

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 57 - Schema circuitale di un preamplificatore (ELETTRONICA SESTRESE S.R.L)

Il circuito scelto per questo progetto è illustrato in Fig. 57. Si tratta di un circuito preamplificatore con due stadi in cascata. Ho reperito questo progetto in un kit di montaggio. Il circuito, a detta del fornitore, consente l'amplificazione di un segnale in una larga banda di frequenze senza distorsione. È mia intenzione verificare praticamente queste proprietà, oltre ad altre caratteristiche del circuito e delle sue componenti (vedi risultati).

Esaminiamo in dettaglio lo schema circuitale per stabilire la funzione di ogni singola parte di cui è composto. I condensatori C1, C2 e C3 fungono da blocco per la corrente continua. Questi impediscono che della corrente continua attraversi il circuito evitando così che si producano fischi o distorsioni. I condensatori C2 e C3 influiscono sulla banda di frequenze passanti per il circuito, secondo i criteri citati in 3.1. Le resistenze R1 e R3 servono ad aumentare la resistenza d'ingresso dei rispettivi stadi amplificatori. Il guadagno del primo stadio di amplificazione è regolato da POT1 che regola la corrente tra collettore ed emettitore. Il secondo stadio è pilotato dal primo stadio, significa che riceve il segnale amplificato e lo amplifica nuovamente. Il guadagno complessivo del preamplificatore dovrebbe risultare pari al prodotto di ogni stadio. Questa configurazione a doppio stadio in cascata è più vantaggiosa rispetto a una semplice configurazione a singolo stadio. Questa particolare configurazione ci permette di ottenere un guadagno relativamente alto senza pericolo di distorsione e senza sfasare il segnale di uscita di 180° rispetto al segnale d'entrata. R2 svolge il ruolo di blocco di retroazione.

4.1.2. Materiale

Per realizzare il progetto è necessario scegliere accuratamente i pezzi. Nello schema circuitale troviamo le indicazioni riguardanti le grandezze dei componenti (vedi tabella).

Q1	BC307 PNP
Q2	BC239 NPN
POT 1	10 k
R1	27 k
R2	4,7 M
R3	3,3 k
C1	10 μ 16 V elettrolitico
C2	1 μ 16 V elettrolitico
C3	10 μ 16 V elettrolitico

Ho sostituito i due transistor Q1 e Q2 con due equivalenti: BC557B PNP, rispettivamente BC548B NPN.

È importante scegliere correttamente la potenza dei componenti in modo che questa sia superiore alla potenza che il componente dovrà dissipare nel circuito, al fine di preservare l'integrità e il corretto funzionamento del pezzo.

Ho deciso di optare per delle resistenze con potenza di 0,25 W, fatta eccezione per la resistenza R2 che ha potenza 0,4 W. Questa scelta mi è stata dettata, più che da motivi tecnici, da opportunità di mercato. Sempre questo fattore mi ha condizionato nella scelta dei condensatori elettrolitici. Non mi è stato possibile infatti trovare dei condensatori adeguati presso il fornitore (www.distrelec.com). Per ovviare al problema ho deciso di acquistare dei condensatori di differente capacità da un altro fornitore (www.opitec.ch). Affinché il circuito possa funzionare correttamente è necessario che le capacità dei tre condensatori siano, se non uguali ai valori indicati, maggiori degli stessi. Questo perché i tre condensatori hanno come funzione quella di bloccare la corrente continua. Scegliendo dei condensatori con maggiore capacità bloccheremo di sicuro la corrente continua e non rischieremo di restringere la banda di frequenze passante. La lista dei componenti viene così modificata:

Q1	BC557B PNP
Q2	BC548B NPN
POT 1	10 k
R1	27 k 0,25W
R2	4,7 M 0,4W
R3	3,3 k 0,25W
C1	100 μ 16 V elettrolitico
C2	2,2 μ 16 V elettrolitico
C3	22 μ 16 V elettrolitico

Per rendere il risultato finale più completo è opportuno avvalersi di un contenitore, manopole, interruttore, clip per pila e connettori. Ovviamente sarà necessaria pure una tavola di montaggio per componenti.

4.1.3. Strumenti e metodo di lavoro

Il montaggio richiede l'utilizzo di un saldatore. Il saldatore che ho utilizzato è dotato di un regolatore di temperatura, utile per la saldatura di componenti suscettibili alle alte temperature come i transistor. Al fine di ottenere buone saldature, è buona norma pulire la punta del saldatore con una spugnetta umida. Per fissare il componente alla tavola, bisogna posizionare quest'ultimo nella posizione desiderata e fissarlo con del nastro adesivo. Dopodichè bisogna appoggiare la punta del saldatore in modo che questo scaldi sia la piastra che il reforo dell'elemento (Fig. 58).

QuickTime™ and a
TIFF (Non compresso) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 58 – Per una corretta saldatura è necessario riscaldare sia la lastra che il reforo.

Dopo qualche secondo è possibile appoggiare lo stagno sulla tavola accanto alla punta del saldatore: lo stagno fonderà e si posizionerà

nelle zone riscaldate (Fig. 59).

QuickTime™ and a
TIFF (Non compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 59 - Lo stagno fuso si posiziona sulle zone riscaldate.

Una buona saldatura deve essere lucida. Inoltre lo stagno utilizzato non deve essere ne troppo, ne troppo poco.

Una volta fissato l'elemento è possibile verificare che la corrente possa passare dalla piastra al componente grazie ad un multimetro digitale.

Fatto questo accertamento si taglia la parte del reforo che avanza dalla saldatura (Fig. 60).

QuickTime™ and a
TIFF (Non compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 60 - Per praticità si taglia la parte restante del reforo dopo la saldatura.

In queste operazioni è consigliabile l'utilizzo di pinze e morsetti. In alcuni casi sarà necessario rimuovere l'elemento saldato. Ci sono due sistemi per compiere questa operazione.

