



>> capítulo 1

Conceitos fundamentais

Este capítulo inicial aborda alguns tópicos que irão servir de base para nossos estudos sobre os amplificadores operacionais (AOPs), especialmente o conceito de ganho de tensão e as explicações sobre as características ideais de um amplificador. A evolução tecnológica dos AOPs é bastante rápida, mas, se o leitor dominar os conceitos fundamentais e os tipos de circuitos e aplicações mais importantes dos AOPs, ele não terá dificuldades em utilizar os novos dispositivos que a cada dia são lançados no mercado. Os fundamentos são imutáveis.

Objetivos de aprendizagem

- >> Conceituar AOP
- >> Definir algumas propriedades importantes de um AOP

»» *O amplificador operacional (AOP)*

»» **Definição**

O AOP é um amplificador CC multiestágio com entrada diferencial cujas características se aproximam das de um amplificador ideal.¹

No Apêndice A fazemos um pequeno estudo do amplificador diferencial, bem como da estrutura interna do AOP. Sugerimos, neste ponto, a leitura deste apêndice para uma melhor compreensão da definição.

Características ideais de um AOP:

- a) resistência de entrada infinita
- b) resistência de saída nula
- c) ganho de tensão infinito
- d) resposta de frequência infinita (CC a infinitos Hertz)
- e) insensibilidade à temperatura (*drift* nulo)

»» **Aplicações dos AOPs**

É muito difícil enumerar a totalidade das aplicações desse fantástico circuito (ou componente) denominado amplificador operacional. De modo geral, podemos dizer que suas aplicações estão presentes nos sistemas eletrônicos de controle industrial, na instrumentação industrial, na instrumentação nuclear, na instrumentação médica (eletromedicina ou bioeletrônica), nos computadores analógicos, nos equipamentos de telecomunicações, nos equipamentos de áudio, nos sistemas de aquisição de dados, etc.

Neste livro, pretendemos apresentar as bases teóricas mínimas necessárias à compreensão dos AOPs. Apresentamos, também, uma série de aplicações básicas dos mesmos, de modo que o estudante possa adquirir conhecimentos suficientes para analisar, implementar e até mesmo executar projetos com AOPs.



»» **PARA SABER MAIS**

Na seção “Comentários sobre as características de um amplificador” (p. 10) explicaremos detalhadamente cada uma dessas características, utilizando um amplificador de tensão genérico.

¹ Ao longo deste livro, quando nos referirmos a um amplificador, deverá ficar implícito que se trata de um amplificador de tensão.

>> Simbologia do AOP

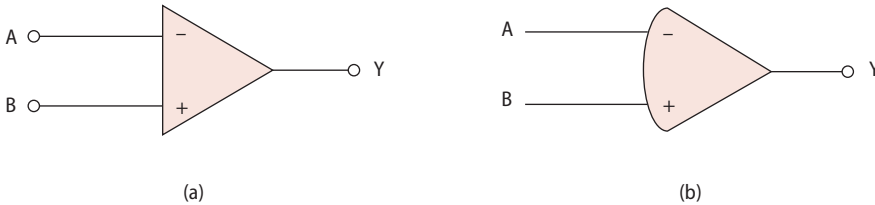


Figura 1.1

A – Entrada inversora
B – Entrada não inversora
Y – Saída

O símbolo da Figura 1.1 (a) é o mais usual e será utilizado neste livro.

>> Um pouco da história dos AOPs

Os AOPs foram desenvolvidos na década de 40 e eram construídos com válvulas. Evidentemente as características desses primitivos AOPs eram bastante precárias. Com o advento do transistor, no final da década de 40, foi possível a construção de AOPs com características razoáveis. Porém, em 1963, surgiu o primeiro AOP monolítico (CIRCUITO INTEGRADO) lançado pela Fairchild (EUA): μ A702. Esse AOP apresentava uma série de problemas, tais como: baixa resistência de entrada, baixo ganho, alta sensibilidade a ruídos, necessidade de alimentação positiva e negativa de valores diferentes (p. ex., $-6V$ e $+12V$), etc. Foi então que a própria Fairchild, graças aos esforços de uma equipe chefiada por Robert Widlar, lançou em 1965 o conhecido μ A709. Este último é considerado o primeiro AOP realmente confiável lançado no mercado. A seguir, a mesma equipe projetou o famoso μ A741, o qual foi lançado pela Fairchild em 1968. Até hoje esse AOP ocupa posição de destaque. Evidentemente existem hoje diversos AOPs com características superiores às do 741, por exemplo: LF 351 (National), CA 3140 (RCA), etc.

