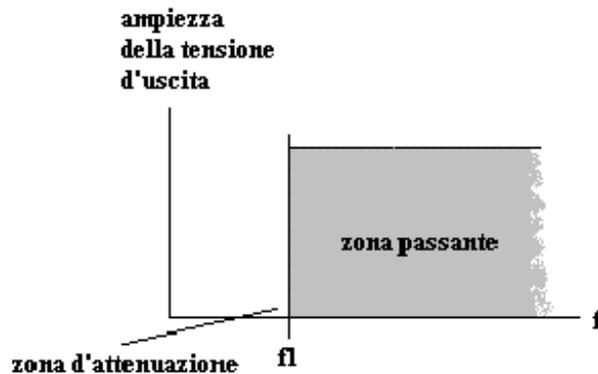


## 5.2 Filtri passa alto passivi

Un filtro passa alto **ideale** è un circuito che ha il compito di consentire il passaggio di tensioni elettriche la cui frequenza può essere compresa tra  $f_1$  e valori superiori ad  $f_1$ ; sotto la frequenza  $f_1$  tutte le tensioni vengono bloccate e all'uscita del filtro non si ha alcun segnale, l'andamento grafico di questo comportamento è riportato in figura 5.9.

figura 5.9



In figura sono evidenziate le due zone caratteristiche del filtro, la zona passante, entro la quale i segnali d'ingresso possono transitare purché abbiano frequenze superiori ad  $f_1$ , e la zona non passante, nella quale nessun segnale avente frequenza inferiore ad  $f_1$  può transitare.

Il comportamento di un filtro passa alto **reale** ha però un comportamento molto diverso nell'intervallo di frequenze che precede e che segue il valore di  $f_1$ ; il percorso tra zona passante e zona non passante non avviene bruscamente, come in figura 5.9, ma gradualmente, secondo una curva caratteristica la cui pendenza è tanto più elevata quanto maggiore è la complessità del circuito passa alto, si ha perciò una curva di risposta reale del tipo di quella indicata in figura 5.10.

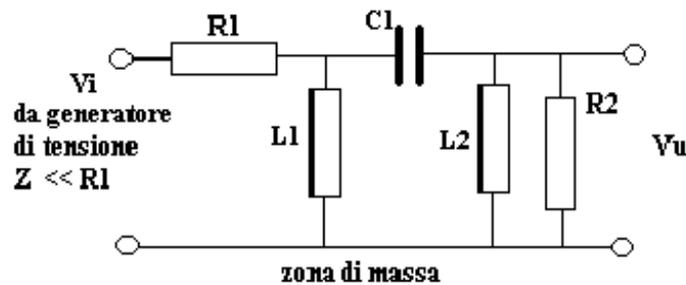
figura 5.10



In figura 5.10 si vede come la risposta del filtro passa alto consenta di attenuare le frequenze inferiori ad  $f_1$  secondo una certa curva caratterizzata dal punto di ascissa  $f_1$  ed ordinata  $-3$  dB e dalla pendenza della curva stessa espressa in dB/ottava; il valore di  $f_1$  è detto frequenza di taglio.

Lo schema elettrico di un filtro passa alto, nella configurazione circuitale più semplice, detta “cellula”, è mostrato in figura 5.11.

figura 5.11

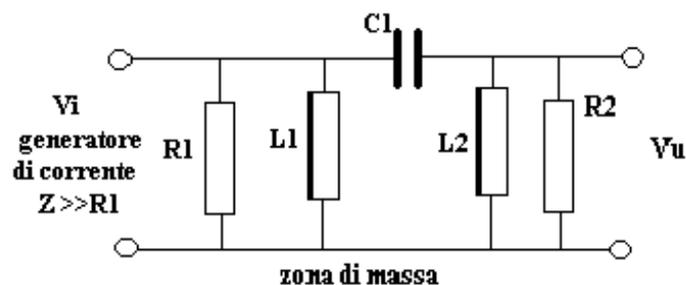


Nella figura si vedono i componenti che costituiscono la struttura filtrante, due resistenze R1 ed R2, uguali tra loro, due induttanze L1 ed L2, anch'esse uguali tra loro ed una capacità C1. La tensione del segnale d'ingresso, Vi, è applicata in serie alla resistenza R1; il segnale d'uscita Vu è presente ai capi di R2.

