

Sumário

Introdução	5
Amplificadores em cascata	6
Ganho total de um amplificador com estágios em cascata	6
Acoplamento entre estágios amplificadores	8
Casamento de impedâncias	12
Ganho em decibel	13
Obtenção da razão entre sinais a partir do valor em dB	15
Apêndice	18
Questionário	18
Bibliografia	18



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os aparelhos eletrônicos tais como o rádio e a televisão recebem um *signal* que é emitido pela antena da estação transmissora. Esse sinal, quando chega ao aparelho receptor, tem uma amplitude muito pequena, geralmente da ordem de alguns microvolts. Antes de assumir sua forma final de som ou imagem, o sinal necessita ser amplificado milhares de vezes. Essa grande amplificação não pode ser realizada por um único estágio amplificador. Utilizam-se, então, diversos estágios amplificadores em seqüência numa forma de ligação denominada de **ligação em cascata**.

O objetivo deste fascículo é apresentar a forma e as características da ligação em cascata entre estágios amplificadores, visando a capacitar o leitor, através da análise de funcionamento, a identificar e corrigir defeitos nesse tipo de circuito composto.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Amplificador na configuração emissor comum.
- Amplificador na configuração base comum.
- Amplificador na configuração coletor comum.

Amplificadores em cascata

Em muitas ocasiões o ganho de tensão ou de corrente fornecido por um estágio amplificador isolado não é suficiente para uma dada aplicação. Nessas ocasiões costumam-se utilizar dois ou mais amplificadores, interligados de forma a se obterem ampliações sucessivas do sinal, conforme ilustrado na Fig.1.

Para se obterem ampliações sucessivas, a conexão entre os estágios amplificadores deve ser feita, como sugerido pela Fig.1, ou seja, com a saída do primeiro estágio ligado à entrada do segundo, cuja saída é por sua vez ligada à entrada do terceiro estágio e assim sucessivamente. Esse tipo de ligação entre estágios amplificadores é denominado de **ligação em cascata**.

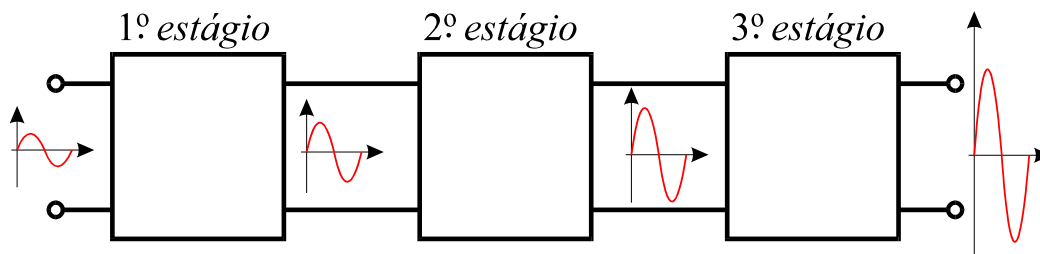


Fig.1 Conexão em cascata de estágios amplificadores.

GANHO TOTAL DE UM AMPLIFICADOR COM ESTÁGIOS EM CASCATA

O ganho total de um amplificador é resultante das ampliações parciais sofridas pelo sinal nos diversos estágios, e pode ser determinado pela razão entre o sinal presente na saída do último estágio amplificador e aquele aplicado à entrada do primeiro estágio amplificador, ou seja,

$$G = \frac{S_{saída}}{S_{entrada}} \quad (1)$$

onde:

- $S_{saída}$ = amplitude *pp* do sinal na saída do último estágio.
- $S_{entrada}$ = amplitude *pp* do sinal na entrada do primeiro estágio.

Exemplo 1: Para o amplificador de dois estágios mostrado na **Fig.2**, determinar a amplitude *pp* do sinal de saída e o ganho do amplificador.

