CAPÍTULO 5

**AMPLIFICADORES OPERACIONAIS**

5.1 INTRODUÇÃO

Embora o amplificador operacional seja um dispositivo contendo circuitos bastante complexos, formados por diodos e transistores, ele é apresentado neste capítulo pelos seguintes motivos:

(a) o seu funcionamento externo é facilmente compreendido sem a necessidade de um conhecimento prévio da eletrônica dos semicondutores.

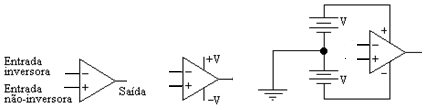
(b) ele pode ser modelado de forma simplificada por um circuito contendo apenas uma fonte dependente que já é do conhecimento do estudante.

(c) ele pode realizar uma série de operações simples facilmente compreendidas como: adição, multiplicação, integração e diferenciação.

Em síntese, o amplificador operacional será estudado aqui, como sendo uma “caixa preta” onde se está interessada apenas nas variáveis presentes em alguns de seus terminais externos.

O amplificador operacional é um elemento de circuito que pode ser aproximado por diversos dispositivos, principalmente em frequências baixas, com aplicabilidade em quase todos os ramos da eletrônica. É um circuito integrado de estado sólido que usa realimentação externa para controle de suas funções. São produzidos em grande escala, contendo um ou quatro amplificadores operacionais. O circuito integrado *LM 741*, por exemplo, contém um amplificador, enquanto o integrado *LM 324* contém quatro amplificadores independentes. Eles se aproximam com boa precisão do caso ideal quando trabalham com sinais de frequências na faixa de *10-20 kHz*.

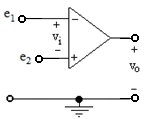
A simbologia usada para os amplificadores operacionais pode ser uma das que são mostradas na figura 5-1.



(a) (b) (c)

Fig. 5-1: Símbolos do amplificador operacional. (a) mostrando apenas os terminais funcionais; (b) mostrando os terminais de alimentação; (c) mostrando um esquema de alimentação.

A figura 5-2 mostra o amplificador com uma referência comum (terra) para as medidas das tensões *e1*, *e2* e demais tensões do circuito. Os sinais (–) e (+) na entrada inversora e não inversora indicam a fase relativa da saída com respeito às entradas *1* e *2* respectivamente.



**Fig 5-2: Amplificador operacional com uma referência comum para as tensões *e1, e2* e *vo***

O primeiro amplificador operacional usava tubos a vácuo e esteve disponível em *1940*. Seu nome vem do fato dele ter sido usado para realizar algumas operações matemáticas em sistemas elétricos denominados de computadores analógicos.

O amplificador operacional é um elemento ativo com alto ganho de tensão de malha aberta (em geral variando de *1000* a *10000*), que quando ligado a outros elementos de circuitos pode realizar vários tipos de operações tais como adição, multiplicação, integração, diferenciação, amplificação, conversão corrente-tensão, etc.

Um dos amplificadores operacionais mais popular até hoje é o *μA741[[1]](#footnote-1)(\*)*, que é um circuito integrado com *8* pinos conforme mostra a figura 5-3.

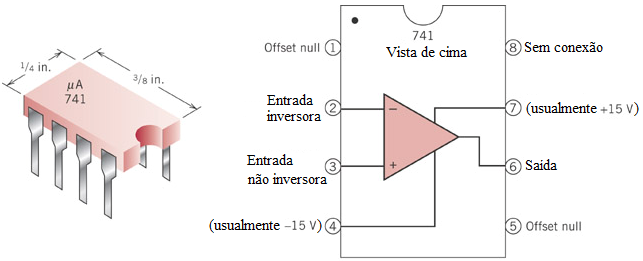


Fig. 5-3: Circuito integrado *μA 741* com encapsulamento *DIP*, mostrando a numeração de seus pinos vista de cima.

