

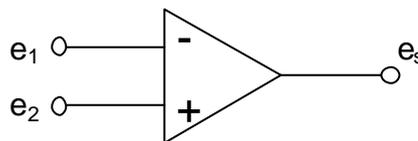
## Amplificador Operacional

---

### 7.1 INTRODUÇÃO

Os amplificadores operacionais são dispositivos extremamente versáteis com uma imensa gama de aplicações em toda a eletrônica.

Os amplificadores operacionais são amplificadores de acoplamento direto, de alto ganho, que usam realimentação para controle de suas características. Eles são hoje encarados como um componente, um bloco fundamental na construção de circuitos analógicos. Internamente, são constituídos de amplificadores transistorizados em conexão série. Externamente, são geralmente representados pelo símbolo,



*Fig. 1 Símbolo de um amplificador operacional*

em que convencionalmente só entradas e saídas aparecem e não as conexões das fontes de alimentação.

Os amplificadores operacionais são usados em amplificação, controle, geração de formas de onda senoidais ou não em frequências desde C.C. até vários Megahertz. Com emprego na realização das funções clássicas matemáticas como adição, subtração, multiplicação, divisão, integração e diferenciação, os amplificadores operacionais são os elementos básicos dos computadores analógicos. São úteis ainda em inúmeras aplicações em instrumentação, sistemas de controle, sistemas de regulação de tensão e corrente, processamento de sinais, etc.

## 7.2 AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

As propriedades de um circuito amplificador operacional ideal são:

- a) ganho de tensão diferencial infinito
- b) ganho de tensão de modo comum igual a zero
- c) tensão de saída nula para tensão de entrada igual a zero
- d) impedância de entrada infinita
- e) impedância de saída igual a zero
- f) faixa de passagem infinita
- g) deslocamento de fase igual a zero
- h) deriva nula da tensão de saída para variações de temperatura

Na prática, as limitações dos amplificadores operacionais são muitas, ocorrendo, entretanto, um contínuo aperfeiçoamento das características dos mesmos pelos seus fabricantes.

## 7.3 AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Algumas considerações

Ganho de tensão - Normalmente chamado de ganho de malha aberta, medido em C.C.(ou em frequências muito baixas), é definido como a relação da variação da tensão de saída para uma dada variação da tensão de entrada. Este parâmetro, notado como  $A$  ou  $A_{vo}$ , tem seus valores reais que vão desde alguns poucos milhares até cerca de cem milhões em amplificadores operacionais sofisticados. Normalmente,  $A_{v0}$  é o ganho de tensão diferencial em C.C.. O ganho de modo comum é, em condições normais, extremamente pequeno.

Tensão de "offset" - A saída de um amplificador operacional ideal é nula quando suas entradas estão em curto circuito. Nos amplificadores reais, devido principalmente a um casamento imperfeito dos dispositivos de entrada, normalmente diferencial, a saída do amplificador operacional pode ser diferente de zero quando ambas entradas estão no potencial zero. Significa dizer que há uma tensão C.C. equivalente, na entrada, chamada de tensão de "offset". O valor da tensão de "offset" nos amplificadores comerciais estão situado na faixa de 1 a 100 mV. Os componentes comerciais são normalmente dotados de entradas para ajuste da tensão de "offset".

Corrente de "offset" - O amplificador operacional ideal apresenta impedância de entrada infinita. Os amplificadores operacionais reais, entretanto, apresentam correntes C.C. de polarização em suas entradas. Essas correntes são, geralmente devidas às correntes de base dos transistores bipolares de entrada do amplificador operacional ou ainda correntes de fuga da porta do transistor de efeito de campo em amplificadores dotados de FETs à entrada. Como, na prática, os dispositivos simétricos de entrada não são absolutamente iguais, as duas

correntes de entrada são sempre ligeiramente diferentes. A diferença dessas correntes é chamada de corrente de "offset" de entrada.

Faixas de passagem - Existem várias maneiras de definir a faixa de passagem de um dispositivo. No caso dos amplificadores operacionais é usual referir-se a "Unit-Gain Crossover Frequency" - a frequência em que o ganho de tensão passa pelo ganho unitário e que chamaremos  $f_u$ . Nos amplificadores reais, esta frequência pode estar na faixa de 1 kHz até 100 MHz. Amplificadores operacionais monolíticos apresentam  $f_u$  na faixa dos 0,5 a 5 MHz. Medidas do tempo de subida ( $t_s$ ) para pequenos sinais com o amplificador operacional na configuração não inversora a ganho unitário, permitem, com o uso da expressão:

$$B = \frac{0,35}{t_s}, \text{ obter valores da faixa de passagem muito próximos ao } f_u \text{ definido.}$$

Muito importante nos amplificadores operacionais é a faixa de passagem a plena potência. Essa faixa de passagem, muito menor que  $f_u$  é definida como a máxima frequência em que uma onda senoidal de sinal grande pode ser obtida à saída sem distorção apreciável. Geralmente a faixa de passagem à plena potência é especificada a uma dada saída, tipicamente 10V.