Questa configurazione della cellula necessita di un segnale d'ingresso il cui generatore abbia un'impedenza molto più bassa del valore di R1. Si dice in questo caso che il generatore deve essere un “generatore di tensione”, ciò comporta una perdita di 6 dB (2 volte), perdita d'inserzione, per la partizione della tensione Vi da parte di R1 ed R2.

Un circuito filtrante con le stesse caratteristiche di risposta di quello mostrato in figura 5.11 è realizzabile per il filtraggio di segnali prodotti da “generatori di corrente”, generatori che hanno un'impedenza molto più elevata di R1, lo schema di questo filtro è mostrato in figura 5.12.

figura 5.12



In questo circuito la tensione d'ingresso è applicata in parallelo ad R1 ed il segnale d'uscita Vu, come nel circuito precedente, è presente ai capi di R2; in questo caso la tensione Vi non subisce nessuna perdita d'inserzione.

Il progetto di entrambi i filtri passa alto sopra illustrati è fattibile, con semplici formule di calcolo, mediante il dimensionamento dei componenti in dipendenza del valore voluto della frequenza di taglio f1; le formule in oggetto sono le seguenti:

$$C = 1 / ( 4 * \pi * f1 * R )$$

$$L = R / ( 2 * \pi * f1 )$$

dove

C è espresso in Farad

L è espresso in Henry

Per le soluzioni circuitali alle quali si applicano le formule indicate si hanno le seguenti caratteristiche:

**Filtro passa alto con segnale Vi da generatore di tensione**

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -3dB – 6 dB = -9 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di  $f_1$ ; Att. = -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

**Filtro passa alto con segnale Vi da generatore di corrente**

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = 0 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -3dB – 0dB = -3 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di  $f_1$ ; Att.= -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

**Sviluppiamo ora il consueto esercizio sull'argomento:**

***Dati di progetto:***

Sia da realizzare un filtro passa alto in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una  $Z_u = 20 \text{ ohm}$ , si voglia una frequenza di taglio  $f_1 = 10000 \text{ Hz}$  ed una pendenza di -18 dB/ottava.

***Dimensionamento della resistenza d'ingresso:***

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.11 per cui: Il valore di  $R_1$  deve essere commisurato al valore di  $Z_u = 20 \text{ ohm}$  quindi dovrà essere:

$$R_1 \gg Z_u$$

ovvero

$$R_1 \gg 20 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile\* che  $R_1$  sia almeno 100 volte il valore di  $Z_u$  quindi

$$R_1 = 2000 \text{ ohm.}$$

Dato che  $R_1 = R_2$  si ha

$$R_2 = 2000 \text{ ohm}$$

\*La possibilità che  $R_1$  possa essere del valore calcolato dipende dai valori di  $L$  e di  $C$  che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili il dato di  $R_1$  sarà accettabile altrimenti dovrà essere rivisto.

***Calcolo di L e C:***

Dati  $f_1 = 1000 \text{ Hz}$  e  $R = 2000 \text{ ohm}$

il calcolo di  $L$  si effettua con la formula:

$$L = R / (2 * \pi * f_1) = 2000 \text{ ohm} / (3.14 * 10000 \text{ Hz}) = 63.7 \text{ mH}$$

Quindi  $L1 = L2 = 63.7 \text{ mH}$

il calcolo di  $C1$  si effettua con la formula:

$$C1 = 1 / ( 4 * \pi * f1 * R ) = 1 / ( 4 * 6.28 * 10000 \text{ Hz} * 2000 \text{ ohm} ) = 1990 \text{ pF}$$

( con precisione dell'1.25 % )