Il primo e più semplice è quello della treccia dissaldante. Si tratta di una treccia di sottili fili di rame che risucchia per capillarità lo stagno liquido. Si appoggia la treccia sulla saldatura e si riscalda lo stagno tramite la treccia stessa. Il foro sulla tavola sarà ora libero e sarà possibile estrarre il componente. Per pulire ulteriormente il foro è possibile applicare nuovamente il procedimento.

QuickTime™ and a
TIFF (Not compressed) decompressor
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a
TIFF (Not compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 61 - Rotolo di treccia dissaldante (a sinistra) e utilizzo della stessa (a destra)

Il secondo metodo prevede l'utilizzo di una pipetta aspirante: si riscalda la saldatura desiderata fino a che tutto lo stagno non è fuso, si appoggia poi la punta della pipetta sulla saldatura e si attiva il meccanismo di aspirazione. Lo stagno viene risucchiato nel serbatoio della pipetta.

QuickTime™ and a
TIFF (Not compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 62 - Pipetta aspirante.

QuickTime™ and a
TIFF (Not compressed) decompressor
are needed to see this picture.

Fig. 63 - Utilizzo di una pipetta aspirante.

È possibile che non venga aspirato tutto lo stagno e quindi è opportuno avvalersi della treccia dissaldante per pulire il foro ulteriormente.

4.2. Costruzione

L'idea iniziale era di realizzare un preamplificatore. Essendo questo circuito particolarmente adatto per preamplificare segnali di chitarre elettriche, ho deciso di realizzarne un cosiddetto "stompbox", altrimenti detto pedalino, in modo da poterlo utilizzare praticamente senza l'impiego delle mani. Questo tipo di costruzione prevede che il preamplificatore sia dotato di un pulsante di bypass, che verrà azionato col piede, il quale consentirà di attivare o disattivare il preamplificatore a piacimento. Nei sistemi di bypass vengono sovente utilizzati dei diodi LED che indicano se l'effetto è attivo o se invece non viene applicato al segnale. Per realizzare questa parte è necessario costruire un secondo circuito preamplificatore identico al primo con, al posto del potenziometro, una resistenza fissa di 10k Ω , in modo che il guadagno dello stadio sia pari a 1. Questa necessità è dovuta al fatto che è impossibile realizzare un cosiddetto "true bypass" (vero bypass, Fig. 64) con spia d'accensione con un interruttore a due poli ed è molto difficile reperire sul mercato un interruttore a tre poli.

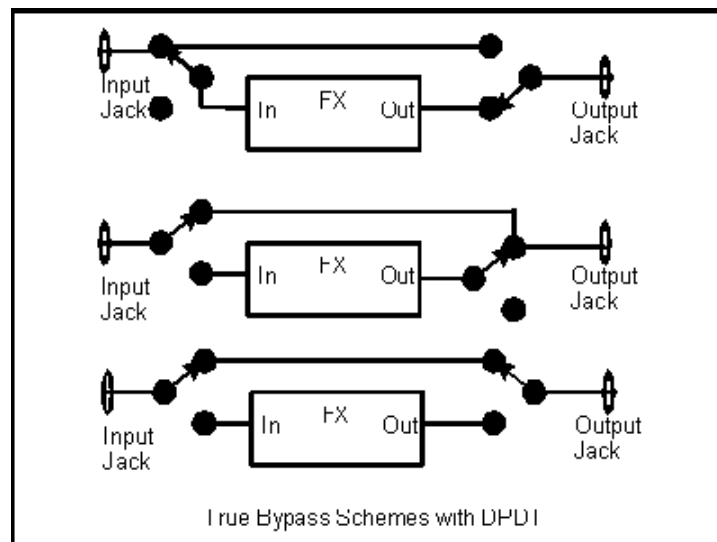


Fig. 64 - I più comuni sistemi di "true bypass" realizzati con interruttori a due poli. Quando un "true bypass" viene attivato, questo isola completamente il circuito dalla linea. (http://www.geofex.com/Article_Folders/bypass/bypass.htm)

Questo fatto ci obbliga ad optare per una divisione della linea che porta ad uno schema simile a quello in Fig. 65.

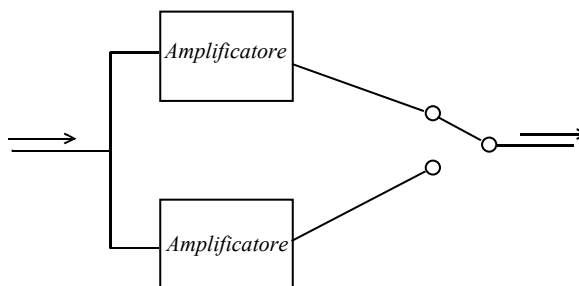


Fig. 65 - La linea viene divisa in altre due linee, in ognuna delle quali viene posto un amplificatore; con un interruttore ad un unico polo sarà possibile selezionare da che linea prelevare il segnale.

Così facendo saremo in grado di selezionare da quale dei due amplificatori prelevare il segnale. Uno dei due amplificatori è a guadagno regolabile mentre l'altro è a guadagno fisso pari a 1. Questo ci consente di ottenere un buon sistema di bypass, risparmiando un polo dell'interruttore per il circuito spia. È necessario porre un secondo amplificatore a guadagno unitario in uno dei due rami, anche se questo non provvede ad alcuna modifica sostanziale del segnale, in quanto il segnale potrebbe cortocircuitarsi tramite uno dei componenti del primo preamplificatore, indebolendo il segnale o addirittura perdendolo. Ponendo invece ognuna delle due linee a parità di condizioni si evita che questo accada. Il circuito spia è un semplice circuito composto da un diodo LED e una resistenza in serie, collegato all'interruttore in modo che questo si accenda quando l'effetto viene attivato.

