Outras configurações com amplificadores Operacionais

O ganho ajustável

Em muitas situações práticas, o projetista pode necessitar, não de um ganho fixo, mas de um ganho variável de um valor mínimo a um valor máximo pré-determinado.

O ganho ajustável – Entre valores

Caso o projetista deseje um conjunto de valores compreendido dentro de um limite inferior e superior, a seguir um circuito típico.

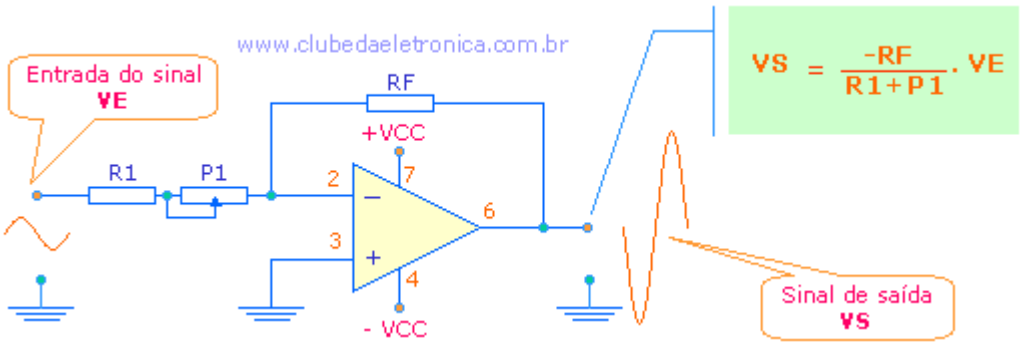

Figura 2.01 – Inversor ajustável (entre valores)

Exercício:

1 - Se RF = 11kΩ, R1= 1kΩ e P1 =10kΩ, quais os ganhos mínimo e máximo, expresso em decibéis?

Solução:

AV mínimo = –RF ÷ (R1+P1)
AV mínimo = –11kΩ ÷ (1kΩ+10kΩ)
AV mínimo = –1

Em dB,

AV (dB) mínimo = 20.log|AV|
AV (dB) mínimo = 20.log|1|
AV (dB) mínimo = zero

AV máximo = –RF ÷ (R1+P1)
AV máximo = –11kΩ ÷ (1kΩ+0)
AV máximo = –11

Em dB,

AV (dB) máximo = 20.log|AV|
AV (dB) máximo = 20.log|11|
AV (dB) máximo = 28,82dB

O ganho ajustável – desde zero

Para obter um ganho de tensão ajustável, desde zero, basta substituir RF por um potenciômetro, veja exemplo.

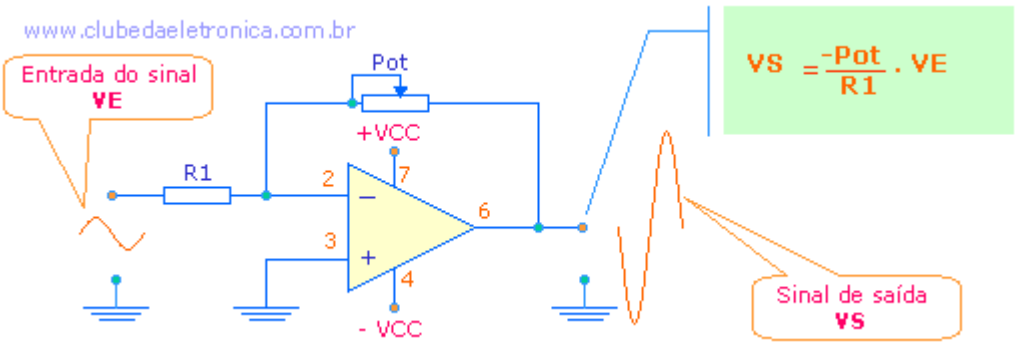

Figura 2.02 – Inversor ajustável (desde zero)

Exercício:

2 - Se R1= 1kΩ e P1 =10kΩ, quais os ganhos mínimo e máximo?

Solução:

AV mínimo = –Pot ÷ R1
AV mínimo = zero ÷ 1kΩ
AV mínimo = zero

AV máximo = –Pot ÷ R1
AV máximo = –10kΩ ÷ 1kΩ
AV máximo = –10

O ganho ajustável do circuito não inversor

Possui uma desvantagem, em relação ao inversor ajustável, pois não permite o ajuste desde zero. Assim, o menor valor de ganho será de 1 até 1+ (Pot÷R1)