Os terminais mais importantes deste circuito são:

- Entrada Inversora

- Entrada Não inversora

- Saída

- Alimentações *+V* e *–V*

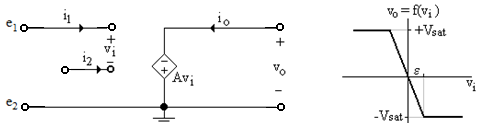
Os três restantes são ignorados na maioria das aplicações. Os terminais identificados por Offset Null, por exemplo, são terminais de compensação utilizados, se necessário, para ajustes em laboratório a fim de corrigir algumas imperfeições no funcionamento do integrado. Eles podem ser ligados, por exemplo, a um circuito auxiliar destinado a compensar uma degradação do desempenho devido ao envelhecimento ou imperfeições. Entretanto, a degradação na maioria dos casos é insignificante, de modo que esses terminais são raramente usados. O terminal identificado por "sem conexão" não tem nenhuma conexão interna com o integrado.

5.2. MODELO SIMPLIFICADO PARA O AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Com boa aproximação, o operacional pode ser visto como uma fonte dependente de tensão controlada por tensão, arranjada conforme ilustra a figura 5-4(a), com característica de transferência mostrada na figura 5-4(b).

O relacionamento chave para este modelo é a característica de transferência *vo =* –*Avi*, onde *vi = e1 – e2*, e a quantidade adimensional, *A,* é o ganho de tensão de malha aberta. Note-se que, se *e2 = 0* (entrada *2* aterrada) então *vi = e1* e, por conseguinte, *vo =* –*Ae1*, razão pela qual a entrada *1* é chamada de inversora. Da mesma forma, se *e1 = 0* (entrada *1* aterrada) então *vi =* –*e2* e portanto, *vo = Ae2*, o que justifica a entrada *2* ser chamada de não inversora.

Geralmente a tensão de saturação, *Vsat*, coincide com a tensão de alimentação, *V*, do operacional ou é ligeiramente inferior em valor absoluto.



(a) (b)

# Fig.5-4: (a) Modelo simplificado do operacional; (b) Característica de transferência de tensão

Neste modelo, a impedância entre os terminais *1* e *2* é muito grande de modo que podemos representá-la por um circuito aberto. Na prática ela é tipicamente maior que *1 M.*

As correntes nos terminais de entrada, *i1* e *i2*, são muito pequenas (essencialmente zero). A diferença de tensão, *vi = e1 – e2*, também é essencialmente zero quando existe uma *realimentação negativa*, isto é, quando existe uma conexão entre o terminal de saída e o terminal inversor.

Quando um amplificador operacional de ganho muito alto opera na região linear da característica mostrada na figura 5-4(b), o valor da tensão *ε* é muito menor do que os outros valores de tensão no restante do circuito. Desta maneira, pode-se considerar que *vi = 0*, ou seja, *e1 = e2*. A este *aparente curto-circuito* entre os terminais *1* e *2* costuma-se chamar de *terra virtual*, que não deve ser confundido com o terra de referência do circuito.

Para o amplificador operacional operar na região linear, deve-se observar as seguintes condições:

*|vo| Vsat*

*|io| Isat*

, onde *SR* é a taxa de subida da tensão de saída (Slew Rate)

Por exemplo, o amplificador *μA741* com tensões de alimentação *+15 V* e *–15 V*, tem, segundo especificações do fabricante, *Vsat = 14 V*, *Isat = 2 mA* e *SR = 500000 V/s*.

OBSERVAÇÕES:

(1) Geralmente a tensão de saturação é igual ou um pouco inferior a tensão de alimentação. Quando não se sabe, considera-se igual à tensão de alimentação. Fora da região linear, a saída do amplificador fica saturada e ele passa a se comportar como um elemento não-linear.

(2) Define-se SLEW RATE (SR) de um amplificador, como sendo a máxima variação de tensão de saída por unidade de tempo. Normalmente o SR é dado em V/µs. Em termos gerais, pode-se dizer que o valor de SR fornece a “velocidade” de resposta do amplificador. Quanto maior o SR, melhor será o amplificador. O AOP 741 possui o SR = 0,5V/µs, o LF351 possui SR = 13V/µs e o LM318 possui SR=70V/µs. Em textos nacionais costuma-se traduzir SLEW RATE por taxa de subida, taxa de resposta, taxa de giro, etc.

5.3 O AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Seja tomar como base o esquema da figura 5-5 para se definir as equações que descrevem o comportamento de um amplificador operacional ideal.