Solitamente questi "stompbox" sono alimentati con batterie da 9v o da alimentatori esterni. Per questo modello ho deciso di provvedere all'alimentazione del circuito in entrambe le maniere, in modo che questo potesse risultare il più versatile possibile.

Il segnale della chitarra arriverà al preamplificatore tramite dei connettori Jack da 6,3mm.

Una volta assemblato il circuito rispettando i collegamenti tra le varie componenti (Fig. 66), ho perforato il contenitore metallico in modo da poter affrancare i connettori, il potenziometro, ed il pulsante di bypass.

www.stompbox.it

Fig. 66 - Circuito preamplificatore assemblato.

Ho in seguito fissato i vari circuiti al contenitore ed ho completato i

4.3. Risultati

re	vin	vout	gain
0	0.47	1.96	4.170212766
0.32	0.47	2.38	5.063829787
0.9	0.47	2.66	5.659574468
1.36	0.47	2.67	5.680851064
1.93	0.47	2.51	5.340425532
2.45	0.47	2.24	4.765957447
2.89	0.47	1.95	4.14893617
3.39	0.47	1.67	3.553191489
3.94	0.47	1.46	3.106382979
4.43	0.47	1.28	2.723404255
4.92	0.47	1.15	2.446808511
5.38	0.47	1.02	2.170212766
5.91	0.47	0.88	1.872340426
6.4	0.47	0.8	1.70212766
6.89	0.47	0.73	1.553191489
7.42	0.47	0.67	1.425531915
7.89	0.47	0.62	1.319148936
8.42	0.47	0.58	1.234042553
8.88	0.47	0.54	1.14893617
9.41	0.47	0.49	1.042553191

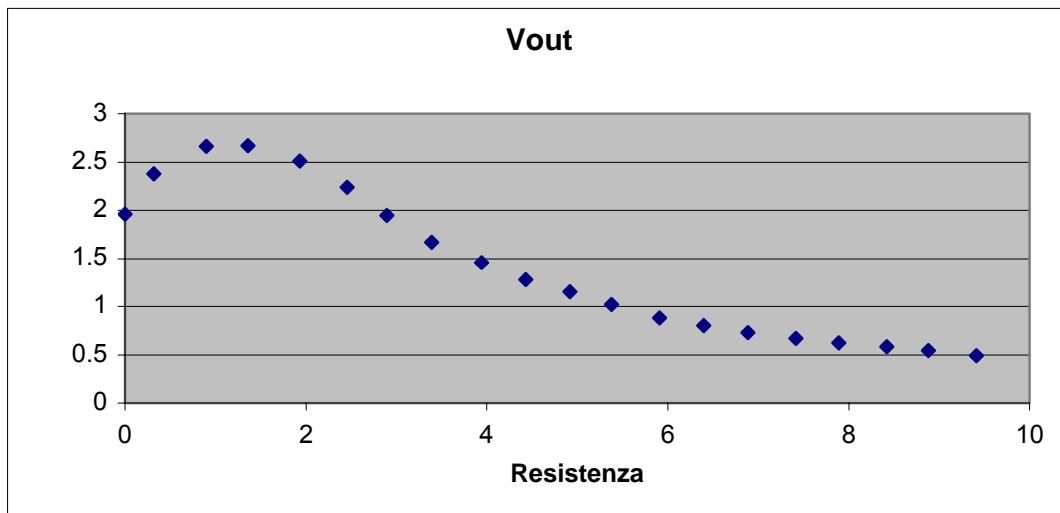


Fig. 68 – Tensione ai morsetti d'uscita Vout in funzione della resistenza di POT1.

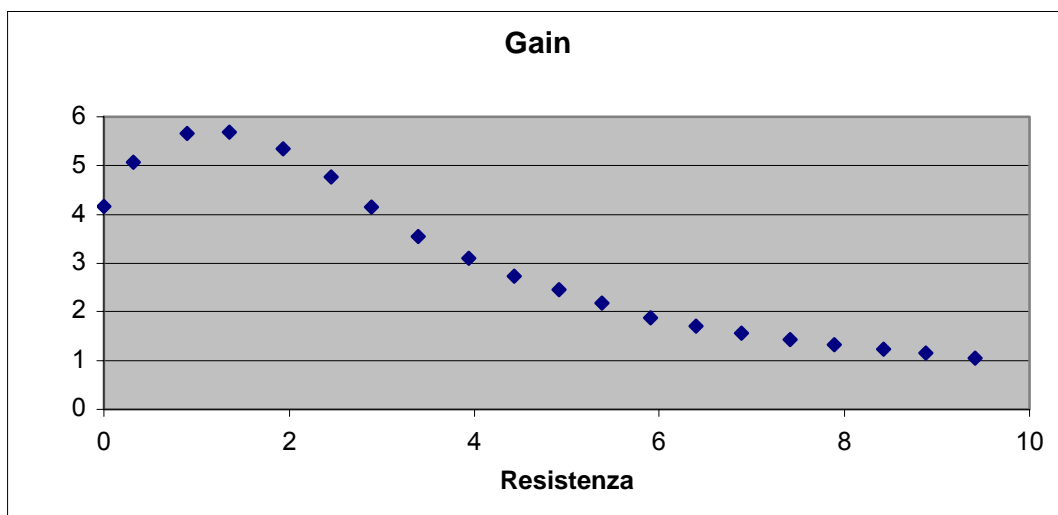


Fig. 69 - Grafico del guadagno totale in funzione della resistenza di POT1.