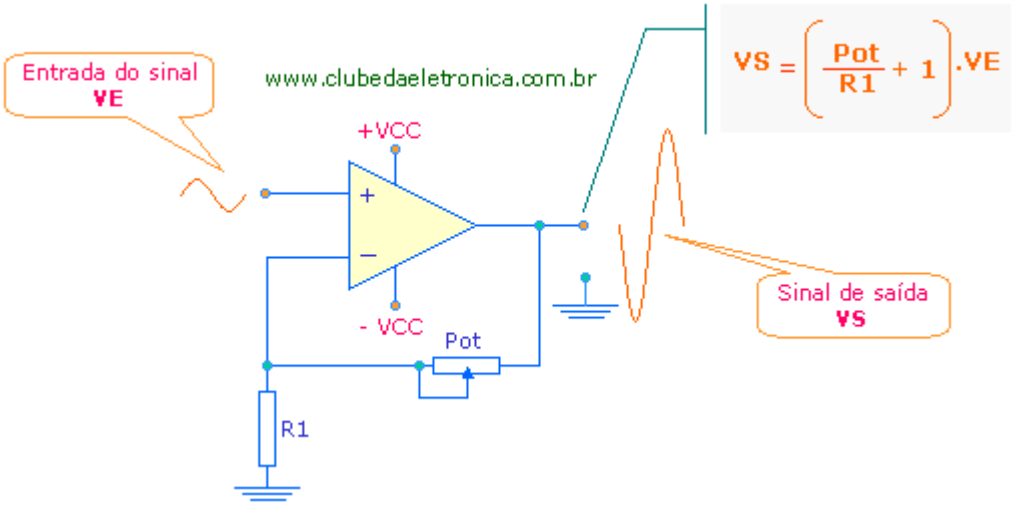

Figura 2.03 – Não inversor ajustável

Exercício:

3 - Se R1= 1kΩ e P1 =10kΩ, quais os ganhos mínimo e máximo?

Solução:

AV mínimo = (Pot ÷ R1) + 1
AV mínimo = (zero ÷ 1kΩ) +1
AV mínimo = 1

AV máximo = (Pot ÷ R1) + 1
AV máximo = (10kΩ ÷ 1kΩ) + 1
AV máximo = 11

Ganho ajustável de +N a –N

O circuito ao lado, permite ao projetista um ajuste de ganho de +N a –N. Quando o ajuste estiver em zero, a entrada não inversora estará aterrada e o circuito será um amplificador inversor. Com um ganho N.

Quando o resistor estiver o ajuste estiver no máximo, a tensão será aplicada sobre R será zero e a tensão estará na entrada não inversora.

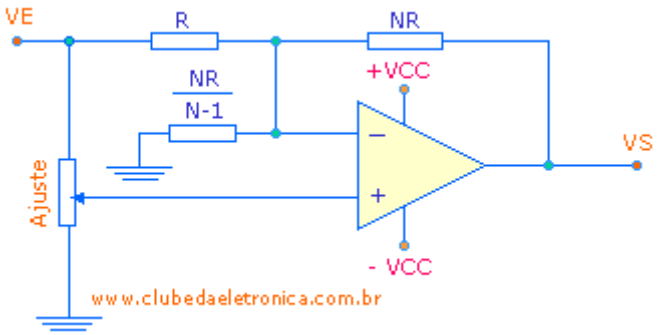

Figura 2.04 – amplificador de ganho ajustável +N a -N

Exercício:

4 – Projete um amplificador de ganho 10, com saída compreendida entre +100mV e –100mV. Use R = 1kΩ e Ajuste = 10kΩ.

Solução:

N = ganho = 5
N.R = 5.1kΩ = 5kΩ

Como:
NR ÷ (N–1) =
5kΩ ÷ (5–1) = 1250Ω

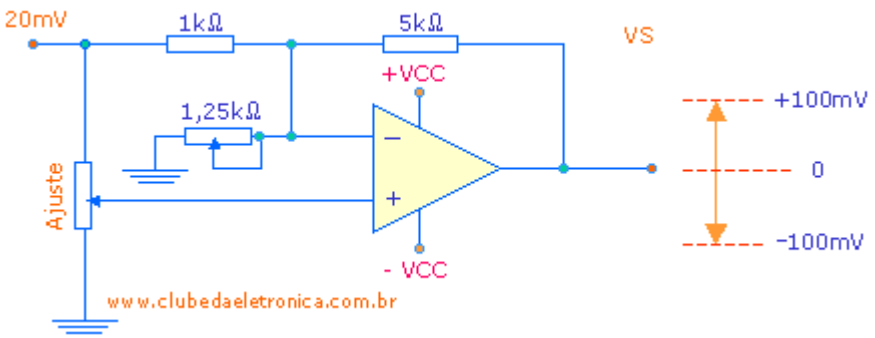

Figura 2.05 – Amplificador de ganho ajustável +100mV a –100mV

A largura de banda ajustável

Em algumas aplicações há necessidade não de alterar o ganho, mas sim a largura de banda, ou seja, deve-se alterar a resposta em freqüência sem alterar a tensão de saída. O circuito apresentado abaixo é capaz de variar a freqüência de corte e manter a saída de tensão constante.

Para facilitar a compreensão, serão analisados varias posições de P.