"Slew Rate" - Este parâmetro está ligado à faixa de passagem à plena potência. Quando num operacional é injetado um sinal senoidal de alta frequência, de amplitude superior a um certo valor prefixado, observa-se a sua saída uma onda triangular. A inclinação desta forma de onda triangular é o "slew rate".

Esta limitação tem origem nas características de construção do dispositivo e está diretamente ligado a um elemento, o chamado capacitor de compensação de fase e à máxima taxa com que este pode ser carregado. Este capacitor, que nos amplificadores operacionais monolíticos apresenta tipicamente 30 pF, conta com fontes de corrente de cerca de 30μA disponíveis para carregá-lo. Assim, dependendo da amplitude do sinal desejado na saída, o amplificador operacional "não consegue acompanhar o sinal de entrada". Como a corrente num capacitor é dada pela capacitância vezes a taxa de variação da tensão (fórmula abaixo), ocorre limitação chamada "slew rate":

$$I = c \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1)$$

$$S_r = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{I}{C} \quad (2)$$

Em amplificadores operacionais monolíticos, de uso geral,  $S_r$  vale alguns Volts por microssegundos. Em amplificadores operacionais construídos pela técnica de C.I.s híbridos, este valor pode ser muito grande, por exemplo,  $S_r = 2000 \text{ V}/\mu\text{s}$ .

Tendo comentado os parâmetros acima, convém lembrar também que a impedância de entrada nos amplificadores operacionais não é infinita sendo da ordem de  $10^8 \Omega$  em operacionais monolíticos, da ordem de  $10^{12} \Omega$  em operacionais com entradas dotadas de FET

e até  $10^{13}\Omega$  em operacionais construídos com dispositivos discretos. Da mesma forma, a impedância de saída não é nula, apresentando os operacionais práticos, valores que podem ir de alguns ohms a cerca de  $3\text{ k}\Omega$ .

## 7.4 ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO BÁSICA INVERSORA

Os amplificadores operacionais apresentam, geralmente, circuitos de entrada em configuração diferencial. A figura 2 mostra as entradas inversora (-), não inversora (+), as tensões de entrada  $e_A$ ,  $e_B$  e a tensão de saída  $e_S$ .

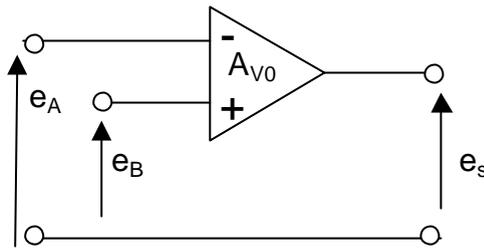


Fig. 2 Representação das tensões de entrada e de saída do Amplificador Operacional

A tensão de saída, por causa do circuito diferencial é, portanto, independente das tensões  $e_A$  e  $e_B$ , dependendo sim, de sua diferença,  $(e_B - e_A)$ . Exemplificando, sendo  $e_B=10,001$  e  $e_A = 10,000$  V, a entrada efetiva é  $0,001$  V como se  $e_B$  fosse  $0,001$  V e  $e_A$  igual a zero. Esses 10 Volts são então chamados de tensão de modo comum e um amplificador operacional ideal rejeitará essa tensão de modo comum, respondendo apenas ao  $0,001$  Volt.

Admitindo um amplificador operacional alimentado com  $+ 15$  Volts, sua tensão de saída será de no máximo, cerca de  $+ 13$  Volts, valores em que ocorrem as saturações. Esses limites só serão maiores se foram aumentadas às tensões de alimentação.

A figura 3 mostra um amplificador operacional que é linear apenas na faixa dos  $+ ou - 10$  Volts. Através da curva de transferência, podemos obter o valor do ganho de malha aberta.