re	vbe1	vce1	vcb1	vbe2	vce2	vcb2	vin
0	2.31	1.97	0.46	0.013	1.5	1.97	0.47
0.34	2.86	2.49	0.43	0.02	1.95	2.43	0.47
0.86	3.19	2.84	0.36	0.025	2.28	2.69	0.47
1.41	3.28	3.01	0.24	0.027	2.46	2.73	0.47
1.99	3.15	2.98	0.12	0.026	2.43	2.58	0.47
2.39	2.99	2.83	0.094	0.025	2.28	2.37	0.47
2.94	2.66	2.47	0.036	0.021	1.93	1.98	0.47
3.36	2.35	2.24	0.021	0.019	1.7	1.73	0.47
3.89	2.03	2	0.015	0.016	1.47	1.48	0.47
4.45	1.84	1.83	0.013	0.014	1.3	1.31	0.47
4.9	1.68	1.67	0.011	0.011	1.14	1.15	0.47
5.34	1.57	1.56	0.01	0.01	1.03	1.04	0.47
5.92	1.43	1.42	0.009	0.009	0.89	0.9	0.47
6.34	1.36	1.36	0.008	0.008	0.82	0.83	0.47
6.89	1.28	1.27	0.007	0.007	0.74	0.75	0.47
7.49	1.2	1.2	0.006	0.006	0.66	0.67	0.47
8.4	1.11	1.11	0.006	0.006	0.58	0.58	0.47
9.42	1.02	1.02	0.004	0.004	0.49	0.49	0.47

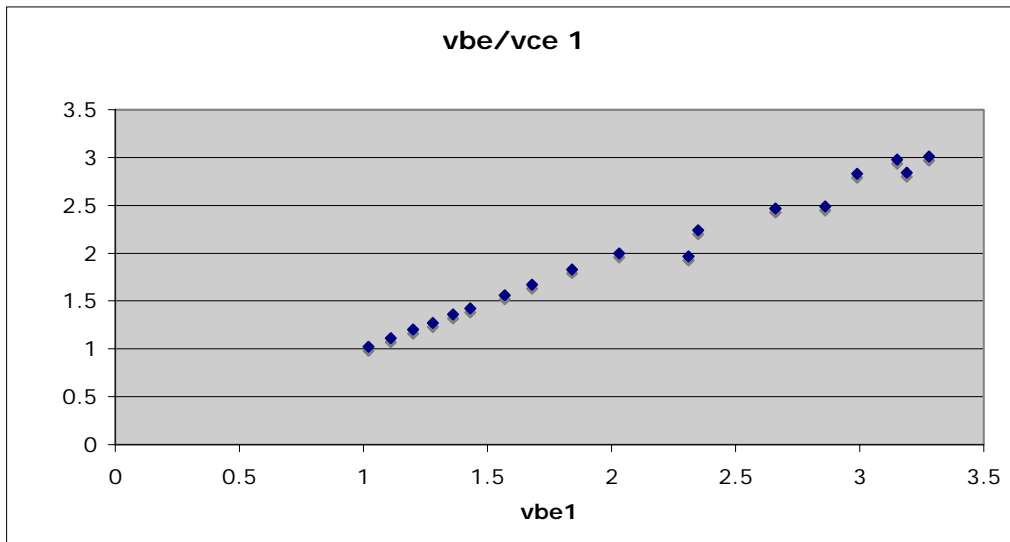


Fig. 70 - Voltaggio tra collettore ed emettitore in funzione al voltaggio tra base ed emettitore per il transistor Q1.

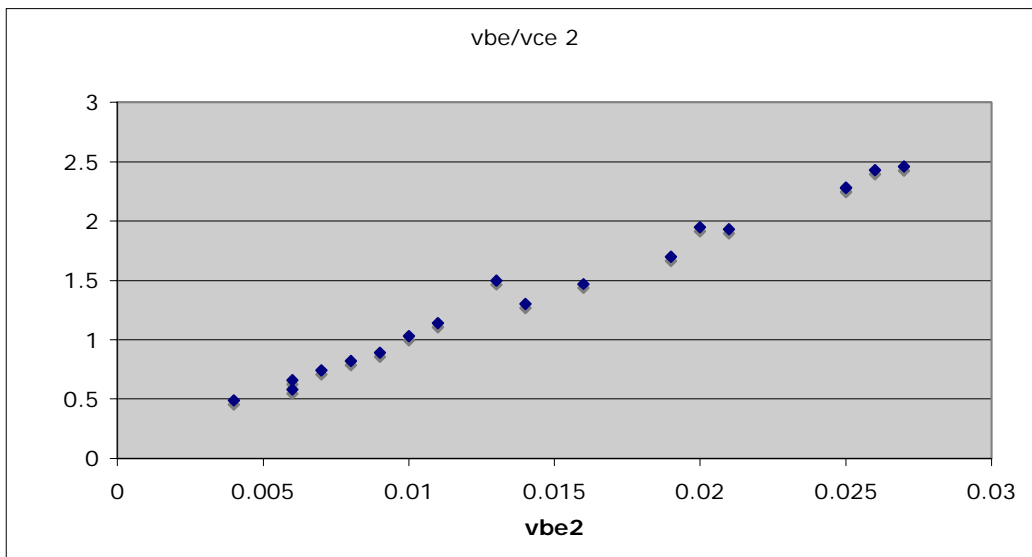


Fig. 71 - Voltaggio tra collettore ed emettitore in funzione al voltaggio tra base ed emettitore per il transistor Q2.

4.4. Osservazioni

Osservando il grafico riguardante il guadagno possiamo osservare che quest'ultimo segue un andamento relativamente regolare al variare della resistenza di POT1. Notiamo che per bassi valori di resistenza di POT1 questa regolarità viene interrotta. Il perché di questo lo si può scoprire ascoltando il suono della chitarra. Infatti, quando POT1 ha valori di resistenza prossimi a 0, notiamo una distorsione del suono. Ciò significa che uno dei transistor si trova a lavorare in zona di saturazione. Un transistor è in saturazione quando il segnale in ingresso supera un certo valore di corrente o di differenza di potenziale V_{be} e parte dell'onda del segnale viene tagliata. Per ovviare a questo problema è possibile porre una resistenza in serie a POT1 in modo che, anche per $R_{pot1}=0$ avremo un valore minimo di resistenza che impedisca la distorsione del segnale.