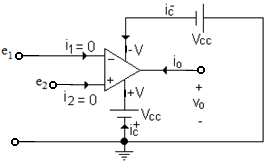


Fig. 5-5: Tensões e correntes num amplificador operacional ideal

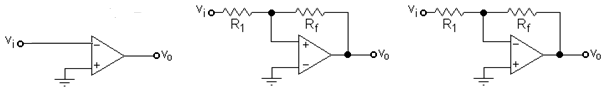
5.4 MODOS DE OPERAÇÃO

A figura 5-6 mostra três modos de operação do amplificador operacional:

(1) Sem realimentação – figura 5-6 (a): este modo é conhecido como operação em malha aberta, por utilizar o ganho do operacional estipulado pelo fabricante, ou seja, não se tem o controle do ganho. Este modo de operação é largamente empregado em circuitos comparadores.

(2) Realimentação positiva – figura 5-6 (b): Este modo de operação é denominado operação em malha fechada. Pois o ganho do operacional é obtido pelo projetista. Apresenta como desvantagem uma instabilidade ao circuito. É aplicado em circuitos osciladores. Neste modo de operação o AOP não trabalha como amplificador de sinais, pois sua resposta não é linear.

(3) Realimentação Negativa – figura 5-6 (c): Este modo de operação é o mais importante e o mais utilizado em circuitos com AOP, veja que a saída é reaplicada à entrada inversora do AOP através da resistência *Rf*. Existem várias aplicações para os AOP com realimentação negativa. Entre elas se pode destacar: - Amplificador Inversor; - Amplificador Não Inversor; - Amplificador Somador; - Amplificador Diferencial; - Diferenciador; - Integrador; - Filtros Ativos, etc. Este modo de operação como na realimentação positiva tem característica de malha fechada, ou seja, o ganho é determinado pelas resistências *R1* e *Rf* e pode ser controlado pelo projetista.



(a) (b) (c)

**Fig. 5-6: Modos de operação do amplificador operacional.**

A ênfase neste estudo será dada a circuitos com amplificadores operacionais no modo (3).

Tipicamente a tensão de alimentação de um amplificador operacional não deve ultrapassar *20 V* e o ganho, *A*, quase sempre é maior que *10000*. Desta forma, para que o amplificador permaneça na região linear, é preciso que o valor absoluto da diferença *e1 – e2* seja menor do que *20/10000 = 2 mV*.

Geralmente, essa diferença é muito menor que as tensões dos nós do circuito, significando que as tensões *e1* e *e2* são praticamente iguais. A condição *e1 = e2*, portanto define a relação entre as tensões de entrada de um amplificador operacional ideal, isto é, um operacional cujo ganho é infinito. Assim tem-se, para um operacional ideal:

*e1 – e2 = 0* ou *e1 = e2*(5-1)

O fato de *vi = e1 – e2* ser zero, não implica que *vo* seja zero. Isso é possível porque o terminal de saída sempre é ligado à entrada inversora, constituindo uma realimentação negativa. Esta realimentação faz com que a diferença entre as tensões de entrada diminua. Como a tensão de saída é proporcional a essa diferença, a tensão de saída também diminui, fazendo o operacional permanecer na região linear.

Sem realimentação é quase certo que o operacional fique saturado. Entretanto, a existência de realimentação não garante que o operacional esteja funcionando na região linear. Só teremos esta garantia analisando o circuito e verificando se há alguma contradição nos resultados.

Voltando à análise do amplificador operacional ideal, já foi visto que a sua resistência de entrada é muito alta, da ordem de alguns Megaohms. No caso ideal, a resistência de entrada é infinita, sendo esta condição expressa por:

*i1 = i2 = 0* (5-2)

Esta condição não exige que o amplificador opere na região linear e nem implica que a corrente, *io*, na saída, seja nula, pois se aplicarmos a lei de Kirchhoff para correntes, no circuito da figura 5-5, encontra-se:

*i1 + i2 + io + ic+ + ic– = 0*

e, como *i1 = i2 = 0*, tem-se:

*io =* – *(ic+ + ic–)*

Em resumo, a análise de circuitos contendo amplificadores operacionais ideais se torna muito simples, pois ele é regido somente pelas equações:

*e1 = e2* e *i1 = i2 = 0*

Para simplificar a análise dos circuitos daqui para frente, será omitido, na maioria das vezes, as tensões de alimentação *+ V*, já que elas não entram nas equações do operacional quando este está na região linear.