A tecnologia utilizada na fabricação do 741 e do 709 é denominada bipolar, pois a sua estrutura interna utiliza transistores bipolares. Por outro lado, o 351 utiliza tecnologia bifet, pois a sua estrutura interna utiliza uma combinação de transistores bipolares com transistores jfet (daí a denominação bifet para essa tecnologia de fabricação de AOPs).² A tecnologia bifet permite que sejam aproveitados os méritos de ambos os tipos de transistores. Uma grande vantagem da tecnologia bifet é a altíssima resistência de entrada do AOP, graças à utilização de transistores FET no estágio de entrada do mesmo.

² Existe uma outra tecnologia, desenvolvida pela RCA, denominada bimos (da qual o CA 3140 é um exemplo). Essa tecnologia utiliza uma combinação de transistores bipolares e mosfet. Entretanto, a tecnologia bifet é superior à bimos em quase todos os aspectos.

Podemos, portanto, classificar os AOPs em função das diversas tecnologias utilizadas desde que os mesmos foram concebidos na década de 40. Temos:

- 1945 – 1ª geração – AOPs a válvulas
- 1955 – 2ª geração – AOPs a transistores
- 1965 – 3ª geração – AOPs monolíticos bipolares
- 1975 – 4ª geração – AOPs monolíticos bifet e bimos
- 1985 – 5ª geração – AOPs monolíticos de potência para aplicações gerais
- 1995 aos dias atuais – surgiram muitas inovações, mas sob o aspecto comercial ainda não se tem uma tendência tecnológica definida para se adotar como 6ª geração de AOPs

>> Pinagem

Na realidade, os AOPs possuem pelo menos oito terminais. Veja a Figura 1.2, na qual tomamos como exemplo os famosos AOPs μ A741 (Fairchild) e LF 351 (National).

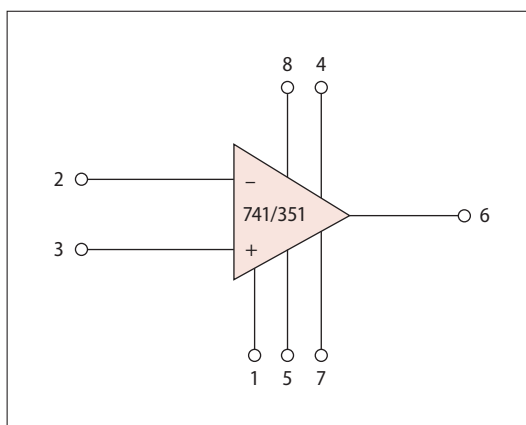


Figura 1.2

A descrição dos pinos é a seguinte:

- 1 e 5 – destinados ao balanceamento do AOP [ajuste da tensão de *offset* – veja a seção “Conceito de tensão de *offset* de saída” (p. 8)]
- 2 – entrada inversora
- 3 – entrada não inversora
- 4 – alimentação negativa ($-3V$ a $-18V$)
- 7 – alimentação positiva ($+3V$ a $+18V$)
- 6 – saída
- 8 – não possui nenhuma conexão

>> DICA

Caso o AOP tenha encapsulamento metálico, o pino 8 deverá ser colocado no terra

» Código de fabricantes e folhas de dados

Existem inúmeros fabricantes de circuitos integrados no mundo. Cada fabricante possui uma codificação para seus produtos. Um mesmo integrado pode ser produzido por vários fabricantes diferentes. Assim, é importante que o projetista conheça os diferentes códigos para discernir o fabricante, buscar o manual (*databook*) do mesmo, pesquisar as características do dispositivo, estabelecer equivalências, etc.