Analizzando i grafici riguardanti V_{be} e V_{ce} per i due transistor Q1 e Q2 (Fig. 70 e 71) troviamo la verifica sperimentale di ciò che è stato affermato nella parte teorica, ovvero che V_{be} e V_{ce} sono proporzionali tra loro e che a una maggiore V_{be} corrisponde una maggiore V_{ce} (vedi 3.5.1).

Conclusioni

Questo lavoro mi ha consentito di avvicinarmi all'elettronica con un approccio teorico confermato ed applicato in sperimentazioni pratiche.

La teoria da me studiata è la teoria basilare dell'elettronica e dell'elettrotecnica ed è certamente solo una piccola percentuale di tutta la teoria che regola questa branca della fisica. La mia preoccupazione principale è stata quella di redigere questo testo con un linguaggio semplice, spiegando i concetti nella maniera più comprensibile ed elementare possibile, in modo da rendere questo lavoro una base teorica avvicinabile da chiunque, anche da coloro che non hanno molta confidenza con la fisica e le scienze in generale. Mi ritengo soddisfatto della parte teorica del mio lavoro grazie alla quale ho sviluppato conoscenze basilari che sicuramente mi saranno ancora utili in futuro.

Mi ritengo inoltre soddisfatto della parte sperimentale che mi ha portato allo sviluppo di un'applicazione funzionante della teoria dell'amplificazione di segnali.

In generale, questo lavoro mi ha permesso di imparare un metodo di lavoro scientifico, che prevede dimostrazioni pratiche alla teoria.

Bibliografia

BOSSI, A., SESTO, E. (2002): Elettronica pratica, elementi fondamentali 1.
Milano: Utet periodici, editoriale delfino.

EDMINISTER, J. A. , NAHVI, M. (1997): Elettrotecnica, parte prima.
Milano: McGraw-Hill

GRILLONI, N. (2000): Elettronica analogica, manuale di progettazione.
Milano: Utet periodici, editoriale delfino.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. & WALKER, J. (2001): Fondamenti di fisica, elettromagnetismo.
Bologna: Zanichelli

HÜBSCHER, H., SZAPANSKI, R. (1989): Lezioni ed esercizi di elettronica.
Brescia: Editrice la scuola

TIPLER, P. A. (1991): Invito alla fisica.
Bologna: Zanichelli

<http://web.infinito.it/utenti/e/egidiorezzaghi/IAELETTT/TERZA/RETIEL/RETIEL32.HTM>

http://www.geofex.com/Article_Folders/bypass/bypass.htm

www.distrelec.com

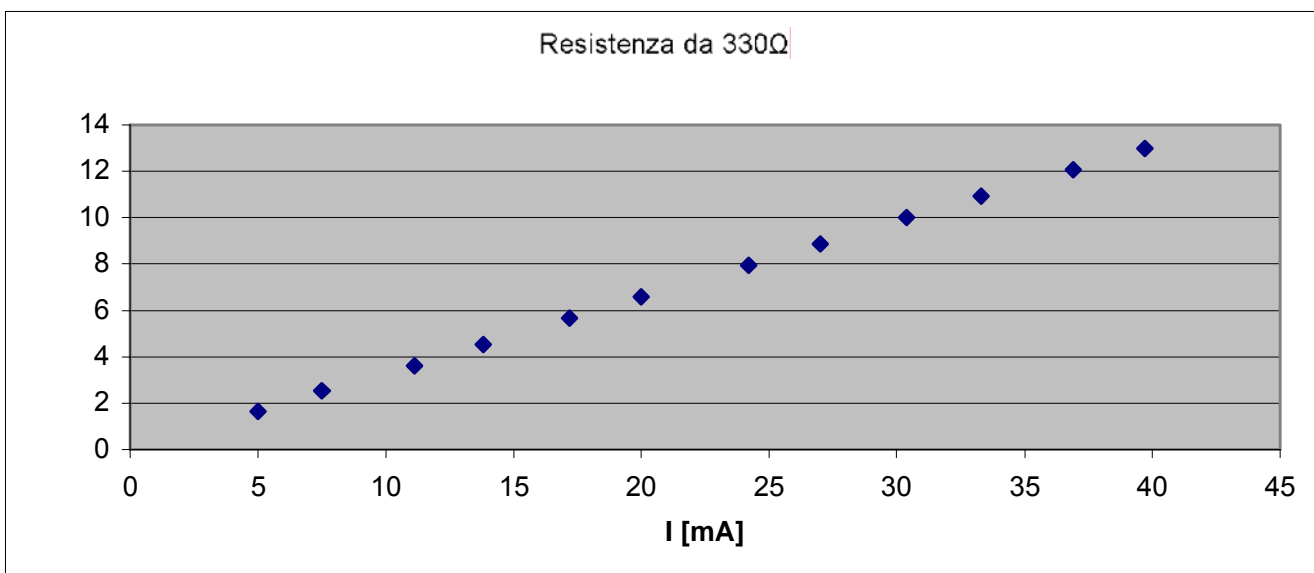
www.opitec.ch

Allegati

Risultati sperimentali: resistenza.

