



AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Marcelo Brancalhão Gaspar ¹

Resumo: Amplificador Operacional também conhecido como AMPOP é um amplificador de tensão com entrada diferencial, cujas entradas se aproximam das de um amplificador ideal. Este circuito tem infinitas aplicações na área da eletrônica. O objetivo deste artigo é apresentar a teoria e o conceito dos amplificadores operacionais, visando mostrar alguns dos amplificadores mais utilizados no meio acadêmico de eletrônica: o amplificador inversor, amplificador não inversor, realimentações, ganho de potência, ganho de tensão, ganho de corrente, sistema de saturação e atenuação de sinal, equacionando todos os processos necessários para a compreensão e elaboração de um projeto que envolva o AMPOP tais como a equação da função de transferência de sistemas lineares, levantamento da resposta de um AMPOP em escala logarítmica, equacionamento para o sinal de saturação e atenuação e o equacionamento do ganho, fazendo considerações pertinentes durante cada passo.

Palavras-chave: Amplificadores Operacionais, AMPOP, Amplificação, Atenuação.

Abstract: Operational amplifier OPAMP is also known as a voltage amplifier with differential input, whose inputs are close to an ideal amplifier. This circuit has endless applications in the area of electronics. The purpose of this article, present theory and the concept of operational amplifiers. Furthermore, this article aims to show some of the most used in the academic world of electronic amplifiers. The inverting amplifier, non-inverting amplifier, feedbacks, power gain, voltage gain, current gain, saturation system and signal attenuation and also equate all the necessary process for understanding and development of a project that involves OPAMP such as equation of the transfer function of linear systems, the lifting of the OPAMP response in logarithmic scale, the equation for saturation and signal attenuation, and finally the gain equation. Making relevant considerations for each step.

Keywords: Operational Amplifiers, OPAMP, Amplification, Attenuation, Saturation

1. INTRODUÇÃO

Para este artigo serão definidos alguns conceitos e conhecimentos importantes para a compreensão dos amplificadores operacionais e, assim, poder utilizá-los em sua vasta aplicação: tratamento de sinal, amplificação e a atenuação de formas de onda, transformar um sinal analógico em digital, entre outros. Para concretizar esse conhecimento é necessário: 1- Definir e conhecer alguns parâmetros dos circuitos lineares (Os AMPOPs são circuitos lineares, para isso, necessita o entendimento do conceito de circuitos lineares); 2 - Descobrir a sua função de transferência, pois todas

as equações são baseadas na função de transferência (FT), que uma vez encontrada, permite identificar todas os parâmetros de entrada e saída de um circuito assim como a equação de ganho de potência, tensão e corrente da saída em relação a entrada. Todas as equações de ganho têm sua resposta em decibéis, por isso, é primordial ter conhecimento sobre logaritmos naturais. Tendo compreendido todos os princípios básicos de funcionamento dos circuitos lineares, pode-se compreender o esquemático, a nomenclatura de cada terminal e o que significa cada simbologia referente a um dado terminal do AMPOP.

¹Acadêmico do Curso de Engenharia Eletrônica, DAELN, campus Florianópolis, IFSC .<marcelo.gaspar@hotmail.com>

Finalmente, com todos esses conhecimentos bem consolidados, é possível partir para a parte prática do AMPOP: conhecer os métodos de realimentação, as características de cada método, seus prós e contras, tornando possível o levantamento do equacionamento da amplificação do sinal e prever o funcionamento de uma das configurações mais usadas no mundo acadêmico, os amplificadores inversores e os não inversores.

2. REFERENCIAL TEÓRICO, SISTEMAS LINEARES.

Esta parte consiste em encontrar a função de transferência de um sistema linear. O AMPOP pode ser relacionado a uma equação matemática literal, que relaciona uma saída e uma entrada de um sistema linear. Assim, é possível definir as funções de transferências. A figura 1 apresenta um esquemático da configuração de um circuito quadripolo que é padrão para todos os sistemas lineares.