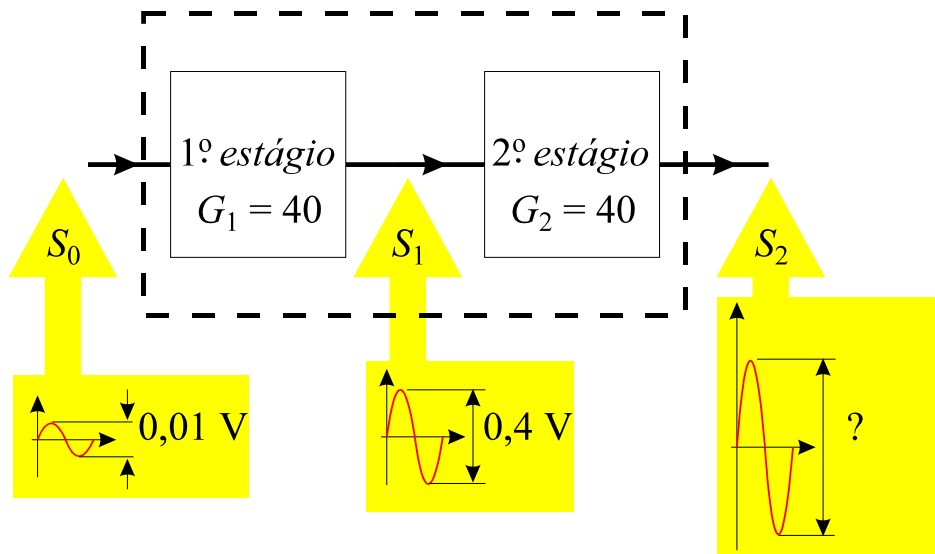


Fig.2 Amplificador de dois estágios referente ao **Exemplo 1**.

O ganho de cada amplificador mostrado na **Fig.2** é 40. Com um sinal de amplitude $S_0 = 0,01$ Vpp presente na entrada, após a primeira amplificação o sinal terá uma amplitude S_1 dada por

$$S_1 = G_1 S_0 = 40 \times 0,01 = 0,4 \text{ Vpp}$$

Após a segunda amplificação a amplitude do sinal se torna

$$S_2 = G_2 S_1 = 40 \times 0,4 = 16 \text{ Vpp}$$

O ganho do amplificador é portanto

$$G = \frac{S_2}{S_0} = \frac{16 \text{ Vpp}}{0,01 \text{ Vpp}} = 1.600$$

O ganho do amplificador poderia também ser obtido, notando que

$$\begin{aligned} S_2 &= G_2 S_1, S_1 = G_1 S_0 \Rightarrow S_2 = G_2(G_1 S_0) \\ &\Rightarrow S_2 = (G_2 G_1) S_0 \end{aligned}$$

e o ganho do amplificador é simplesmente o produto dos ganhos de cada estágio individual:

$$G = G_2 G_1$$

Para o caso presente obtém-se

$$G = 40 \times 40 = 1.600$$

Os resultados obtidos no **Exemplo 1**, permitem expressar o ganho de um amplificador consistindo em vários estágios em cascata através da expressão geral

$$G = G_1 G_2 G_3 \dots \quad (2)$$

onde $G_1, G_2, G_3 \dots$ representam os ganhos individuais de cada estágio do amplificador.

ACOPLAMENTO ENTRE ESTÁGIOS AMPLIFICADORES

Os estágios amplificadores devem ser interligados ou acoplados entre si para que o sinal seja sucessivamente amplificado. Entretanto, o acoplamento da saída de um estágio à entrada do estágio seguinte não pode ser realizado pela simples ligação direta, através de um condutor.

Esse tipo de limitação pode ser verificado analisando-se o acoplamento entre dois estágios amplificadores, conforme ilustrado na **Fig.3**.