5.4. ANÁLISE NODAL PARA CIRCUITOS COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Quase sempre se utilizam as equações de nós para se analisar circuitos contendo amplificadores operacionais ideais. Nesta análise deve-se sempre observar que:

*e1 = e2* (Tensões dos nós de entrada são iguais)

*i1 = i2 = 0* (Correntes nos terminais de entrada são nulas)

*io 0* (corrente no terminal de saída não é necessariamente nula)

Exemplo 1: Determine a relação entre *vo* e *vs* no circuito mostrado na figura 5-6.

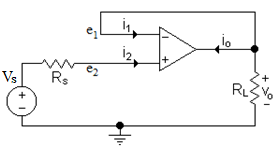


Fig. 5-6: Circuito amplificador de ganho unitário

Solução: No nó *1* tem-se:

*e1 = vo*

Então pela equação (5-1), tem-se também:

*e2 = e1 = vo*

Como *i2 = 0*, então a corrente em *Rs* é zero. Por conseguinte a tensão em *Rs* também é zero. Logo:

*vs – e2 = 0*

e portanto:

*vs = e2 = vo*.

Observe-se que no nó de saída tem-se:

*i1 + io + vo/RL = 0*, então: *io =* –*vo/RL*

Suponha-se que esse amplificador seja o *μA 741*, com *Vsat = 14 V*, *Isat = 2 mA* e *SR = 500000 V/s*. Então, para *RL = 20 k* e *vs = 10 V*, ter-se-á:

*|vo| = |vs| = 10 V < Vsat*

Portanto pode-se afirmar que este operacional está trabalhando na região linear.

Exemplo 2: Encontre a razão *vo/vi* no circuito mostrado na figura 5-7.

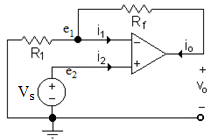


Fig.5-7: Circuito amplificador não inversor.

Solução: Para o nó 1 escreve-se:

Como *e1 = e2 = vs*, tem-se:

Donde se tira:

Note-se que, a saída, é a entrada *vs* multiplicada pelo fator positivo (*1 + Rf /R1*), daí o nome de amplificador não inversor para esse circuito.

Exemplo 3: O circuito da figura 5-8 também é um amplificador não inversor. Encontre a relação *vo /vs* e analise o caso em que *R2 >> R1*.

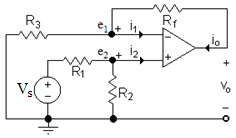


Fig.5-8: Circuito amplificador não inversor

Solução: Aplicando-se as leis de Kirchhoff para os nós 1 e 2 tem-se:

Nó 1:

Nó 2:

Isolando-se *e2* da 2a equação e substituindo-se no lugar de *e1* na 1a, encontra-se:

Se *R2 >> R1* encontra-se: (idêntico ao Exemplo 2)

Exemplo 4: Determine a saída *vo* em função das entradas va e *vb*, no circuito da figura 5-9.

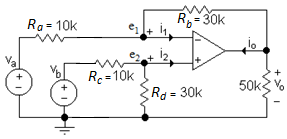


Fig. 5-9: Circuito amplificador diferença.

Solução: Escrevendo-se as equações para os nós 1 e 2 tem-se:

Nó 1:

Nó 2:

Usando o mesmo procedimento do exemplo 3, encontra-se:

*vo = 3(vb – va)*.

Este resultado justifica o nome dado ao circuito como sendo um amplificador diferença.

OBSERVAÇÃO: genericamente pode ser mostrado que a tensão diferença é dada por:

(5-3)

E quando se faz

*RaRd = RbRc*  (5-4)

a equação (5-3) fica:

(5-5)

**O AMPLIFICADOR DIFERENÇA – OUTRA VISÃO**

Podemos também analisar o comportamento do amplificador diferença definindo as entradas em função de duas outras tensões: a *tensão do modo diferencial* definida como a diferença entre as tensões de entrada, ou seja,

*vmd = vb – va*

e a tensão do modo comum definida como a média aritmética das duas tensões de entrada, ou seja,

*vmc =*

Utilizando estas duas equações pode-se expressar *va* e *vb* como:

Assim, substituindo-se estas duas tensões na equação (5-3), obtêm-se para *vo*:

(5-6)

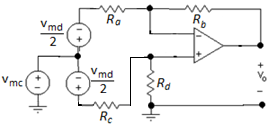
Ou *vo = Amcvmc + Amdvmd*

Onde *Amc* é o ganho do modo comum e *Amd* é o ganho do modo diferencial.