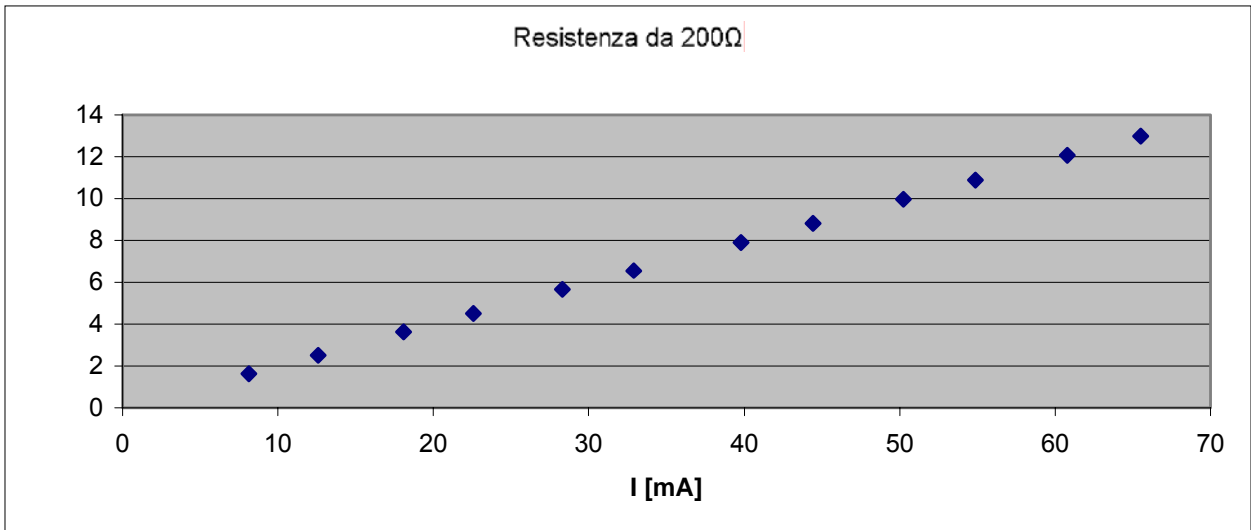
Resistenza da 330 Ω

U [V]	I [mA]
1.64	5
2.52	7.5
3.62	11.1
4.53	13.8
5.67	17.2
6.59	20
7.95	24.2
8.87	27
10	30.4
10.92	33.3
12.08	36.9
13	39.7



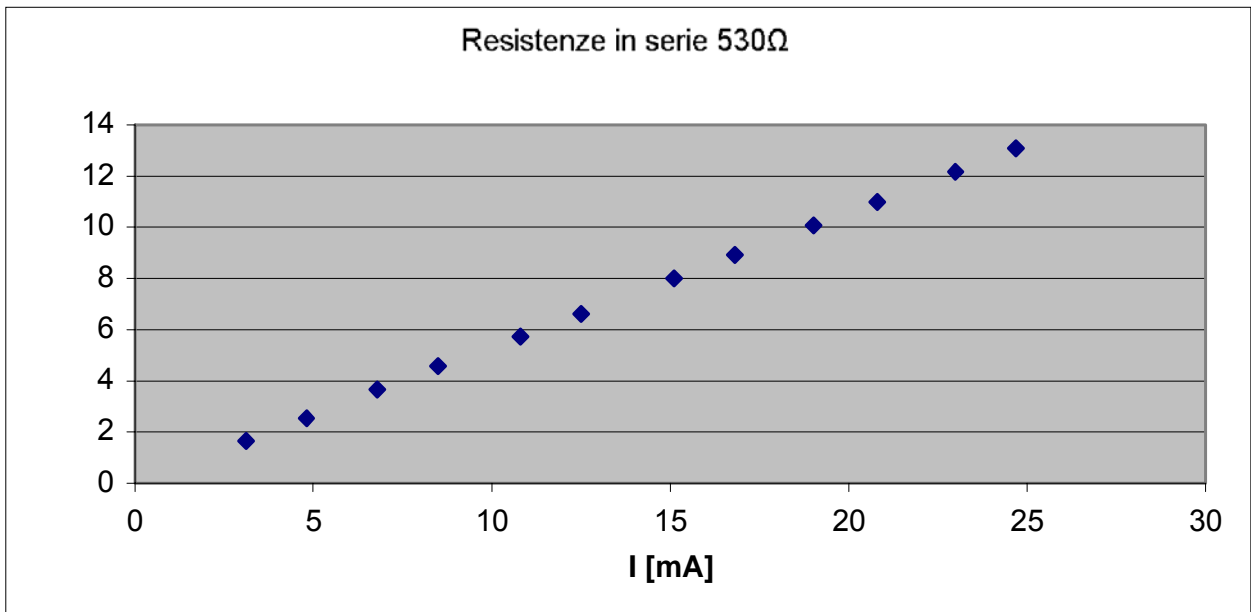
Resistenza da 200 Ω

U [V]	I [mA]
1.63	8.1
2.51	12.6
3.62	18.1
4.51	22.6
5.65	28.3
6.56	32.9
7.92	39.8
8.84	44.4
9.98	50.2
10.9	54.9
12.07	60.8
12.99	65.5