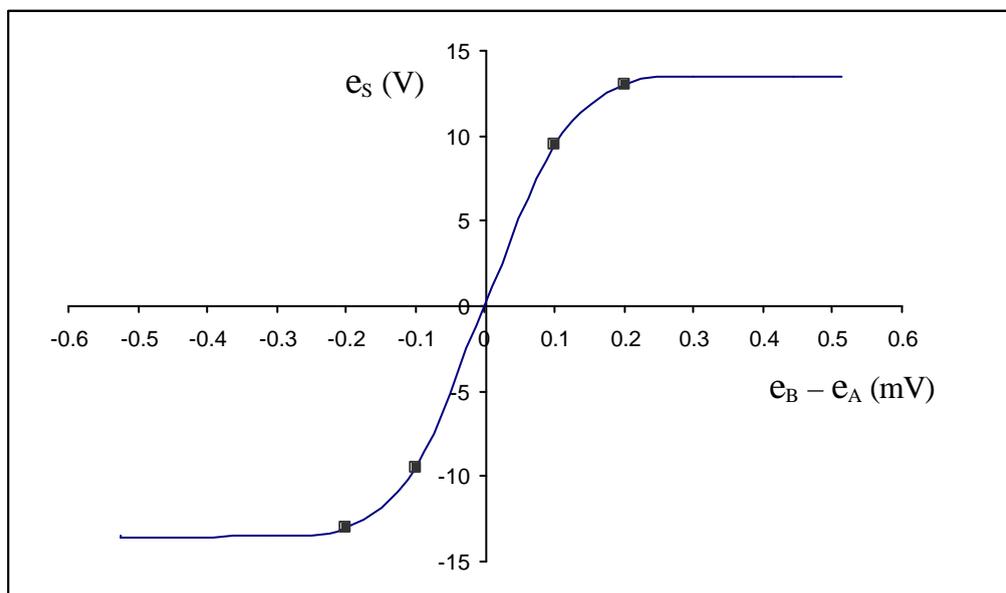


Fig. 3 Curva de transferência típica de um amplificador operacional.

Na região linear, fig. 3, o ganho de malha aberta, será  $A_{V0} = \Delta V_{saída} / \Delta V_{entrada} = 100.000$  já que a saída de + 10 V necessita de uma entrada de apenas 0,1 mV. Se considerarmos  $A_{V0}$  no limite da região de saturação, o ganho será menor,  $A_{V0} = 13 \text{ V} / 0,2 \text{ mV} \sim 65.000$ .

O circuito básico em configuração inversora pode ser visto na figura 4.

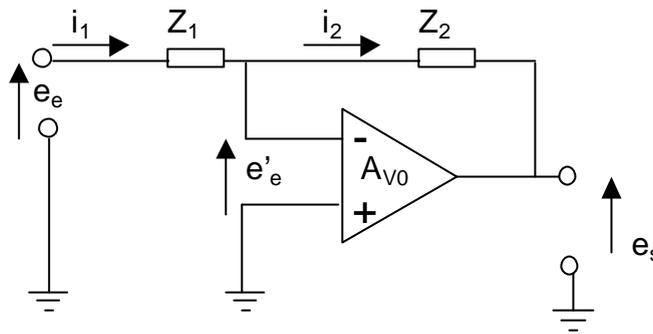


Fig. 4 Circuito amplificador básico em configuração inversora.

Admitindo que o amplificador operacional tenha propriedades ideais, sua impedância de entrada é infinita e não há corrente fluindo em suas entradas. Assim,  $i_1 = i_2$ .

A tensão de saída desta configuração é, por definição,

$$e_s = -A_{V0} e'_e \quad (3)$$

e temos que

$$i_1 = \frac{e_e - e'_e}{Z_1} = \frac{e'_e - e_s}{Z_2} = i_2 \quad (4)$$

Isolando-se  $e'_e$  de (4) e substituindo-se em (3) fica:

$$\frac{e_s}{e_e} = -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{V0}} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)} \quad (5)$$

Lembrando que o ganho  $A_{V0}$  é arbitrariamente grande,

$$\frac{e_s}{e_e} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad e_s = -\frac{Z_2}{Z_1} e_e \quad (6)$$

Podemos notar que com o amplificador operacional ideal a função de transferência depende apenas das impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$ , não dependendo do ganho  $A_{V0}$ . Além disso,

pelo fato do amplificador ter o ganho arbitrariamente alto, no ponto de soma de tensões,  $e_e$  aproxima-se de zero, o que faz desse ponto um terra virtual.

## 7.5 ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO BÁSICA NÃO-INVERSORA

A figura 5 mostra a configuração básica não inversora. O sinal a ser processado é aplicado na entrada não-inversora e o sinal de saída é realimentado na entrada inversora.