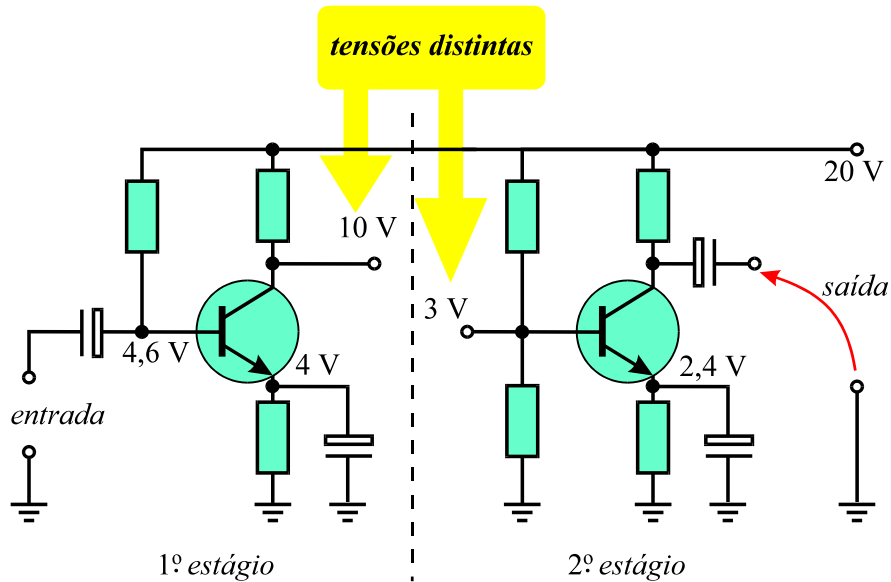


Fig.3 Estágios amplificadores de características distintas.


Como se pode observar na **Fig.3**, no ponto de operação de cada estágio tem-se que:

- A tensão na saída do 1º estágio é de 10 V.
- A tensão na entrada do 2º estágio é de 3V.

Comparando-se os dois valores de tensão, verifica-se que é impossível conectar a saída do primeiro estágio diretamente à entrada do segundo pois a tensão de 10 V seria aplicada à base do transistor do segundo estágio, alterando assim o seu ponto de operação. Conclui-se desse exemplo, que o acoplamento entre estágios deve ser feito de forma que:

- A tensão contínua de saída de um estágio não seja aplicada à entrada do estágio seguinte.
- O sinal de saída de um estágio seja transferido inalterado para a entrada do estágio seguinte.

Pode-se extrair portanto a seguinte conclusão:

 ***O acoplamento entre estágios amplificadores distintos deve ser realizado de forma a bloquear a passagem de tensões contínuas e permitir a passagem de tensões alternadas.***

O emprego de capacitores ou transformadores na interconexão entre estágios distintos de um amplificador permite realizar o bloqueio de *cc* e a passagem de sinais *ca*. As **Figs.4** e **5** ilustram como seria realizado o acoplamento entre estágios, com o emprego de um capacitor e de um transformador, respectivamente.

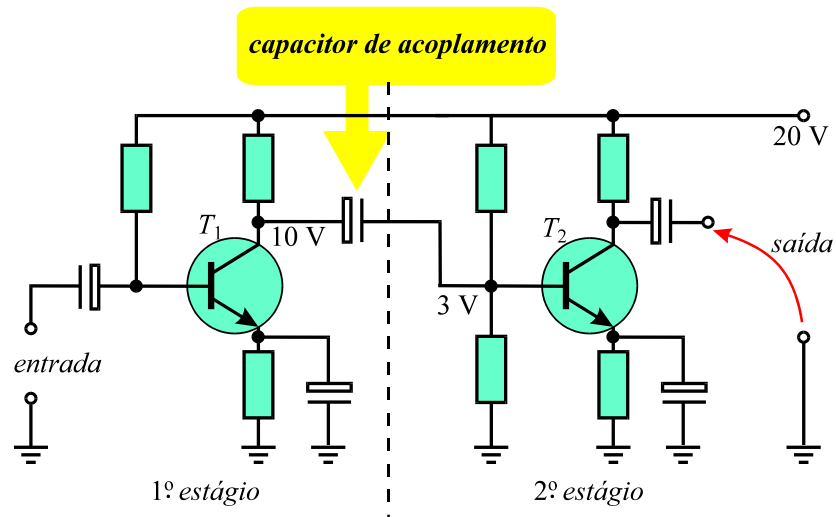


Fig.4 Acoplamento entre estágios com o emprego de um capacitor.