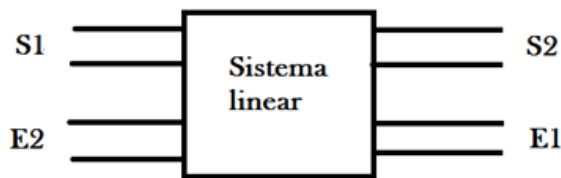


FIGURA 1 – Quadripolo de um sistema linear

Com a figura 1, podemos determinar o equacionamento das funções de transferência.

$$FT1 = \left(\frac{S1}{E1} \right) \quad [1]$$

$$FT2 = \left(\frac{S1}{E2} \right) \quad [2]$$

$$FT3 = \left(\frac{S2}{E2} \right) \quad [3]$$

$$FT4 = \left(\frac{S2}{E1} \right) \quad [4]$$

$$FT5 = \left(\frac{S2}{S1} \right) \quad [5]$$

Pode-se observar que nas equações 1, 2, 3, 4, 5 que existe um padrão bem claro entre as funções de transferência. Todas as F.T são iguais a saída

dividida pela entrada, todas as próximas equações vistas serão baseadas neste princípio.

2.1 AMPLIFICAÇÃO, ATENUAÇÃO E GANHO.

A amplificação é dada referente a um valor numérico da função de transferência, tem o que se chama de amplificação ou atenuação. Se o resultado da F.T for > 1 e Ganho também > 1 então é uma amplificação de sinal. Se o valor da F.T for < 1 e o Ganho também < 1 então, é uma atenuação de sinal. O ganho pode relacionar quaisquer grandezas em um circuito. Os mais utilizados são: O ganho de tensão (GV) que é dado pela equação 6, o ganho de corrente (GI) que é dado pela equação 7 e o ganho de potência (GP) que é dado pela equação 8.

$$GV = \left(\frac{Vs}{Ve} \right) \quad [6]$$

$$GI = \left(\frac{Is}{Ie} \right) \quad [7]$$

$$GP = \left(\frac{Ps}{Pe} \right) \quad [8]$$

Novamente é possível notar um padrão nas equações de ganho, todas as equações são iguais a entrada dividido pela saída, isso mostra que é um sistema linear e que respeita a função de transferência encontra. Entretanto, essas equações de ganho não são tão simples, todas as respostas são em decibéis, portanto é necessário atribuir um fator logaritmo nestas equações. Portanto o equacionamento prático para as equações de ganho é dado pelas equações 9, 10, 11.

$$Gp(dB) = 10 * \log \left(\frac{ps}{pe} \right) \quad [9]$$

$$Gv(dB) = 20 * \log \left(\frac{Vs}{Ve} \right) \quad [10]$$

$$Gi(dB) = 20 * \log \left(\frac{Is}{Ie} \right) \quad [11]$$

Nota-se que o padrão da saída dividido pela entrada, caracteriza um sistema linear. Portanto, para um AMPOP não muda. Tendo conhecimento do logaritmo deve-se tomar pequenos cuidados com os dados obtidos. Por exemplo quando o $G > 1$ vai fazer $G(dB) > 0$, quando $G = 1$ vai fazer $G(dB) = 0$ e quando $G < 1$ vai fazer $G(dB) < 0$.

3. AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Tendo compreendido como funciona e como é encontrada as equações de um sistema linear, pode-se compreender como os AMPOPs funcionam. O AMPOP é um amplificador de tensão com entrada diferencial cujas características se aproximam das de um amplificador operacional ideal. Essas Características são, que a resistência de entrada é infinita $R_e \rightarrow \infty$, devido a sua alta impedância de entrada, a resistência de saída nula $R_s \rightarrow 0$, devida a sua baixa impedância de saída. R_e e R_s podem ser tão distintos pelo fato que a entrada e saída do AMPOP são isoladas, como pode-se ver na figura 3. Com relação a frequência de resposta C.C \rightarrow Infinito HZ e uma das melhores características dos AMPOPs é que ele é “Estável” à variação da temperatura, por questões físicas é impossível um circuito ser completamente estável à temperatura pois os elétrons dentro dele vão agitar-se e isso mudará o funcionamento do circuito. Entretanto, o AMPOP tem uma faixa larga de tolerância ao aumento de temperatura. Na figura 2 um pode-se observar a simbologia do AMPOP; $V(+)$ é chamado de entrada não Inversora, $V(-)$ é chamado de entrada Inversora, V_s é a saída e V_{cc} , V_{ee} são tensões de Alimentações, também chamados de tensões de saturações.