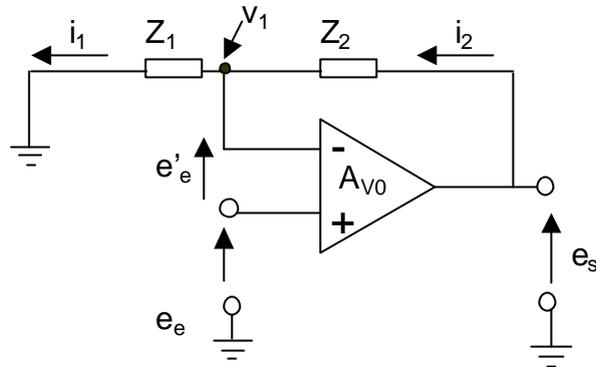


Fig. 5 Configuração básica não-inversora.

Admitindo que  $i_1$  seja igual a  $i_2$  e  $A_{V0}$  arbitrariamente grande,

$$v_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} e_s \quad (7)$$

$$v_1 = e_e + e'_e \quad (8)$$

como  $e_s = -A_{V0} e'_e$

$$v_1 = e_e - \frac{e_s}{A_{V0}} \cong e_e \quad (9)$$

Combinando (7) e (9),

$$\frac{e_s}{e_e} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \quad (10)$$

## 7.6 ALGUMAS FUNÇÕES REALIZADAS COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Com o amplificador operacional pode-se implementar diversas funções tais como a multiplicação ou divisão de um sinal (forma de onda) por uma constante, soma de dois ou mais sinais, integração de um sinal, diferenciação de um sinal e etc.

### 7.6.1 Multiplicador ou divisor de um sinal por uma constante.

Dada a expressão (11)

$$e_s = -\frac{Z_2}{Z_1} e_e \quad (11)$$

Se as impedância  $Z_1$  e  $Z_2$  foram puramente resistivas, vemos que o amplificador pode executar operações de multiplicação e divisão do sinal de entrada por uma constante.

### 7.6.2 Somador

O circuito da figura 6 é o de um somador, com inversão de sinal de saída.

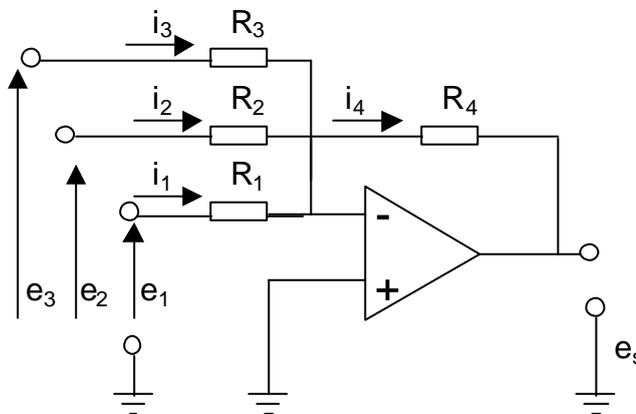


Fig. 6 – Circuito Somador

$$e_s = -R_4 \left( \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3} \right) \quad (12)$$

Lembrando que a corrente  $I_4$  e a soma de  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , observa-se que o circuito é um amplificador somador, em que cada entrada pode ser operada com fatores de escala diferentes.

### 7.6.3 Integrador

Tomemos novamente a equação (6) e façamos  $Z_1$  puramente resistivo e  $Z_2$  capacitivo. Usando a transformada de Laplace, analisemos o circuito da figura 7.

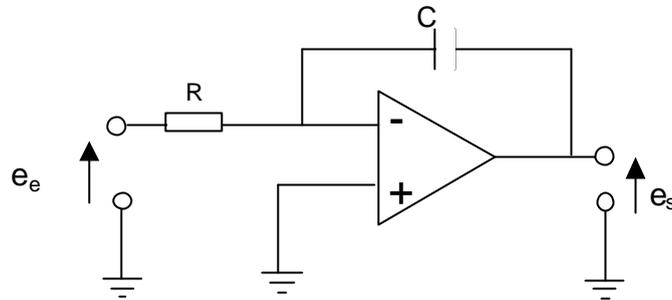


Fig. 7 Circuito Integrador

$$\frac{e_s}{e_e} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (13)$$

Então, com  $Z_1 = R$  e  $Z_2 = 1/s.C$

$$e_s = -\frac{1}{RC} \cdot \frac{e_e}{s} \quad (14)$$

e, anti-transformando,

$$e_s(t) = -\frac{1}{RC} \int e_e(t) dt \quad (15)$$

Observa-se que a saída é proporcional à integral da tensão de entrada  $e_e$ .