Quando a equação (5-4) é satisfeita, o ganho do modo comum se anula e a equação (5-6) se torna:

Desta forma, o amplificador só amplifica a tensão do modo diferencial.

O circuito da figura 5-10 mostra o amplificador diferença com as tensões *vmc* e *vmd*.



**Fig. 5-10: Amplificador diferença em função de *vmc* e *vmd*.**

OBSERVAÇÃO: Em muitas aplicações as informações de interesse se concentram nas tensões *va* e *vb* ou em suas diferenças (*vmd*), enquanto o modo comum contém o ruido que está presente em todos os circuitos elétricos. Por exemplo, na área médica os sinais de tensão aplicados são de baixa amplitudes, na maioria das vezes, menores que a amplitude dos ruídos presentes advindos de lâmpadas fluorescentes ou motores. Neste caso, é importante que se elimine o ruído associado a tensão de modo comum (*vmc*).

5.5 ALGUNS CIRCUITOS TÍPICOS

A seguir são dados alguns circuitos típicos com suas respectivas equações onde o estudante deve praticar a análise nodal para chegar até estas equações.

**AMPLIFICADOR INVERSOR**

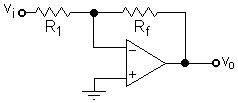


Fig. 5-11: Amplificador inversor.

**AMPLIFICADOR SOMADOR INVERSOR**

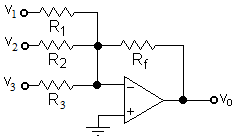


Fig. 5-12 Circuito somador inversor

**MULTIPLICADOR DE TENSÃO**

*vo = Kvi*, onde *K* é o ganho do circuito amplificador.

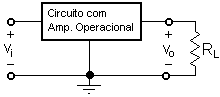
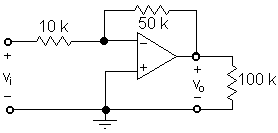
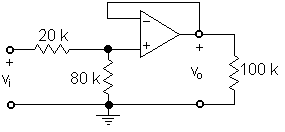


Fig. 5-13: Diagrama em bloco de um multiplicador de tensão

Dependendo do valor de *K* podem-se ter várias configurações, conforme exemplos abaixo.



**Fig. 5-14: Multiplicador de tensão. *K = –5*; *vo = –5vi***



**Fig. 5-15: Multiplicador de tensão. *K = 0,8*; *vo = 0,8 vi***

**SEGUIDOR DE TENSÃO OU BUFFER**

*vo = vi*

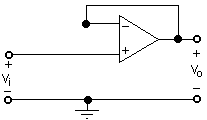


Fig. 5-16: Seguidor de tensão ou "buffer"

O buffer tem uma aplicação muito importante na eliminação do *efeito de carga* quando dois circuitos são conectados conforme ilustra a figura 5-17.

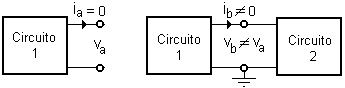
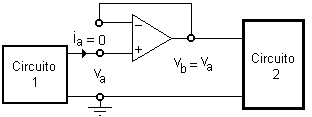


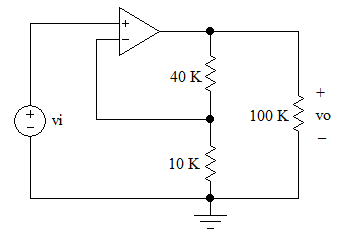
Fig. 5-17: Efeito de carga quando dois circuitos são conectados diretamente

Este efeito pode ser eliminado com o uso de um buffer conforme ilustrado na figura 5-18.



**Fig. 5-18: Eliminação do efeito de carga**.

Exercício: Mostre que o circuito da figura 5-19 é um multiplicador não inversor de constante *5*.



**Fig. 5-19:**

**Circuito multiplicador não inversor**

Exercício: Determine as correntes *i1*, *i2* e *io* e as tensões *va* e *vo*, no circuito da figura 5-20. Sugestão: use análise de malha.