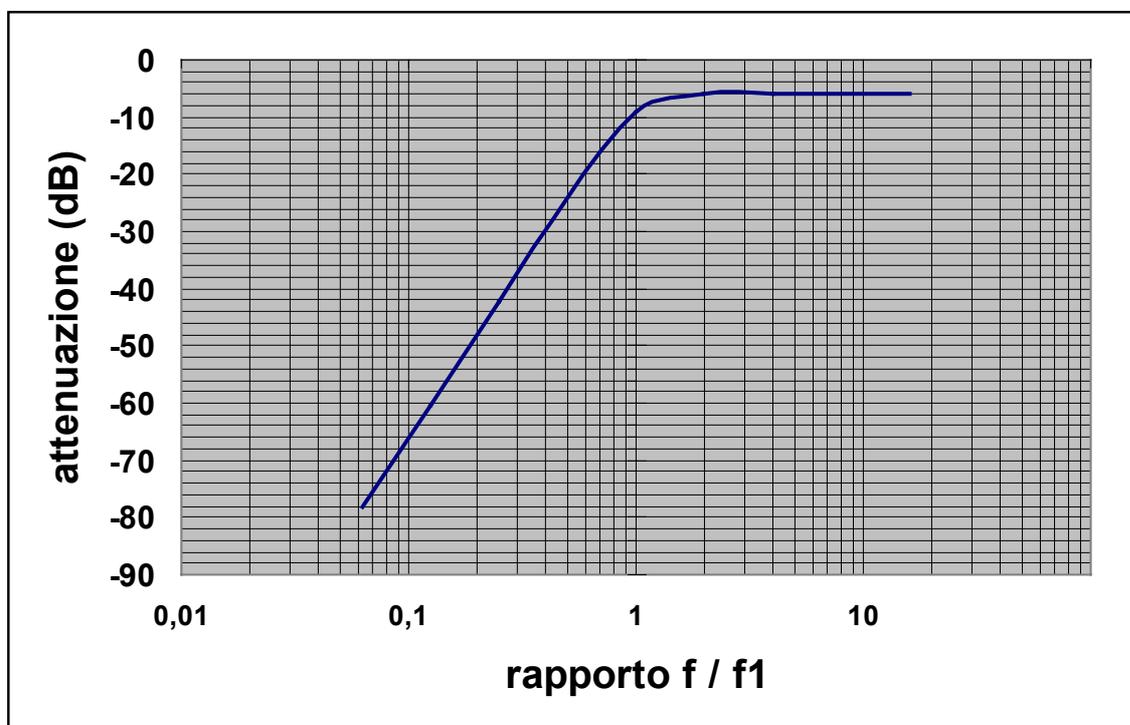
Entrambi i componenti calcolati sono di valore accettabile, quindi il valore di  $R = 2000 \text{ ohm}$  è adatto al progetto.

### **Tracciamento della curva di risposta:**

Poter disporre dell'andamento grafico della curva di risposta del filtro è utile per il controllo della normale funzionalità del circuito una volta costruito.

Utilizziamo una curva di risposta universale adatta alla cellula di figura 5.11; questa curva è tracciata nella figura 5.13.

figura 5.13



La curva di risposta universale ha, in ascisse logaritmiche, il rapporto  $f/f_1$ , ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 2 dB per divisione.

Per utilizzare la curva di figura 5.13 dobbiamo determinare il rapporto  $f/f_1$  per ciascuna frequenza per la quale desideriamo stabilire l'attenuazione prodotta dal filtro; se vogliamo ad esempio conoscere l'attenuazione del nostro filtro alla frequenza  $f = 4000 \text{ Hz}$  dobbiamo:

1) calcolare il rapporto:

$$f / f1 = 4000 \text{ Hz} / 10000 \text{ Hz} = 0.4$$

2) tracciare una perpendicolare dall'ascissa d'ampiezza 0.4 e trovare il punto d'incontro con la curva

3) tracciare una perpendicolare dal punto d'incontro all'asse delle ordinate sul quale si leggerà il valore d'attenuazione di circa 30 dB.