Na Tabela 1.1, temos a codificação utilizada pelos fabricantes mais conhecidos no mundo e, principalmente, no Brasil. Para ilustrar, tomamos o 741 como exemplo.

Tabela 1.1

Fabricantes	Códigos
FAIRCHILD	μ A741
NATIONAL	LM741
MOTOROLA	MC 1741
RCA	CA741
TEXAS	SN741
SIGNETICS	SA741
SIEMENS	TBA221(741)

Um apêndice muito útil é o Apêndice D, no qual se acham as folhas de dados (*data-sheets*) do AOP CA741 e similares. Nesse apêndice fizemos algo incomum e interessante: apresentamos as folhas de dados retiradas do manual da SID Microeletrônica, uma empresa nacional.³ O leitor irá observar que os dados fornecidos sobre os dispositivos estão em português. Acreditamos que isso irá contribuir para uma melhor compreensão dos termos técnicos em inglês utilizados em nossos estudos de AOPs e encontrados nos manuais americanos. Essa compreensão é muito útil aos que trabalham na área de projetos e manutenção de sistemas eletrônicos envolvendo AOPs.

Finalmente, falaremos um pouco sobre encapsulamentos. Na Figura 1.3 (p. 8), temos os tipos mais comuns de encapsulamentos. Na Figura 1.3(a), temos um encapsulamento plano ou *flat-pack* de 14 pinos; na Figura 1.3(b), temos um encapsulamento metálico ou *metal can* de 8 pinos; e, finalmente, na Figura 1.3(c), temos dois tipos de encapsulamentos em linha dupla ou DIP (*dual-in-line package*). Para todos eles são mostradas as diferentes formas de identificação adotadas pelos fabricantes.

Para o AOP 741 podemos encontrar encapsulamentos DIP de 8 pinos (mais usual) e 14 pinos. Podemos, também, encontrar os encapsulamentos *flat-pack* de 10 pi-

³Infelizmente a SID não está mais atuando na fabricação de componentes eletrônicos, mas as folhas de dados dos Apêndices D, E e F continuam perfeitamente válidas.

nos e *metal can* de 8 pinos. A pinagem do encapsulamento DIP de 8 pinos corresponde exatamente à pinagem do encapsulamento metálico de 8 pinos.

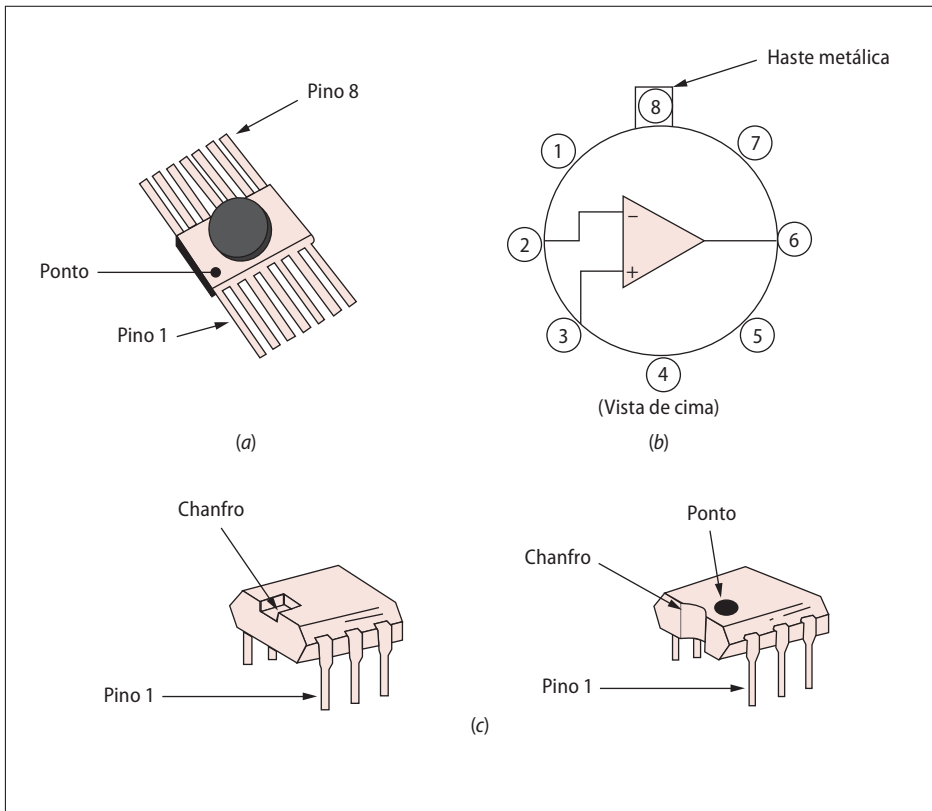
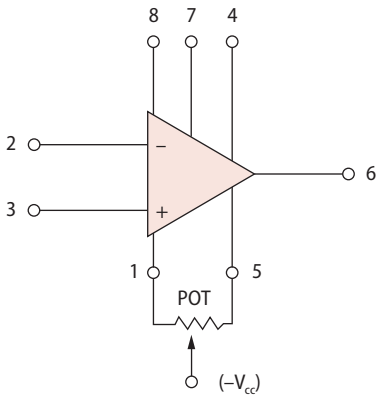