**Resposta:** *i1 = 2,4mA, i2 = -i1 = -2,4mA, io = i1 = 2,4mA, va = -2,4V e vo = -12V*

Diagrama, Esquemático

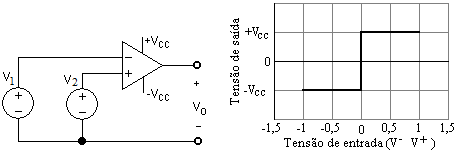
Descrição gerada automaticamente

**Fig. 5-20: Circuito para o uso da análise de malhas.**

5.6 APLICAÇÕES.

(1) **COMPARADORES**

Um comparador, uma variante do amplificador operacional, é projetado para comparar as tensões de entrada não-inversora e inversora. Conforme mostrado na figura 5-21, quando a tensão de entrada não-inversora é maior, a saída fica tão alta quanto possível, até ou próxima de +Vcc. Por outro lado, se a tensão de entrada inversora é maior, a saída fica tão baixa quanto possível, até ou próxima de –Vcc. Entretanto, os amplificadores operacionais não são projetados para operar com as saídas saturadas, enquanto os comparadores o são. Consequentemente, os comparadores são mais rápidos e mais baratos.

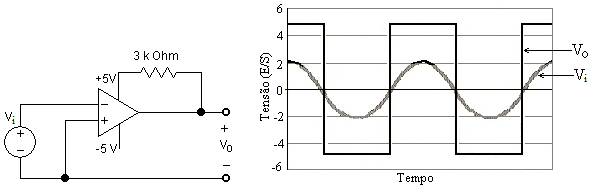


(a) (b)

**Fig. 5-21 (a) Comparador ideal; (b) Sua curva característica**.

Destaca-se aqui dois comparadores bem conhecidos: o *LM339* da “National Semiconductor” e o *MAX917* da Maxim. O *LM 339* requer um resistor, chamado de resistor de parada, conectado entre o pino de saída e o *+Vcc*. Ele é de utilização geral enquanto o *MAX917* é indicado para aplicações em baixa potência, como por exemplo, dispositivos manuais.

Uma aplicação comum de um comparador é o detector de cruzamento por zero, mostrado na figura 5-22(a). Conforme pode ser visto na figura 5-22(b), quando *Vs* é positiva, *Vo* deve estar próxima a *+5 V* e quando *Vs* é negativa, *Vo* estará próxima a –*5 V*. Portanto, o valor da saída varia cada vez que *Vs* passa por zero.

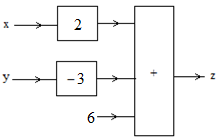


(a) (b)

**Fig. 5-22 (a) Detector de cruzamento do zero; (b) Tensões de entrada e de saída**.

(2) **IMPLEMENTAÇÃO DE UMA EQUAÇÃO ALGÉBRICA**

Seja, por exemplo, a equação algébrica: *z = 2x – 3y + 6.* Supondo que *z* é a variável de saída representada por uma tensão *vz*, enquanto que as variáveis *x* e *y* são variáveis de entrada representadas pelas tensões *vx* e *vy*, respectivamente. Então, o termo *2x* pode ser obtido por um amplificador não inversor de ganho *2*, o termo *– 3y* pode ser obtido por um amplificador inversor de ganho *3* e a constante *6* pode ser fornecida por uma fonte dc, muitas vezes extraída da própria alimentação do circuito através de um divisor de tensão. Assim, a variável *z* será obtida por um somador não inversor. O diagrama em bloco da figura 5-23 ilustra esta situação.



**Fig. 5-23: diagrama em bloco de uma equação linear.**

Deixa-se a cargo de o estudante projetar cada um dos blocos da figura 5-23.

OBSERVAÇÃO: É recomendável, sempre que possível, escolher resistores com valores entre *5 KΩ* e *500 KΩ* para circuitos com amplificadores operacionais.

**CAIXA DE FERRAMENTAS**



AMPLIFICADOR IDEAL: *e1 = e2, i1 = i2 = 0*

**PROBLEMÁTICA**

1) Encontre *vo* e *io* no circuito da figura P5-1.

**Resposta:** *–18 V e 2,50 mA.*

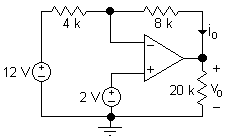


Fig. P5-1

2) Encontre *v* e *i* no circuito da figura P5-2.