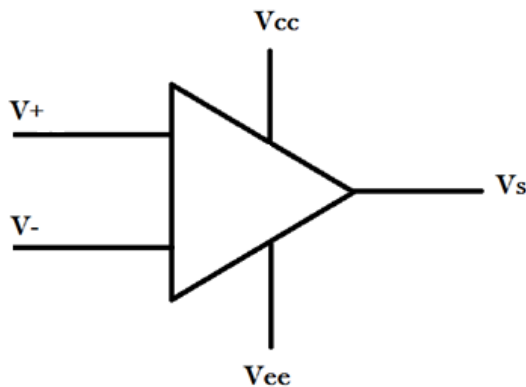


FIGURA 2 – Simbologia do ampop; imagem retirada de IRWIN, J. D. **Análise básica de circuitos para engenharia.**

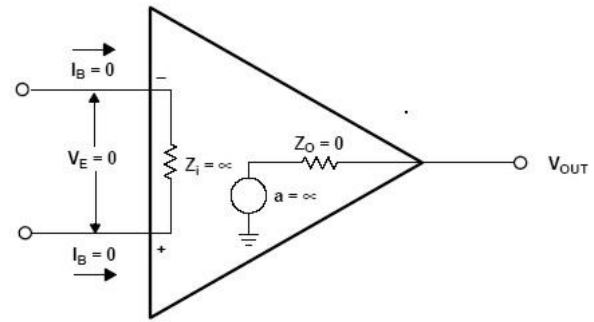


FIGURA 3 – *Modelo Interno do Amplificador Operacional*; imagem retirada de BOYLESTAD, R.; NASHELESKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos.**

Na figura 3 podemos ver o esquemático dentro de do AMPOP e a sua configuração. Pode-se notar que a entrada é isolada da saída e também que existe um terra virtual. Com isso, pode-se chegar a algumas conclusões e fazer alguns equacionamentos. Primeiramente da diferença das tensões de entrada que é dado por;

$$V_d = (V_+) - (V_-) \quad [12]$$

A amplificação de sinal deve-se dar pela multiplicação entre o ganho do malha aberta (G_v) e a diferença de das tensões de entrada (V_d). Como por definição do começo da sessão 3, $G_v \rightarrow \infty$, logo a amplificação será $G_v * V_d = +$ ou $-\infty$. Por questões físicas é obvio que a saída não haverá uma resposta infinita, essa “tensão infinita” será as tensões de saturações. Se for $+\infty$ será a tensão de saturação positiva V_{CC} e caso seja $-\infty$ será a tensão de saturação negativa V_{EE} . Esta característica é mostrada na equação 13 que é referente a tensão de saída do circuito.

$$V_s = (G_v * V_d) - (R_s * I_s) \quad [13]$$

Sabe-se que $R_s = 0$. Então a tensão de saída do circuito sempre será $V_s = G_v * V_d$. Logo, V_s sempre será $+$ ou $-\infty$, portanto V_{CC} ou V_{EE} . Essa característica do AMPOP tender ter o sinal em V_{CC} ou V_{EE} é dado pelo fenômeno da saturação. Para determinar se a saturação será positiva (V_{CC}) ou negativa (V_{EE}), deve-se analisar as equações 14 e 15.

$$V_s = G_v * V_d \quad [14]$$

$$V_s = G_v * (V(+) - V(-)) \quad [15]$$

As equações 14 e 15 mostram que a resposta/saída do circuito estará sempre em VCC ou VEE. Descobrir para qual das duas tensões de saturação ira, depende apenas da diferença entre as tensões de entrada V_d . Caso, $V(+)>V(-)$, então $V_d>0$. Portanto $V_s=+\infty$ que no caso será $V_s=V_{cc}$. Se, $V(+)<V(-)$, então $V_d<0$, logo $V_s=-\infty$ que no caso será $V_s=V_{ee}$. Comprova que a saturação de um amplificador operacional ocorre nas tensões de alimentação Vcc ou Vee.

3 METODO DE REALIMENTAÇÃO

Ao associarmos aos AMPOPs e outros dispositivos (R,L,C, Transistores e Diodos) concebe-se circuitos com características próprias de funcionamento. Basicamente estes circuitos podem ser classificados em lineares e não lineares. Podemos realimentar o Amplificador Operacional de três maneiras: sem realimentação, realimentação positiva e realimentação negativa. Sem realimentação, é dito realimentação negativa pois a entrada é no terminal $V(-)$ a entrada inversora. A realimentação negativa também é conhecida como operação em malha aberta, pois não se tem o controle da amplificação, utiliza-se os dados do fabricante. Este circuito pode ser usado para isolar outros circuitos devido a sua alta impedância de entrada. (figura 4)

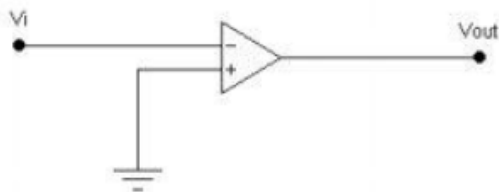


FIGURA 4 - AMPOP sem alimentação.