Figura 1.3

»» Conceito de tensão de offset de saída

O fato dos transistores do estágio diferencial de entrada do AOP (veja o Apêndice A) não serem idênticos provoca um desbalanceamento interno do qual resulta uma tensão na saída denominada tensão de *offset* de saída, mesmo quando as entradas são aterradas. Assim, os pinos 1 e 5 do AOP 741 (ou 351) são conectados a um potenciômetro e ao pino 4. Isso possibilita o cancelamento do sinal de erro presente na saída através de um ajuste adequado do potenciômetro. Veja a Figura 1.4 (p. 9).



ATENÇÃO: a conexão errada do POT pode danificar o AOP. Em caso de dúvida, consulte o manual do fabricante.

Figura 1.4

A importância do ajuste de *offset* está nas aplicações em que se trabalham com pequenos sinais (da ordem de mV), por exemplo:

- >> instrumentação petroquímica
- >> instrumentação nuclear
- >> eletromedicina (bioeletrônica)
- >> etc.

Retornaremos a este assunto no Capítulo 3.

>> Ganho de tensão de um amplificador⁴

Na Figura 1.5, temos o símbolo de um amplificador genérico.

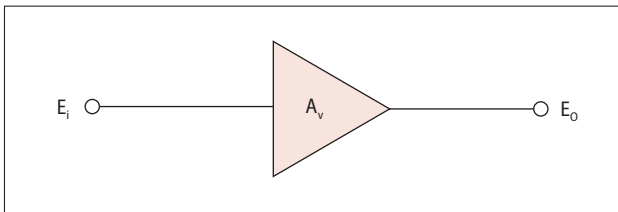



Figura 1.5

⁴ Às vezes, por hábito, utilizaremos apenas a palavra "ganho". Nestes casos, deverá ficar implícito que se trata de ganho de tensão.



>> IMPORTANTE
 A importância da utilização do ganho de tensão em decibéis (dB) justifica-se quando são utilizados grandes valores para A_v , por exemplo:
 $A_v = 1 \rightarrow A_v(\text{dB}) = 0$
 $A_v = 10 \rightarrow A_v(\text{dB}) = 20$
 $A_v = 10^2 \rightarrow A_v(\text{dB}) = 40$
 $A_v = 10^3 \rightarrow A_v(\text{dB}) = 60$

Definiremos os seguintes parâmetros:

- E_i = sinal de entrada
- E_o = sinal de saída
- A_v = ganho de tensão

Assim, podemos escrever:

$$A_v = \frac{E_o}{E_i} \tag{1-1}$$

Em decibéis, temos:

$$A_v \text{ (em decibéis)} = 20 \log \frac{E_o}{E_i}$$

Ou simplesmente:

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log \frac{E_o}{E_i} \tag{1-2}$$

A observação ao lado pode ser generalizada:

$$A_v = 10^n \rightarrow A_v(\text{dB}) = 20n$$

A utilização de decibéis facilita a representação gráfica de muitas grandezas que têm uma ampla faixa de variação.