**Resposta:** *v = 5 V e i = 0,20 mA*

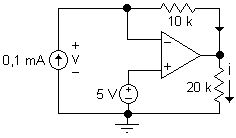


Fig. P5-2

3) No amplificador de diferença da figura P5-3, *vb = 6 V*. Especifique o intervalo no qual deve ser mantida a tensão *va* para que o amplificador não entre na região de saturação.

**Resposta:** *3,50 < va < 8,50.*

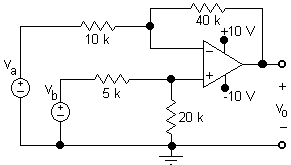


Fig. P5-3

4) Suponha que o amplificador operacional da figura P5-4 está operando na região linear.

a) Calcule a potência dissipada pelo resistor de *12 k.*

b) Repita o item (a) com o amplificador operacional retirado do circuito, isto é, com o resistor de *12 k* ligado em série com a fonte de tensão e o resistor de *68 k.*

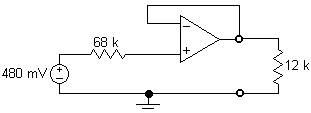


Fig. P5-4

5) Determine as tensões dos nós para o circuito da figura P5-5.

**Resposta:** *va = –12 V, vb = vc = vd = –4 V, ve = vg = –16/5 V e vf = –24/5 V*

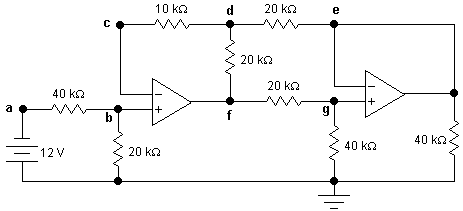


Fig. P5-5

6) Encontre *vo* em função de *va* e vb na figura P5-6.

**Resposta:** *v0 = 8(va + vb) V*

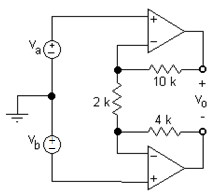
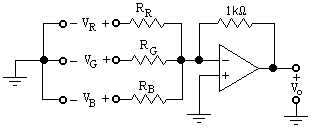


Fig. P5-6

7) Considerando ideal o amplificador operacional da figura P5-7 determine os valores de *RR*, *R*G e *RB* para

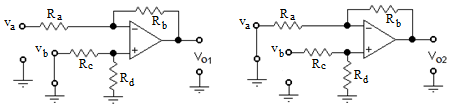
*vo =* –*(0,30VR + 0,59VG + 0,11VB).*

**Resposta:** *RR = 3,33 Ω, RG = 1,69 Ω e RB = 9,09 Ω.*



# Fig. P5-7

8) A saída do circuito diferença mostrado na figura 5-9, dada pela equação (5-3), pode ser calculada em função de sua entrada, aplicando o teorema da superposição de circuitos lineares. A aplicação deste teorema consiste em somar as contribuições individuais de cada fonte, considerando-se nulas as demais, conforme mostram as figuras 5-8(a) e 5-8(b).



(a) (b)

**Fig. P5-8: (a) Anula-se a fonte *Vb*; (b) Anula-se a fonte *Va***

(a) Expresse a saída em função da entrada, para o circuito da figura 5-8(a).

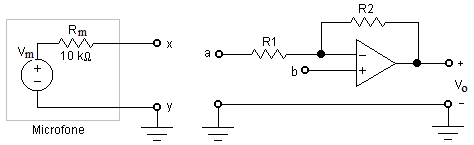
(b) Expresse a saída em função da entrada, para o circuito da figura 5-8(b).

(c) Mostre que a soma das saídas encontradas em (a) e (b) resulta na equação (5-3).

(d) Determine a relação entre os resistores para que o circuito diferença tenha a seguinte expressão:

*Vo = (Rb/Ra)(Vb – Va)*.

9) Um microfone tem uma tensão sem carga de *vm = 20 mV*, como mostrado na figura P5-9(a). Um amplificador operacional está disponível, como mostrado na figura P5-9(b). Deseja-se fornecer uma tensão de saída de *4 V*. Projete um circuito amplificador inversor e um circuito não inversor e compare a resistência de entrada nos terminais *x-y* vistas pelo microfone. Qual configuração você recomendaria, de modo a obter um bom desempenho na presença de variação da resistência *Rm* do microfone?