### **Osservazioni generali:**

Il progetto della cellula passa alto si conclude con alcune osservazioni che ne chiariscono meglio il funzionamento:

Del filtro di cui abbiamo trattato s'è detto che nella zona d'attenuazione la pendenza è di  $-18 \text{ dB / ottava}$ , questa caratteristica è controllabile soltanto per valori di frequenza lontani dalla frequenza di taglio  $f_1$ . Un'idea quantitativa di questo comportamento si ha immediatamente dall'esame della curva di risposta di figura 5.13; se consideriamo l'attenuazione al punto d'ascissa 1 con il punto d'ascissa 0.5, corrispondenti a due frequenze l'una la metà dell'altra, si vede che nel primo punto l'attenuazione è di  $-9 \text{ dB}$  e nel secondo punto di  $-24 \text{ dB}$  con un salto di  $15 \text{ dB}$  contro i  $18$  che sono la caratteristica teorica della cellula. Se ora esaminiamo altri due punti della curva più lontani da  $f_1$ , il punto di ascissa 0.2 e il punto di ascissa 0.1, corrispondenti anch'essi a due frequenze l'una la metà dell'altra, riscontriamo per il primo un'attenuazione di  $-48 \text{ dB}$  e per il secondo un'attenuazione di  $-66 \text{ dB}$  con un salto di  $18 \text{ dB}$  che coincide al valore teorico della pendenza di  $-18 \text{ dB/ottava}$  dichiarata per questo tipo di cellula.

### **Sviluppiamo ora un esercizio per l'impiego della configurazione passa alto di figura 5.12:**

#### **Dati di progetto:**

Sia da realizzare un filtro passa alto in grado di essere accoppiato ad un generatore di corrente avente una  $Z_u = 150000 \text{ ohm}$ , si voglia una frequenza di taglio  $f_1 = 2000 \text{ Hz}$  ed una pendenza di  $-18 \text{ dB/ottava}$ .

#### **Dimensionamento della resistenza d'ingresso:**

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.12 per cui:

Il valore di  $R_1$  deve essere commisurato al valore di  $Z_u = 150000 \text{ ohm}$  quindi dovrà essere:

$$R_1 \ll Z_u$$

ovvero

$$R_1 \ll 150000 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile\*, che  $R_1$  sia almeno  $1/100$  il valore di  $Z_u$  quindi

$$R_1 = 1500 \text{ ohm.}$$

Dato che  $R_1 = R_2$  si ha

$$R_2 = 1500 \text{ ohm}$$

\*La possibilità che  $R_1$  possa essere del valore calcolato dipende dai valori di  $L$  e di  $C$  che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili, il dato di  $R_1$  sarà accettabile, altrimenti dovrà essere rivisto.

#### **Calcolo di L e C:**

Dati  $f_1 = 2000 \text{ Hz}$  e  $R = 1500 \text{ ohm}$

il calcolo di  $L_1$  ed  $L_2$  si effettua con la formula:

$$L_1 = L_2 = R / (2 * \pi * f_1) = 1500 \text{ ohm} / (2 * 3.14 * 2000 \text{ Hz}) = 119.4 \text{ mH}$$

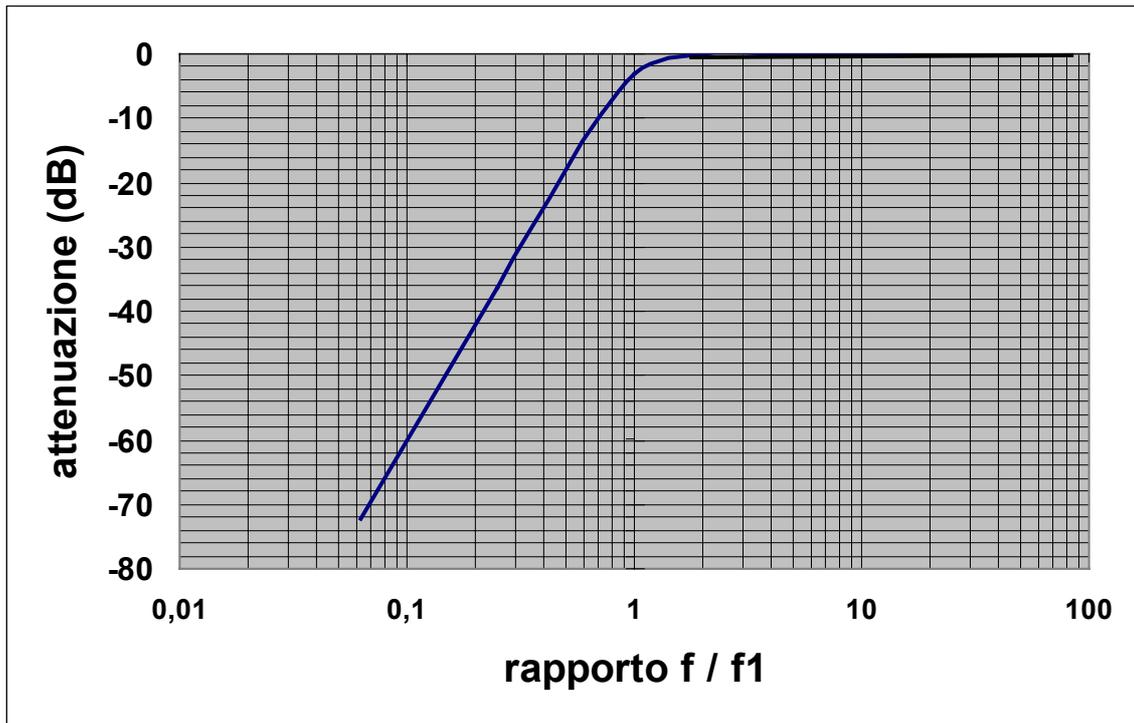
il calcolo di C1 si effettua con la formula:

$$C1 = 1 / (4 * \pi * f1 * R) = 1 / (4 * 3.14 * 2000 \text{ Hz} * 1500 \text{ ohm}) = 26539 \text{ pF}$$

**Tracciamento della curva di risposta:**

La curva di risposta di questo filtro ha l'identico profilo di quella tracciata in figura 5.13 ma non presenta l'attenuazione d'inserzione di  $-6 \text{ dB}$  essendo pilotato di corrente invece che di tensione; la risposta del nuovo passa alto è riportata in figura 5.14.

figura 5.14



La curva di risposta universale ha, in ascisse logaritmiche, il rapporto  $f/f1$ , ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di  $2 \text{ dB}$  per divisione.

Il filtro presenta attenuazione  $0 \text{ dB}$  nella zona passante e  $-3 \text{ dB}$  in corrispondenza alla frequenza di taglio  $f1 = 2000 \text{ Hz}$ , così come si evince dal punto d'ascissa 1, calcolato dal rapporto tra  $f = 2000 \text{ Hz}$  ed  $f1 = 2000 \text{ Hz}$ :

$$f/f1 = 2000 \text{ Hz} / 2000 \text{ Hz} = 1$$

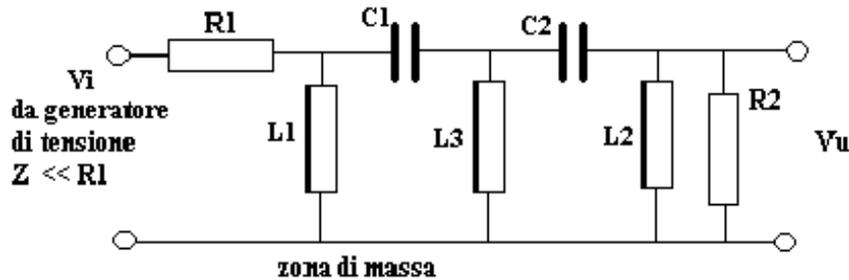
La pendenza è controllabile tra  $f/f1 = 0.2$  e  $f/f1 = 0.1$ ; in questo intervallo, sensibilmente inferiore alla frequenza di taglio, è di  $-18 \text{ dB/ottava}$ .

Si ricorda, come già detto in precedenza, che in questo tipo di filtro, pur non essendo presente l'attenuazione d'inserzione, non si ha un miglioramento nel rapporto tra ampiezza delle tensioni nella zona passante e le tensioni nella zona d'attenuazione.