Realimentação positiva, é dita realimentação positiva pois está ligado ao terminal $V(+)$, que a entrada não-inversora. Denomina-se este modelo como operação em malha fechada. O valor do ganho é definido em projeto e assim o amplificador não poderá trabalhar para amplificar outros sinais, pois a configuração impede-o. (figura 5)

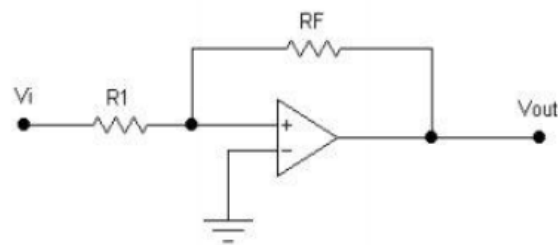


FIGURA 5 - AMPOP com alimentação positiva.

Realimentação negativa tem o mesmo funcionamento que o AMPOP com realimentação positiva. Nota-se na figura 5 que as entradas estão invertidas, a entrada do AMPOP com realimentação negativa é o $V(-)$, quando é feito isso o sinal na saída do circuito terá a mesma amplificação que o AMPOP com alimentação positiva. Todavia, com sinal negativo o sinal será oposto do AMPOP com alimentação positiva

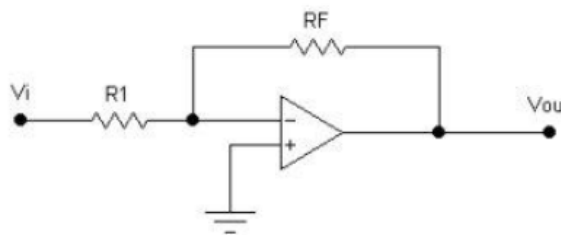


FIGURA 6 - AMPOP com alimentação negativa.

O AMPOP com realimentação negativa é considerado um curto virtual devido a sua alta impedância de entrada e ao seu ganho de malha aberta tender ao infinito. Como a tensão entre as duas entradas $V(+)$ e $V(-)$ são nulas (curto circuito) e a corrente também é nula, dizemos que entre as duas entradas existe um curto circuito virtual e que na entrada inversora temos um terra virtual.

4 METODOS DE AMPLIFICAÇÃO.

Existem vários métodos de amplificação de sinal, entretanto existe dois que são os mais eficientes, práticos e comum no mundo acadêmico. O primeiro chama-se amplificador Inversor, no circuito do amplificador inversor faz com que o um sinal de entrada, saia defasado 180° em relação ao sinal de entrada, por isso, denomina-se Amplificador Inversor, ele faz uma inversão de fase na forma de onda que é aplicada no circuito. A configuração deste amplificador parte de uma realimentação negativa e utiliza a equação 6, a equação de ganho. Para determinar qual o valor da

amplificação, lembrando que o sinal será invertido em relação a entrada pois trata-se de uma realimentação negativa. A equação para a amplificação deste AMPOP é dado por;

$$G = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right) \quad [16]$$

Onde $G \leq 0$. Analisando a equação 16 pode-se ver que respeita todos os princípios vistos até aqui, a coerência com a função de transferência e com a equação do ganho pode ser visto da relação de dividir a entrada pela saída. Finalmente com a equação 16 podemos determinar o ganho do amplificador inversor e assim utiliza-lo para a aplicação desejada. O esquemático do circuito pode ser visto na figura 7.