>>> *Comentários sobre as características de um amplificador*

Falaremos a seguir sobre as características ideais que qualquer amplificador deveria ter. Os AOPs reais tentam se aproximar dessas características ideais.

>>> **Resistência de entrada e resistência de saída de um amplificador**

Consideremos o circuito dado na Figura 1.6 (p. 11). Este circuito representa o modelo de uma fonte alimentando um amplificador, o qual, por sua vez, alimenta uma carga.

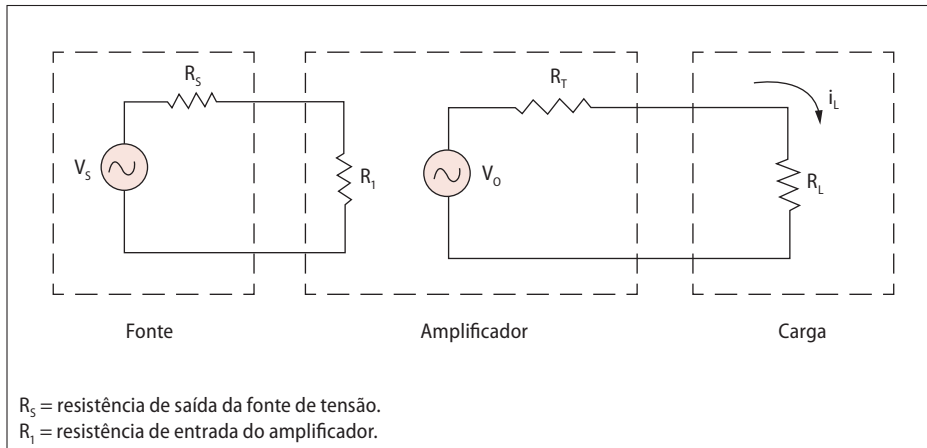


Figura 1.6

O gráfico da Figura 1.7 nos mostra as variações de corrente, tensão e potência presentes na carga R_L do circuito anterior. O ponto A é o ponto no qual se tem a máxima transferência de potência entre o amplificador e a carga. Veremos, porém, que essa situação não é a que mais nos interessa nos circuitos com AOPs.

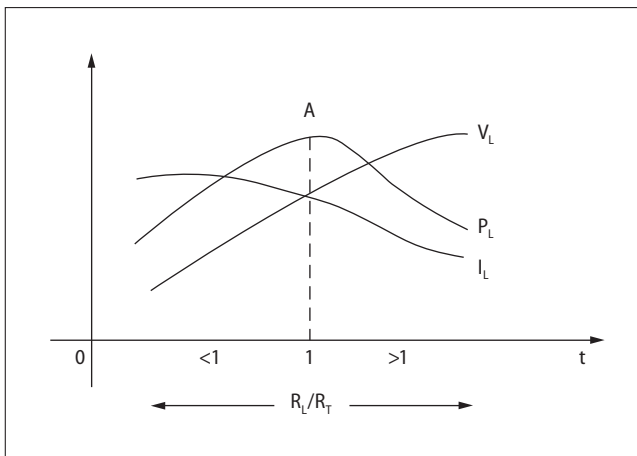


Figura 1.7

Do circuito da Figura 1.6, podemos obter a seguinte equação:

$$V_{R_1} = \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_s} \quad (1-3)$$

Se na equação anterior estipularmos uma certa porcentagem de tensão sobre R_1 , poderemos estabelecer uma relação entre R_1 e R_s . Assim, por exemplo:

se $V_{R_1} = 90\% V_s$
 temos: $R_1 = 9R_s$



>> ATENÇÃO

Nos manuais dos fabricantes são fornecidos os valores das resistências de entrada e saída do AOP, as quais representaremos, respectivamente, por R_i e R_o .