(a) (b)

## **Fig. P5-9**

10) Mostre que o circuito da figura P5-10 é um conversor tensão/corrente, encontrando *vo* em função de *io*.

**Resposta:***vo = –Rfio*

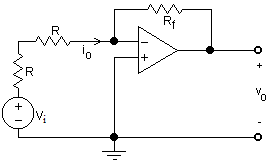


Fig P5-10

11) O engenheiro que projetou o circuito da figura P5-11 afirma que a tensão de saída varia de *5 V* a –*5 V* quando a tensão *va* varia de *0 V* a *5 V*. Suponha que o amplificador operacional seja ideal. (a) Faça um gráfico da tensão de saída *vo* em função da tensão de entrada *va*­. (b) Você concorda com a afirmação do engenheiro?

**Resposta:** *vo = 5 – 2va*

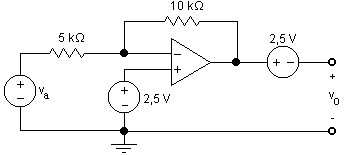


Fig. P5-11

12) Mostre que o circuito da figura P5-12 se comporta como um amplificador de corrente, calculando *iL* em função de *is*.

**Resposta:** *iL = –(1 + Rf/R1)is*

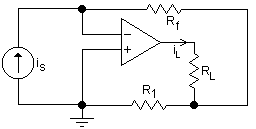
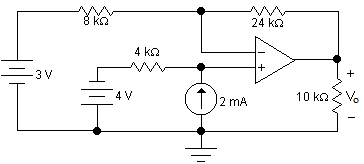


Fig. P5-12

1. Utilizando superposição, determine a tensão *vo* para o circuito mostrado na figura P5-13.

**Resposta: *vo = 7 V***.



**Fig. P5-13**.

14) Mostre que o circuito da figura P5-14 é um conversor de corrente para tensão, calculando *vout* em função de *iin*.

**Resposta:** *vout = –Rfiin.*

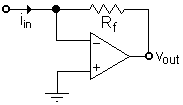
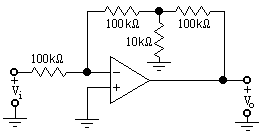


Fig. P5-14

15) Considerando ideal o amplificador do circuito da figura P5-15, determine o ganho de tensão.

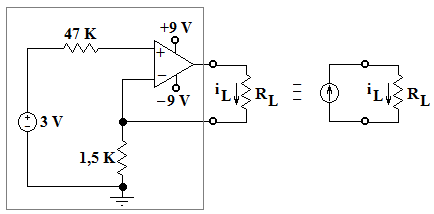
**Resposta:** *12.*



**Fig. P5-15**

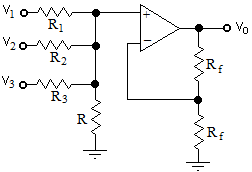
16) O circuito envolto no retângulo da figura P5-16 se comporta como uma fonte de corrente ideal contanto que a resistência *RL* não exceda um certo valor. Comprove este comportamento e determine o valor máximo de *RL* para o qual o circuito se comporta como uma fonte de corrente.

**Resposta:** *RL = 3 K****Ω***



**Fig. P5-16**

17) Mostre que o circuito da figura P5-17 é um circuito somador não-inversor.



**Fig. P5-17**

18) A figura P5-18 mostra um circuito que simula uma resistência negativa. Mostre que nos terminais *ab* a resistência vista pela fonte de corrente é dada por:

*Rab =* –*(R1Rf)/R2*

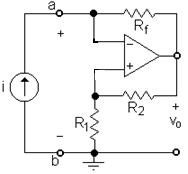


Fig. 5-18: Conversor de resistência negativa

19) Encontre a tensão *vo* no circuito da figura P5-19.

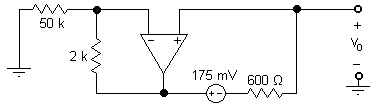


Fig. P5-19

1. (\*) Lançado em *1968* pela Fairchild. O prefixo *μA* indica que se trata de um micro circuito. [↑](#footnote-ref-1)