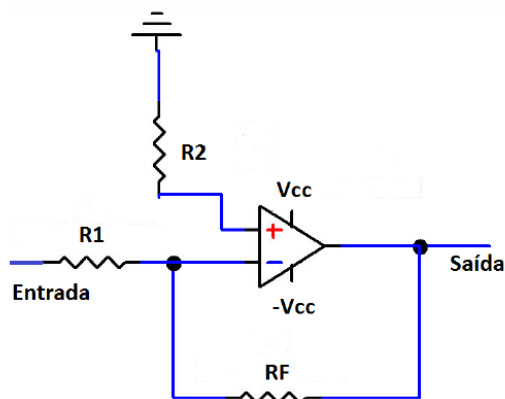


FIGURA 7 - AMPOP inversor, imagem retirada de SADIKU, M. e ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de circuitos elétricos.**

O segundo método de amplificação de sinal tão utilizado como o primeiro é o amplificador não Inversor. O amplificador não inversor não possui defasagem, entre a entrada e a saída. Portanto só visualizamos em sua saída a amplificação sem inversão. A configuração deste amplificador é feita a partir de uma realimentação negativa, entretanto a entrada do sinal não será V(-) e sim V(+). A equação de amplificação do AMPOP-não inversor é;

$$G = 1 + \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \quad [17]$$

Onde $G \geq 1$. Na equação 17 pode-se ver também a coerência com a função de transferência encontrada. Com a equação 17 pode-se encontrar a amplificação do sinal desejada e utilizar nas mais diferenças aplicações. A configuração do AMPOP não inversor pode ser visto na figura 8.

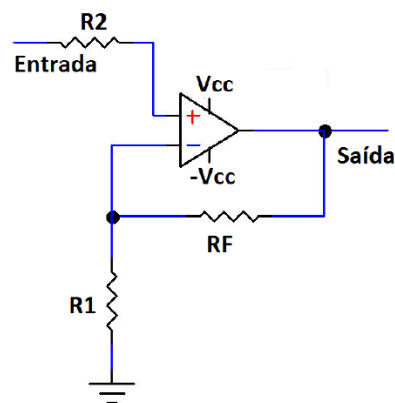


FIGURA 8 - Ampop não inversor imagem retirada de IRWIN, J. D. **Análise básica de circuitos para engenharia**

5 CONCLUSÃO

Para a compreensão dos amplificadores operacionais e descobrir a melhor maneira de trabalhar com os mesmos, é necessário determinar seus parâmetros de entrada e saída, encontrar a função de transferência para cada circuito, determinar as equações de ganho de potência, corrente, tensão e utilizar cada circuito para sua aplicação específica, respeitando seus limites físicos operacionais. O conhecimento dos AMPOPs é extremamente valioso devido a sua imensa aplicação na eletrônica, essas aplicações são as mais distintas possíveis e existe uma enorme gama de circuitos que utilizam os AMPOPs, os mais simples e que são derivações dos circuitos aprendidos nesse artigo são: multiplicador de ganho constante, ganhos com múltiplos estágios, soma de tensões, buffer de tensão, fonte de tensão controlada por tensão, fonte de corrente controlada por tensão, entre outros. Essas são as aplicações dos AMPOPs em um sistema linear. Entretanto os AMPOPs podem ser utilizados em sistemas não lineares, que são mais complexos, que utiliza elementos resistivo, indutivo, capacitivo, transistores e diodos. Esse tipo de topologia é basicamente chamado de sistema não linear, tornando possível criar outros tipos de circuitos e assim utiliza-los em outras aplicações, tais como: criação de forma de ondas (senoidal, quadrada, pulso, dente de serra, rampa e triangular), essas formas de ondas podem ser trabalhadas em frequências extremamente altas e assim esses circuitos podem ser usados em aplicações mais robustas, como determinar a frequência de funcionamento de um computador simples. Todas essas topologias são extremamente úteis, cada um para sua aplicação específica, com tudo, todo o conhecimento empregado para criar todos esses

circuitos, sendo ele complexo ou simplório, deve-se necessariamente passar por todos os estágios (compensação do equacionamento e como funciona a fundo os métodos de realimentação) que é apresentado neste artigo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de demonstrar minha enorme gratidão ao meus pais por me proporcionar a condição de estudar em uma instituição federal tão renomada como o IFSC, a minha noiva que sempre me apoia e aconselha a tomar a melhor estratégia para minha carreira e na vida. Aos professores da instituição que sempre buscam o máximo do aluno em todas as disciplinas.

REFERENCIAS

BOYLESTAD, R.; NASHELESKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. 5. Ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.

IRWIN, J. D. **Análise básica de circuitos para engenharia**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

SADIKU, M. e ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de circuitos elétricos**. P. Alegre: Bookman, 2003.

SCHILICHTING, L. C. M. **Amplificadores Operacionais**. Nota de aula. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Campus Florianópolis, Instituto Federal de Santa Catarina, 2013.