>> ATENÇÃO

Nos manuais dos fabricantes encontra-se o valor do ganho de tensão dos AOPs, o qual representaremos por A_{vo} . Voltaremos a esse assunto no Capítulo 2.⁵



>> ATENÇÃO

Nos manuais dos fabricantes encontra-se o valor de largura de faixa máxima do AOP, a qual representaremos genericamente por BW (*bandwidth*).

Se, por outro lado,

$$V_{R_1} = 99\% V_s \\ \text{temos: } R_1 = 99R_s$$

Analisando a Equação 1-3, podemos concluir o seguinte:

$$R_1 \rightarrow \infty \Rightarrow V_{R_1} = V_s \quad (1-4)$$

Ou seja: quanto maior R_1 em relação a R_s , maior será a proporção de V_s aplicada sobre R_1 . Assim sendo, para minimizar a atenuação do sinal aplicado na entrada do amplificador, é necessário que a resistência de entrada do mesmo seja muito alta (idealmente infinita) em relação à resistência de saída da fonte.

Por outro lado, para se obter todo sinal de saída sobre a carga, é necessário que a resistência de saída do amplificador (R_T) seja muito baixa.

De fato, sendo:

$$V_{R_L} = V_o - i_L \cdot R_T$$

Supondo $R_T = 0$, teremos:

$$V_{R_L} = V_o \quad (1-5)$$

Nessa condição, a corrente i_L é limitada pelo valor de R_L . Evidentemente, existe um valor máximo de i_L que pode ser fornecido pelo amplificador.

No caso do AOP 741, essa corrente máxima é denominada corrente de curto-circuito de saída (representada por I_{os}) e seu valor típico é 25mA.

A equação anterior nos diz que sobre R_L teremos exatamente a tensão de entrada V_o desde que a resistência de saída R_T seja nula. Esta é uma condição ideal.

Note que não estamos preocupados com a máxima transferência de potência, mas sim com a máxima transferência de sinal sobre R_L . Na maioria das aplicações dos AOPs, esta situação é mais útil.

>> Ganho de tensão

Para que a amplificação seja viável, inclusive para sinais de baixa amplitude como, por exemplo, sinais provenientes de transdutores ou sensores, é necessário que o amplificador possua um alto ganho de tensão. Idealmente esse ganho seria infinito.

>> Resposta de frequência (BW)

É necessário que um amplificador tenha uma largura de faixa muito ampla, de modo que um sinal de qualquer frequência possa ser amplificado sem sofrer corte ou atenuação. Idealmente BW deveria se estender desde zero a infinitos hertz.

⁵ Para o AOP 741, o valor típico de A_{vo} é de 200.000, mas existem AOPs com A_{vo} da ordem de 12×10^6 ou mais!

» Sensibilidade à temperatura (DRIFT)

As variações térmicas podem provocar alterações acentuadas nas características elétricas de um amplificador. A esse fenômeno chamamos DRIFT. Seria ideal que um AOP não apresentasse sensibilidade às variações de temperatura.



» ATENÇÃO

Nos manuais dos fabricantes encontram-se os valores das variações de corrente e tensão no AOP, provocadas pelo aumento de temperatura. A variação da corrente é representada por $\Delta I/\Delta t$ e seu valor é fornecido em $nA/^\circ C$. A variação da tensão é representada por $\Delta V/\Delta t$ e seu valor é fornecido em $\mu V/^\circ C$.