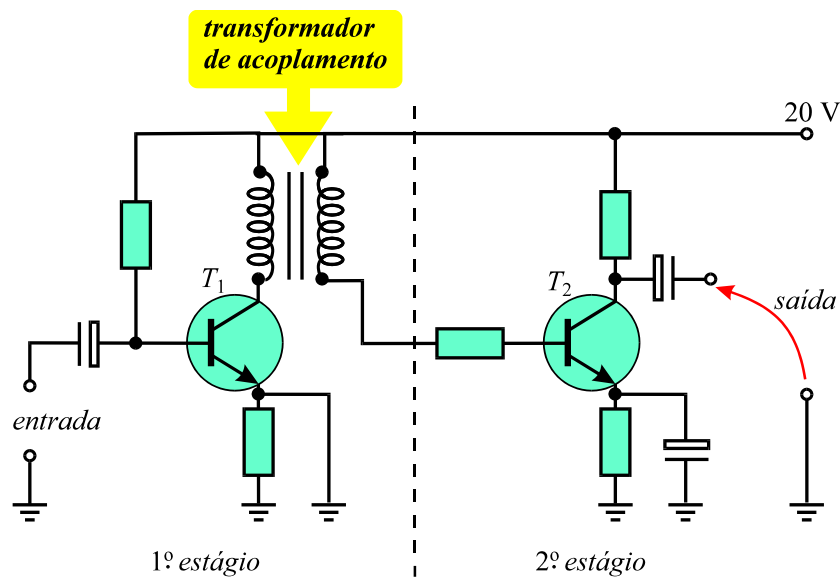


Fig.5 Acoplamento entre estágios com o emprego de um transformador.

É importante salientar que a utilização de transformadores de acoplamento implica a mudança do método de polarização do transistor T_2 , mostrado na **Fig.5**, uma vez que aquele componente passa a ser polarizado por corrente de base constante. Esse fato, acrescido ao custo relativamente mais alto de transformadores, favorece o emprego mais freqüente de capacitores como

elementos de acoplamento, por serem de baixo custo e por não demandarem modificações no projeto do circuito.

A **Fig.6** ilustra a eliminação do nível *cc* do sinal na entrada do 2º estágio amplificador com o uso de um capacitor de acoplamento.

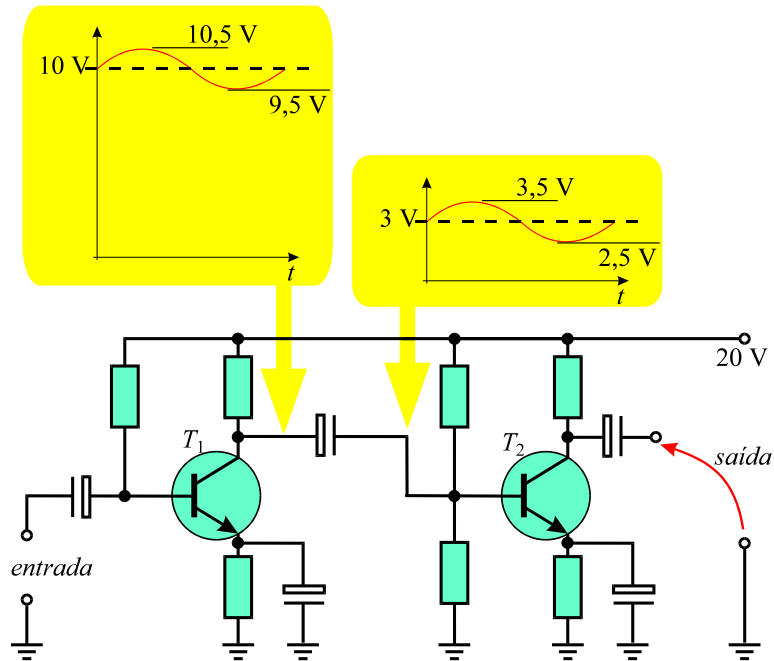


Fig.6 Eliminação do nível *cc* do sinal na entrada do segundo estágio amplificador, através de um capacitor de acoplamento.

Um aspecto importante a se considerar no acoplamento é que o capacitor ou transformador de acoplamento não são ideais. Tomando-se como exemplo o uso de um capacitor de acoplamento, como ilustrado na **Fig.7**, verifica-se que a reatância do capacitor provoca uma queda de tensão entre os seus terminais.