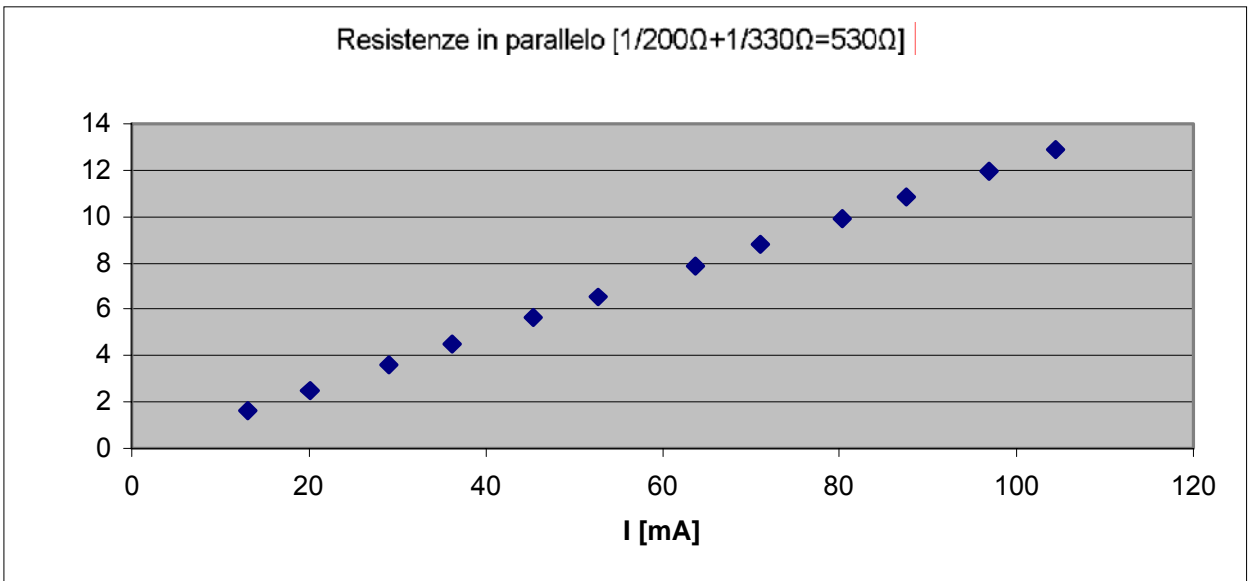
Resistenze in serie [$200\Omega + 330\Omega = 530\Omega$]

U [V]	I [mA]
1.65	3.1
2.54	4.8
3.65	6.8
4.57	8.5
5.72	10.8
6.63	12.5
8	15.1
8.93	16.8
10.08	19
11	20.8
12.16	23
13.08	24.7



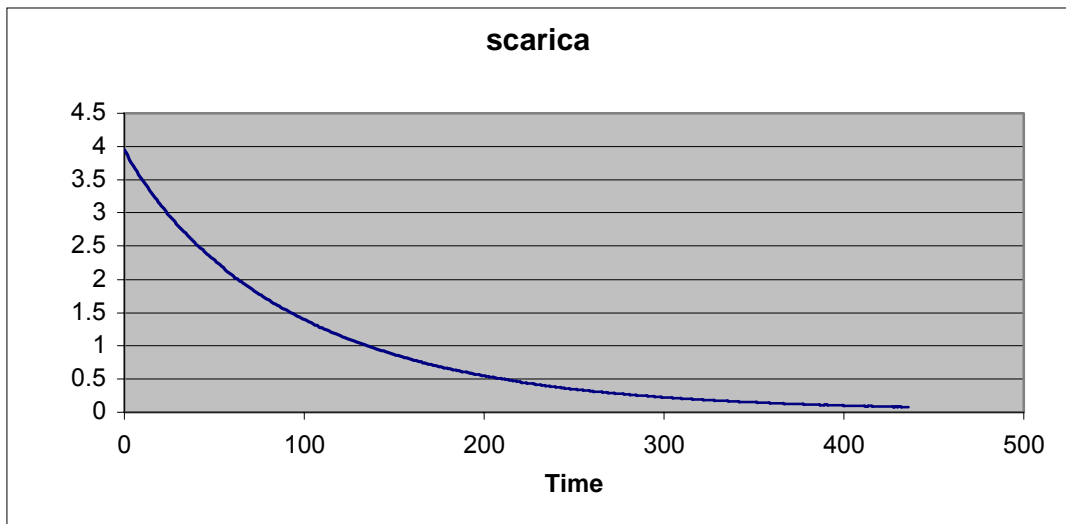
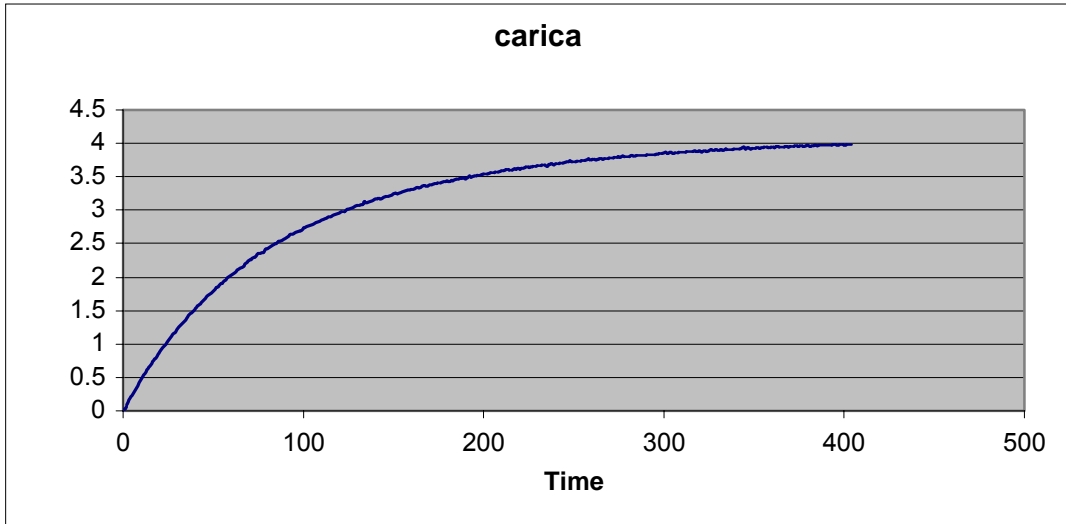
Resistenze in parallelo [$1/200\Omega+1/330\Omega=530\Omega$]

U [V]	I [mA]
1.62	13.1
2.5	20.1
3.6	29
4.5	36.2
5.63	45.4
6.54	52.7
7.89	63.7
8.81	71.1
9.93	80.3
10.84	87.6
11.97	96.9
12.89	104.4