### 5.2.1 Il filtro passa alto a più cellule

Per ottenere filtri passa alto con attenuazioni fuori banda aventi pendenze superiori a quelle ottenibili con filtri ad una cellula, si possono realizzare strutture con più cellule uguali tra loro. Un esempio di questa nuova configurazione a due cellule, derivata dalla struttura di figura 5.11, è riportata in figura 5.15.

figura 5.15



Il nuovo filtro è composto dalle due resistenze di terminazione R1 ed R2 di valore uguale, le induttanze L1 ed L2 uguali tra loro, i condensatori C1 e C2 anch'essi di valore uguale tra loro ed infine dall'induttanza L3 di valore dimezzato rispetto ad L1.

Le formule di calcolo dei componenti sono le stesse illustrate nel paragrafo 5.2, che qui riassumiamo, data la presenza di L3

$$C1 = C2 = 1 / ( 4 * \pi * f1 * R )$$

$$L1 = L2 = R / ( 2 * \pi * f1 )$$

$$L3 = L2 / 2$$

Si deve osservare che in questa configurazione compaiono soltanto 5 componenti reattivi dato che, a seguito dell'unione tra due cellule, la reattanza L3 ne sostituisce due; il circuito è pertanto da considerarsi, al fine dei calcoli, come se avesse 6 componenti reattivi.

La nuova struttura consente un'attenuazione fuori banda con una pendenza di -36 dB per ottava, con un taglio di -6 dB, rispetto alla banda passante, in corrispondenza della frequenza di taglio f1.

Sintetizzando:

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 6 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -6dB - 6 dB = -12 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di f1; Att. = -36 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 63 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

Anche per questa configurazione risulta utile lo sviluppo di un esercizio:

#### **Dati di progetto:**

Sia da realizzare un filtro passa alto in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una  $Z_u = 10 \text{ ohm}$ , si voglia una frequenza di taglio  $f1 = 1000 \text{ Hz}$  ed una pendenza di -36 dB/ottava.

#### **Dimensionamento della resistenza d'ingresso:**

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.15, per cui: Il valore di R1 deve essere commisurato al valore di  $Z_u = 10 \text{ ohm}$ , quindi dovrà essere:

$$R1 \gg Z_u$$

ovvero

$$R1 \gg 10 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile\*, che R1 sia almeno 100 volte il valore di Zu, quindi

$$R1 = 1000 \text{ ohm.}$$

Dato che  $R1 = R2$ , si ha

$$R2 = 1000 \text{ ohm}$$

\*La possibilità che R1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili il dato di R1, sarà accettabile, altrimenti, dovrà essere rivisto.

### **Calcolo di L1; L2; L3 C1; C2;:**

Dati  $f1 = 1000 \text{ Hz}$  e  $R1=R2 = 1000 \text{ ohm}$

il calcolo di  $L1 = L2$  si effettua con la formula:

$$L1=L2=R/(2 * \pi * f1 )=1000 \text{ ohm}/(2 * 3.14 * 1000 \text{ Hz})=159.2 \text{ mH}$$