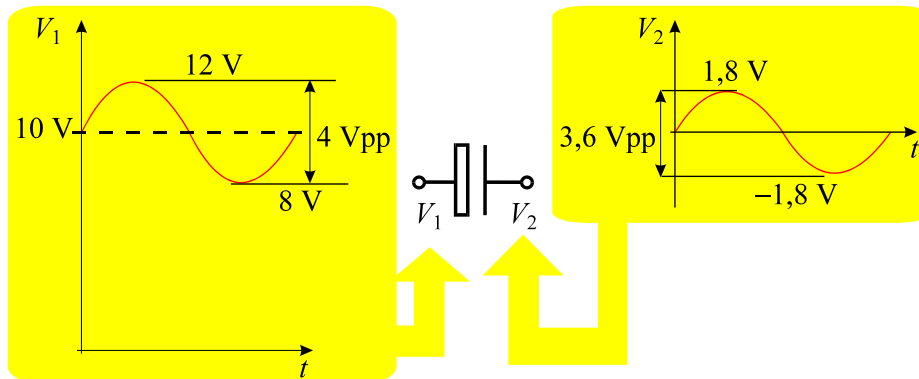


Fig.7 Eliminação do nível *cc* do sinal na entrada do 2º estágio.

Essa queda de tensão no capacitor representa uma **perda de acoplamento** e deve ser tão pequena quanto possível. Por essa razão, a capacitância do capacitor de acoplamento é dimensionada em função da menor frequência a ser amplificada, pois é no regime de baixas frequências que o capacitor exibe sua maior reatância, implicando maiores perdas de acoplamento.

CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS

Um dos aspectos mais importantes a se considerar quando se interligam estágios amplificadores em cascata é o correto casamento de impedâncias, uma vez que a máxima transferência de potência entre estágios pode ser obtida quando a impedância de saída do primeiro estágio iguala à impedância de entrada do segundo, conforme ilustrado na **Fig.8**.

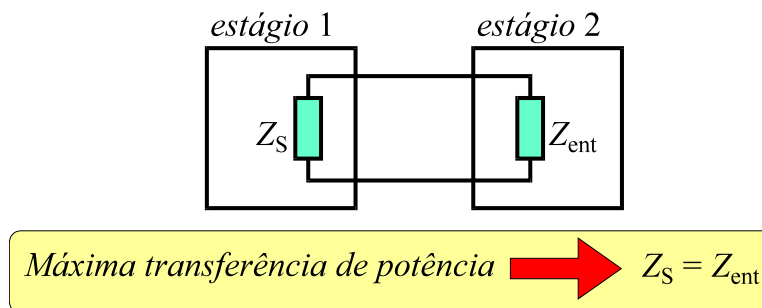


Fig.8 Estágios amplificadores com impedâncias casadas.

Como na prática pode ser difícil obter a igualdade entre impedâncias, é importante tentar dimensionar os circuitos de forma que as impedâncias envolvidas sejam aproximadamente iguais. A seguir estão descritos dois casos em que o casamento não é adequado, com as respectivas implicações.

Caso 1: $Z_s < Z_{ent}$

Nesta condição existe uma transferência adequada de tensão entre os estágios, porém a transferência de corrente é pequena.

Caso 2: $Z_s > Z_{ent}$

Nesta condição existe uma transferência adequada de corrente entre os estágios, porém a transferência de tensão é pequena.

Em ambos os casos, a potência transferida entre estágios é menor do que a potência máxima disponível no primeiro estágio.

GANHO EM DECIBEL

O Bel (B) é uma unidade utilizada para expressar a razão entre dois níveis de sinal, seja este sonoro, ou elétrico, como é o caso da tensão, corrente ou potência. Para o caso de estágios amplificadores, a razão entre os sinais de saída e de entrada de um estágio amplificador define o seu ganho, podendo ser expresso em unidades de Bel. Tendo em vista que 1B representa um ganho de 10, utiliza-se normalmente o decibel (dB) que é mais adequado para definir ganhos menores.