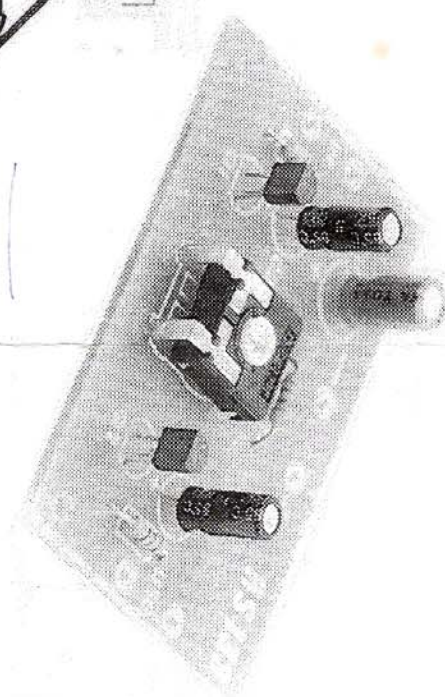
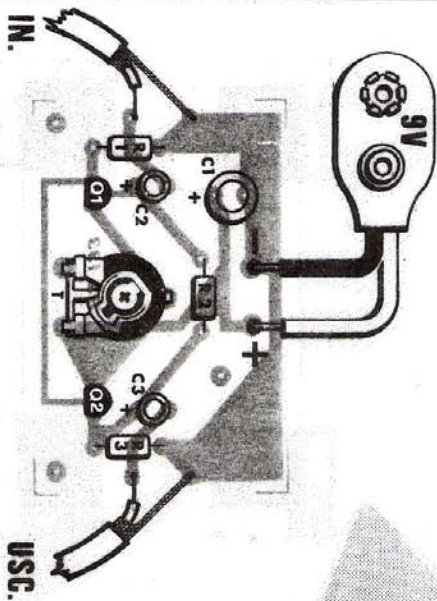
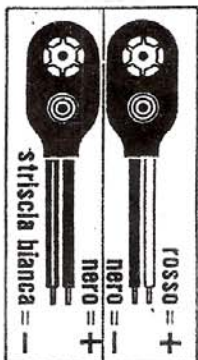
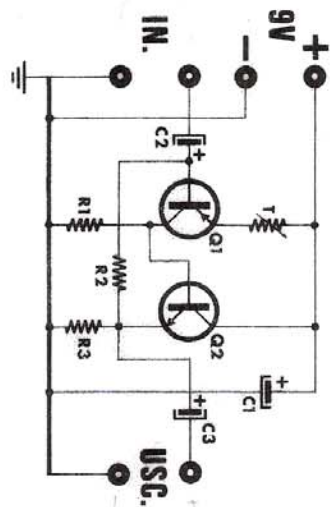
Risultati sperimentali: capacità.

Carica		Scarica	
Time (s)	Voltage (V)	Time (s)	Voltage(V)
0	0.01	0	3.95
1	0.029	1	3.897
2	0.098	2	3.848
3	0.137	3	3.799
4	0.195	4	3.75
5	0.234	5	3.711
6	0.278	6	3.662
7	0.327	7	3.618
8	0.371	8	3.574
9	0.42	9	3.535
10	0.469	10	3.496
11	0.518	11	3.457
12	0.552	12	3.418
13	0.61	13	3.379
14	0.635	14	3.34
15	0.674	15	3.301
16	0.713	16	3.262
17	0.757	17	3.228
18	0.791	18	3.193
19	0.83	19	3.154
20	0.864	20	3.125
21	0.913	21	3.091
22	0.947	22	3.057
23	0.977	23	3.023
24	1.016	24	2.988
25	1.05	25	2.959
26	1.084	26	2.925
27	1.118	27	2.896
28	1.162	28	2.866
29	1.182	29	2.832
30	1.221	30	2.803
31	1.255	31	2.774
32	1.289	32	2.744
33	1.318	33	2.715
34	1.348	34	2.691
35	1.377	35	2.661
36	1.411	36	2.632
37	1.445	37	2.608
38	1.47	38	2.578
39	1.499	39	2.554
40	1.533	40	2.524
41	1.558	41	2.5
42	1.587	42	2.476
43	1.606	43	2.451
44	1.641	44	2.422
45	1.665	45	2.402
46	1.704	46	2.373
47	1.724	47	2.354
48	1.748	48	2.329
49	1.763	49	2.305
50	1.797	50	2.285



PREAMPLIFICATORE PER CHITARRA

RS 133



Il KIT RS 133 è molto adatto ad essere impiegato in tutti i casi dove bisogna amplificare dei piccoli segnali senza intaccarne la fedeltà. Proprio per questa caratteristica è molto idoneo ad essere usato come preamplificatore per chitarra. Col trimmer T si regola l'amplificazione tra un minimo di 9,5 dB e un massimo di 40 dB, corrispondente ad un guadagno in tensione minimo di tre volte e massimo di 100 volte. La risposta in frequenza è praticamente uniforme tra 20 Hz e 150 KHz. Per l'alimentazione occorre una normale batteria per radioline da 9 V. L'assorbimento massimo è di circa 2 mA. Sia per l'ingresso che per l'uscita bisogna usare dei cavetti schermati; inoltre, a montaggio ultimato, si raccomanda di racchiudere il tutto in un contenitore metallico, collegando ad esso il negativo della batteria, onde evitare di captare fastidiosi ronzii esterni. Per il montaggio dei componenti occorre atenersi allo schema pratico.

ELENCO COMPONENTI

- Q1 = BC 307
- Q2 = BC 239
- T = TRIMMER 10 Kohm
- R1 = 27 Kohm
- R2 = 4,7 Kohm
- R3 = 3,3 Kohm
- C1 = 100 µF 16 V elettrol.
- C2 = 1 µF 16 V elettrol.
- C3 = 10 µF 16 V elettrol.
- M.1 CLIP per pila 9V

BY ELETTRONICA SESTRESE S.R.L.

Circuito preamplificatore.