### 7.6.4 Diferenciador

De uma maneira análoga, o circuito da figura 8 pode ser compreendido.

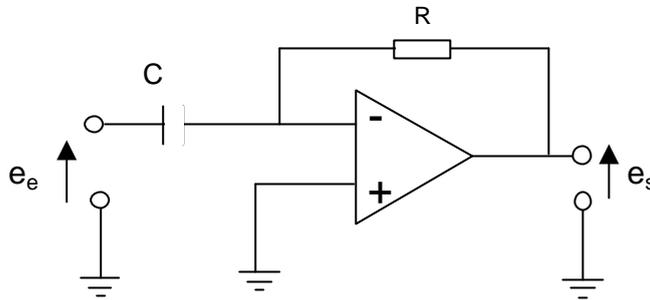


fig. 8 Circuito Diferenciador

Novamente tomando a equação (11), agora com  $Z_1$  capacitivo e  $Z_2$  puramente resistivo

$$Z_1 = \frac{1}{sC} \quad Z_2 = R \quad (16)$$
$$e_s = -RC \cdot s \cdot e_e$$

e, anti-transformando

$$e_s(t) = -RC \frac{de_e(t)}{dt} \quad (17)$$

Observa-se que na saída temos um sinal  $e_s(t)$  igual à derivada da tensão de entrada  $e_e(t)$ .

### 7.6.5 Outras aplicações

Com o uso de operacionais podem ainda ser realizadas fontes de corrente, fontes de tensão, conversores A/D e D/A, conversores de tensão em corrente, conversores de corrente em tensão, geradores de varredura, comparadores, etc.

Os comparadores pertencem a uma classe de circuitos muito usados para a conversão de ainda analógica para sinais de dois níveis. Essa conversão é feita pela comparação do sinal de entrada com um sinal de referência. Sempre que o sinal passa de um valor menor do que o da referência para um valor maior, ou vice-versa a tensão de saída do comparador muda abruptamente de estado. O caráter desta mudança de estado fica a escolha do projetista do circuito, que pode fazer com que a saída do circuito seja compatível com a lógica TTL, ECL ou outras, dentro de uma faixa de aproximadamente  $\pm 15$  Volts.

Como exemplo, vamos ilustrar um detetor de cruzamento de zero, configuração inversora.

## 7.7 DETETOR DE CRUZAMENTO DE ZERO, CONFIGURAÇÃO INVERSORA

Este é um circuito que determina se a tensão de entrada é maior ou menor que zero. Essa determinação é feita pela observação da saída, que pode assumir apenas dois estados possíveis. A saída assume um estado positivo se  $v_e < 0$  e um estado negativo se  $v_e > 0$ . Os valores da saída podem ser definidos com o uso de diodo zener de valores convenientes.

a)

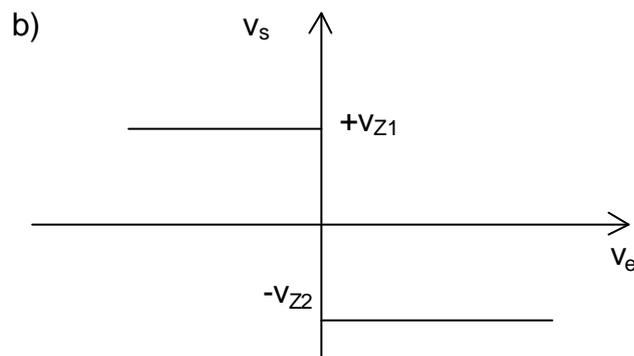
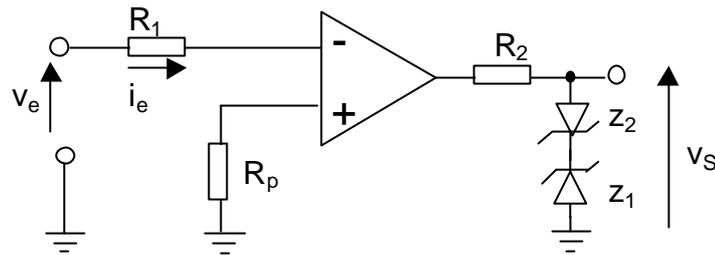


Figura 9 – a) circuito detetor de cruzamento de zero; b) função de transferência do circuito

Com uma pequena variação, o circuito acima poderá ser usado para indicar se uma determinada tensão de entrada está abaixo ou acima de uma dada tensão de referência. Basta tomarmos o resistor  $R_p$ , da entrada não-inversora e conectá-lo a uma tensão de referência. Assim, a tensão de saída mudará de estado toda vez que a tensão de entrada passar pela tensão de referência.