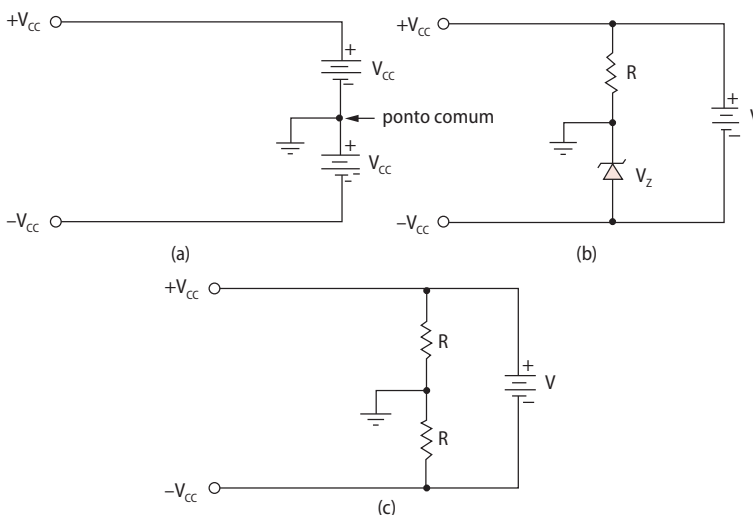
» Alimentação do AOP

Normalmente os AOPs são projetados para serem alimentados simetricamente. Em alguns casos, podemos utilizar o AOP com monoalimentação. Existem, inclusive, alguns AOPs fabricados para trabalharem com monoalimentação. Quando não dispomos de fontes simétricas, podemos improvisá-las utilizando fontes simples, conforme indicado na Figura 1.8. Em qualquer caso, o ponto comum das fontes será o terra (ou massa) do circuito como um todo, ou seja, todas as tensões presentes nos terminais do AOP terão como referência esse ponto comum das fontes.

» Conceitos de décadas e oitavas

Dizemos que uma frequência f_1 variou de uma década quando f_1 assume um novo valor f_2 , tal que:

$$f_2 = 10f_1$$



Observação: os resistores podem ser de $10K\Omega$, 1/4 Watt e 1% de tolerância.

Figura 1.8

De modo geral, dizemos que f_1 variou de n décadas quando:

$$f_2 = 10^n f_1$$

Dizemos que uma frequência f_1 variou de uma oitava quando f_1 assume um novo valor f_2 , tal que:

$$f_2 = 2f_1$$

De modo geral, dizemos que f_1 variou de n oitavas quando:

$$f_2 = 2^n f_1$$

Os conceitos de décadas e oitavas serão muito úteis durante nossos estudos de AOPs e filtros ativos.

Exercícios resolvidos

- 1 Determine quantas décadas separam as frequências de 0,5Hz e 50KHz.

Solução

Seja $f_1 = 0,5\text{Hz}$ e $f_2 = 50\text{KHz}$, temos:

$$f_2 = 10^n f_1$$

$$50.000 = 10^n \cdot 0,5 \therefore n = \log \frac{50.000}{0,5}$$

$$n = 5 \text{ décadas}$$

- 2 Se f_2 está oito oitavas acima de $f_1 = 3\text{Hz}$, determine f_2 .

Solução

Temos: $f_2 = 2^8 \cdot 3 \therefore$

$$f_2 = 768\text{Hz}$$

Exercícios de fixação

- 1 Defina AOP.
- 2 O que você entende por amplificador CC multistágio?
- 3 Cite as características ideais de um AOP e explique o significado de cada uma delas.
- 4 Cite os tipos básicos de encapsulamentos dos AOPs.
- 5 Explique, com suas próprias palavras, o conceito de tensão de *offset* de saída.
- 6 Conceitue ganho de um amplificador. O que é decibel?
- 7 Explique como se pode obter uma fonte simétrica utilizando uma fonte simples.
- 8 Conceitue décadas e oitavas.
- 9 Quantas décadas existem entre 1Hz e 1KHz?
- 10 Quantas oitavas existem entre 1Hz e 1KHz?
- 11 A frequência f_1 está cinco oitavas abaixo de f_2 . Se $f_1 = 30\text{Hz}$, determine f_2 .
- 12 Quantas oitavas existem num intervalo de n décadas?
Resposta = $3,322 n$