O ganho de potência de um estágio amplificador expresso em dB é definido pela expressão

$$G_P \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \right) \quad (3)$$

Se os sinais de entrada e saída são representados por tensões ou correntes, definem-se os ganhos de tensão e de corrente em dB pelas relações:

Ganho de tensão:

$$G_V \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}} \right) \quad (4)$$

Ganho de corrente:

$$G_I \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{I_{\text{saída}}}{I_{\text{entrada}}} \right) \quad (5)$$

Exemplo 2: Para o estágio amplificador mostrado na **Fig.9**, determinar o ganho de tensão em dB.

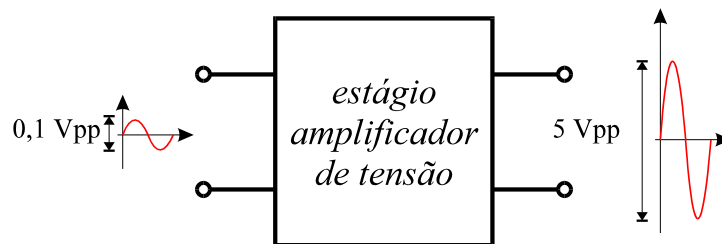


Fig.9 Estágio amplificador para o **Exemplo 2**.

Utilizando a **Eq.(4)**, tem-se que

$$G_V \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{5 \text{ V}}{0,1 \text{ V}} \right) = 20 \log(50) = 20 \times 1,7 = 34 \text{ dB}$$

Existem elementos compondo estágios em que o sinal de saída é menor do que o sinal de entrada. Este é o caso, por exemplo, do filtro de frequências ilustrado na **Fig.10**.

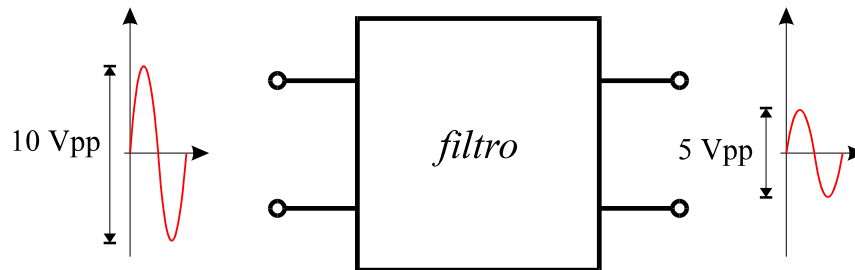


Fig.10 Um exemplo da alteração sofrida por um sinal após passagem por um filtro de frequências.

O sinal após passagem pelo filtro sofre **atenuação**, isto é, sua amplitude decresce. A atenuação em dB é também definida por expressões semelhantes àquelas dadas pelas **Eqs.(3), (4) e (5)**, assumindo as formas:

Atenuação de potência:

$$A_P \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) \quad (6)$$

Atenuação de tensão:

$$A_V \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{V_{saída}}{V_{entrada}} \right) \quad (7)$$

Atenuação de corrente:

$$A_I \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{I_{saída}}{I_{entrada}} \right) \quad (8)$$

Como na existência de atenuação o sinal de saída é menor do que o sinal de entrada, conclui-se que esse parâmetro medido em dB será sempre negativo, como demonstrado no exemplo a seguir.

Exemplo 3: Para o filtro mostrado na **Fig.10** determinar a atenuação de tensão em dB.

Utilizando a **Eq.(7)**, tem-se que

$$A_V (\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{5 \text{ V}}{10 \text{ V}} \right) = 20 \log(0,5) = 20 \times (-0,3) = -6 \text{ dB}$$

A **Tabela 1** apresenta valores em dB para algumas razões entre sinais de saída e de entrada.

Tabela 1 Valores em dB para algumas razões entre sinais.