## 7.8 COMPUTAÇÃO ANALÓGICA

Os amplificadores operacionais são dispositivos fundamentais em computadores analógicos. Vamos ilustrar essa capacidade dos operacionais com um exemplo, a solução da equação diferencial

$$\frac{d^2v}{dt^2} + k_1 \frac{dv}{dt} + k_2 v - v_1 = 0 \quad (18)$$

em que  $v_1$  é uma dada função do tempo e  $K_1$  e  $K_2$  são constantes reais e positivas.

Admitimos que  $d^2v/dt^2$  seja disponível na forma de uma tensão. Então, com um integrador construído com um operacional, podemos obter uma tensão proporcional a  $dv/dt$ . Um segundo integrador nos fornecerá uma tensão proporcional à  $v$ . Se adicionarmos um somador, podemos obter  $-K_1 dv/dt - K_2 v + v_1$ , pois os somadores podem operar com fatores de escala diferentes para as diferentes entradas. Observando a equação (18), vemos que

$$-K_1 \frac{dv}{dt} - K_2 v + v_1 = \frac{d^2v}{dt^2} \quad (19)$$

O diagrama de blocos mostrado na figura 10 nos indica que se realimentarmos o sinal do ponto 4 na entrada, teremos a solução da equação.

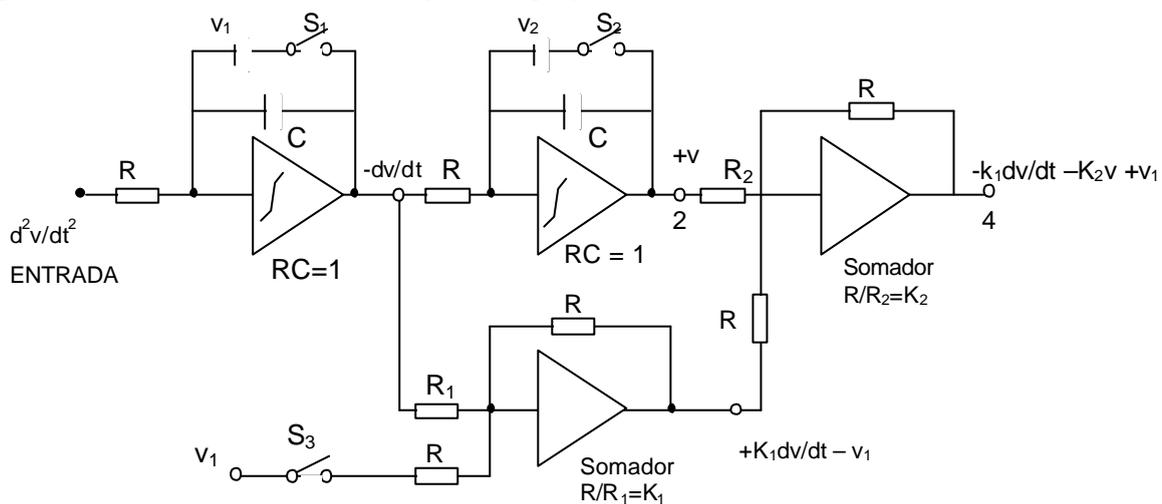


Fig. 10 Diagrama de blocos de uma unidade para computação analógica.

A solução é obtida pela observação da tensão no terminal 2 em um registrador gráfico ou osciloscópio. No instante inicial, as chaves  $S_1$  e  $S_2$  são abertas simultaneamente com o fechamento da chave  $S_3$ . As tensões  $V_1$  e  $V_2$  nos capacitores dos integradores correspondem às condições iniciais.

## 7.9 REFERÊNCIAS

- "HANDBOOK OF OPERATIONAL AMPLIFIER CIRCUIT DESIGN" David F. Stout, McGraw-Hill, New York, 1976.
- "FUNCTION CIRCUITS, DESIGN AND APPLICATIONS" Y.J.Wong, W.E.Ott, McGraw-Hill, New York, 1976.
- "INTEGRATED ELECTRONICS: ANALOG AND DIGITAL CIRCUITS AND SYSTEMS" Jacob Millman & Christos C. Halkias, McGraw-Hill, New York, 1972