$$L3 = L1 / 2 = 159.2 \text{ mH} / 2 = 79.6 \text{ mH}$$

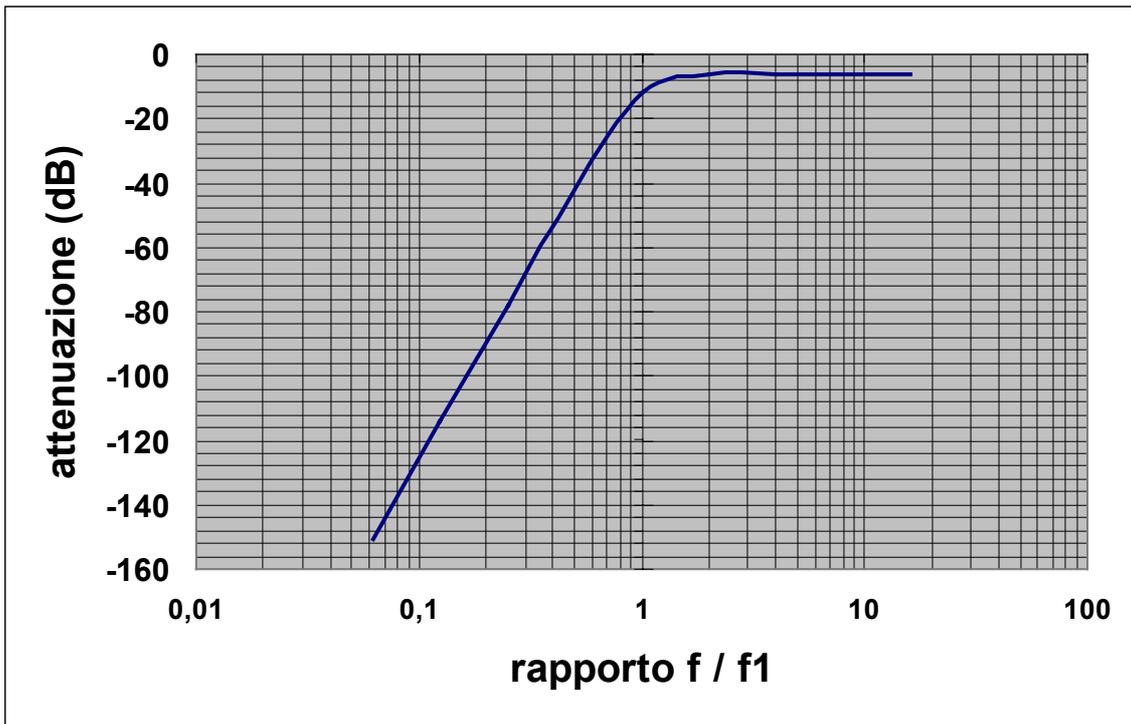
il calcolo di C1 e C2 si effettua con la formula:

$$C1 = C2 = 1 / ( 4 * \pi * f1 * R ) = 1 / ( 12.56 * 1000 \text{ Hz} * 1000 \text{ ohm} ) = 79617 \text{ pF}$$

( con precisione dell'1.25 %)

### **Tracciamento della curva di risposta:**

La curva di risposta universale di questo filtro ha un profilo diverso di quella tracciata in figura 5.14 ed è riportata in figura 5.16  
figura 5.16



La curva di risposta ha in ascisse il rapporto  $f/f_1$ , ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 4 dB per divisione per un totale di 160 dB.

Per utilizzare la curva di figura 5.16 dobbiamo determinare il rapporto  $f / f_1$  per ciascuna frequenza per la quale desideriamo stabilire l'attenuazione prodotta dal filtro; se vogliamo ad esempio conoscere l'attenuazione del nostro filtro alla frequenza  $f = 100$  Hz dobbiamo:

1) calcolare il rapporto:

$$f / f_1 = 100 \text{ Hz} / 1000 \text{ Hz} = 0.1$$

2) tracciare una perpendicolare dall'ascissa d'ampiezza 0.1 e trovare il punto d'incontro con la curva

3) tracciare una perpendicolare dal punto d'incontro all'asse delle ordinate sul quale si leggerà il valore d'attenuazione di circa 125 dB.

### **Osservazioni generali:**

Il progetto della doppia cellula passa alto si conclude con alcune osservazioni che ne chiariscono meglio il funzionamento:

Del filtro di cui abbiamo trattato s'è detto che nella zona d'attenuazione la pendenza è di  $-36$  dB / ottava; questa caratteristica è controllabile soltanto per valori di frequenza lontani dalla frequenza di taglio  $f_1$ . Un'idea quantitativa di questo comportamento si ha immediatamente dall'esame della curva di risposta di figura 5.16; se consideriamo l'attenuazione al punto d'ascissa 1 con il punto d'ascissa 0.5, corrispondenti rispettivamente a due frequenze l'una il doppio dell'altra, si vede che nel primo punto l'attenuazione è di  $-12$  dB e nel secondo punto di  $-40$  dB con un salto di 28 dB contro i 36 che sono la caratteristica teorica della doppia cellula. Se ora esaminiamo altri due punti della curva più lontani da  $f_1$ , il punto di ascissa 0.2 e il punto di ascissa 0.1, riscontriamo per il primo un'attenuazione di  $-88$  dB e per il secondo un'attenuazione di circa  $-125$  dB con un salto di 37 dB che si avvicina sensibilmente al valore teorico della pendenza di  $-36$  dB/ottava dichiarata per questo tipo di configurazione.