$S_{\text{saída}}/S_{\text{entrada}}$	$10 \log(S_{\text{saída}}/S_{\text{entrada}})$	$20 \log(S_{\text{saída}}/S_{\text{entrada}})$
0,01	-20 dB	-40 dB
0,1	-10 dB	-20 dB
0,5	-3 dB	-6 dB
1	0 dB	0 dB
2	3 dB	6 dB
5	7 dB	14 dB
10	10 dB	20 dB
20	13 dB	26 dB
100	20 dB	40 dB

OBTENÇÃO DA RAZÃO ENTRE SINAIS A PARTIR DO VALOR EM dB

As **Eqs.(3)** a **(8)** podem ser utilizadas para obter-se o ganho ou atenuação sofrida por um sinal a partir do valor correspondente em dB. Considerando por exemplo a definição geral de ganho de tensão de um sinal, dada pela **Eq.(4)**, tem-se que

$$G_V (\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}} \right)$$

ou equivalentemente

$$20\log\left(\frac{V_{saída}}{V_{entrada}}\right) = G_V(\text{dB}) \Rightarrow \log\left(\frac{V_{saída}}{V_{entrada}}\right) = \frac{G_V(\text{dB})}{20}$$

$$\frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{20}\right)} \quad (9)$$

De forma análoga obtém-se

$$\frac{I_{saída}}{I_{entrada}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{20}\right)} \quad (10)$$

$$\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{10}\right)} \quad (11)$$

Exemplo 4: Para o estágio amplificador da **Fig.11** determinar o sinal de saída.

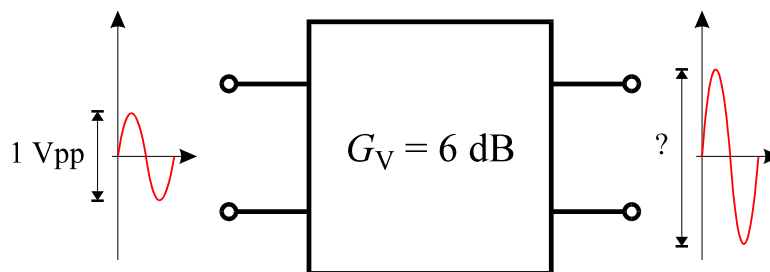


Fig.11 Estágio amplificador para o **Exemplo 4**.

Utilizando a **Eq.(9)**, tem-se que

$$\frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{20}\right)} = 10^{\left(\frac{6}{20}\right)} = 10^{0,3} = 1,995$$

$$\Rightarrow V_{saída} = 1,995V_{entrada} = 1,995 \times 1 = 1,995 \text{ Vpp}$$

Quando se utilizam estágios em cascata, o ganho é o produto dos ganhos. Por exemplo, para dois estágios em cascata de ganhos G_1 e G_2 o ganho é dado por

$$G = G_1 G_2$$

O ganho de amplitude em dB, por exemplo, pode ser obtido das **Eqs.(4)** ou **(5)**, ou seja,

$$G(\text{dB}) = 20\log(G) = 20\log(G_1 G_2) = 20[\log(G_1) + \log(G_2)]$$


donde

$$G(\text{dB}) = 20\log G_1 + 20\log(G_2)$$

resultando em

$$G(\text{dB}) = G_1(\text{dB}) + G_2(\text{dB}) \quad (12)$$

A **Eq.(12)** mostra que o ganho total em dB de um amplificador de dois estágios é a soma dos ganhos em dB de cada estágio. Esse resultado pode ser generalizado para um amplificador de vários estágios:

 ***O ganho em dB de um amplificador de vários estágios pode ser obtido somando-se os ganhos em dB dos estágios individuais compondo o amplificador.***

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Em que ocasiões torna-se necessário utilizar estágios em cascata para amplificação de um sinal?
2. Para o amplificador de dois estágios do **Exemplo 2**, admitindo $S_1 = 3,2 \text{ Vpp}$, determinar S_0 e S_2 .
3. Qual o objetivo de se utilizarem elementos de acoplamento entre estágios amplificadores?
4. Por que é importante assegurar que a impedância de saída de um estágio amplificador seja igual à impedância de entrada do estágio seguinte?

BIBLIOGRAFIA

- MALVINO, Albert Paul. Eletrônica. São Paulo, McGraw Hill, 1986. 520p. il.
- MILLMAN, Jacob C. & HALKIASS, Christos C. Eletrônica; dispositivos e circuitos. São Paulo, Mc Graw-Hill do Brasil, c 1981. v.2
- SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1979. il, (Coleção Básica SENAI: Eletrônica Básica II. Módulo 2).