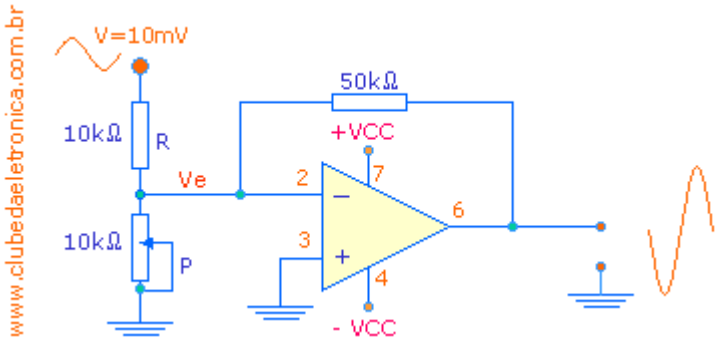

Figura 2.06 – Circuito com largura de banda ajustável

Potenciômetro P = 10kΩ

Aplicando o divisor de tensão, tem-se:
Ve = [P ÷ (P+R)].V
Ve = [10kΩ ÷ (10kΩ+10kΩ)].10mV
Ve = 5mV

Encontrando o novo R1
R1 = R//P
R1 = 10kΩ.10kΩ ÷ 10kΩ+10kΩ
R1 = 5kΩ

Encontrando o ganho (AV)
AV = –RF÷R1
AV = –50kΩ ÷ 5kΩ
AV = –10

Encontrando a freqüência de corte $f_{(corte)}$
$f_{(corte)} = f_{UNIT} \div |Av|$
$f_{(corte)}$ = 1MHz ÷ 10
$f_{(corte)}$ = 100kHz

Encontrando a tensão de saída (VS)
VS = –(RF ÷ R1).Ve
VS = –(50kΩ ÷ 5kΩ).5mV
VS = –50mV

Potenciômetro P = 5kΩ

Aplicando o divisor de tensão, tem-se:
Ve = [P ÷ (P+R)].V
Ve = [5kΩ ÷ (5kΩ+10kΩ)].10mV
Ve = 3,33mV

Encontrando o novo R1
R1 = R//P
R1 = 10kΩ.5kΩ ÷ 10kΩ+5kΩ
R1 = 3,33kΩ

Encontrando o ganho (AV)
AV = –RF÷R1
AV = –50kΩ ÷ 3,33kΩ
AV = –15

Encontrando a freqüência de corte $f_{(corte)}$
$f_{(corte)} = f_{UNIT} \div |Av|$
$f_{(corte)}$ = 1MHz ÷ 15
$f_{(corte)}$ = 66,67kHz

Encontrando a tensão de saída (VS)
VS = –(RF ÷ R1).Ve
VS = –(50kΩ ÷ 3,33kΩ).3,33mV
VS = –50mV

Potenciômetro P = 1kΩ

Aplicando o divisor de tensão, tem-se:
Ve = [P ÷ (P+R)].V
Ve = [1kΩ ÷ (1kΩ+10kΩ)].10mV
Ve = 0,91mV

Encontrando o novo R1
R1 = R//P
R1 = 10kΩ.1kΩ ÷ 10kΩ+1kΩ
R1 = 0,91kΩ

Encontrando o ganho (AV)
AV = –RF÷R1
AV = –50kΩ ÷ 0,91kΩ
AV = –54,1

Encontrando a freqüência de corte $f_{(corte)}$
$f_{(corte)} = f_{UNIT} \div |Av|$
$f_{(corte)}$ = 1MHz ÷ 54,1
$f_{(corte)}$ = 18,48kHz

Encontrando a tensão de saída (VS)
VS = –(RF ÷ R1).Ve
VS = –(50kΩ ÷ 0,91kΩ).0,91mV
VS = –50mV

Potenciômetro P = 0,1kΩ

Aplicando o divisor de tensão, tem-se:
Ve = [P ÷ (P+R)].V
Ve = [0,1kΩ ÷ (0,1kΩ+10kΩ)].10mV
Ve = 99μV

Encontrando o novo R1
R1 = R//P
R1 = 10kΩ.0,1kΩ ÷ 10kΩ+0,1kΩ
R1 = 99Ω

Encontrando o ganho (AV)
AV = –RF÷R1
AV = –50000Ω ÷ 99Ω
AV = –505,1

Encontrando a freqüência de corte $f_{(corte)}$
$f_{(corte)} = f_{UNIT} \div |Av|$
$f_{(corte)}$ = 1MHz ÷ 505,1
$f_{(corte)}$ = 1,98kHz

Encontrando a tensão de saída (VS)
VS = –(RF ÷ R1).Ve
VS = –(50000Ω ÷ 99Ω).99μV
VS = –50mV

Nota: Se o potenciômetro (P) for zero a largura de banda será zero. Assim, a largura de banda varia de zero a 100kHz e a tensão de saída será para toda esta faixa -50mV.

O amplificador de instrumentação

Amplificar sinais de transdutores requer alguns cuidados, pois estão normalmente carregados de ruídos, devido a interferências do ambiente. A sorte é que estas interferências são em modo comum.

O amplificador de instrumentação tem principal função eliminar sinais em modo comum e amplificar somente entradas diferenciais. Assim, interferências em modo comum serão eliminadas e somente o sinal do transdutor será amplificado.

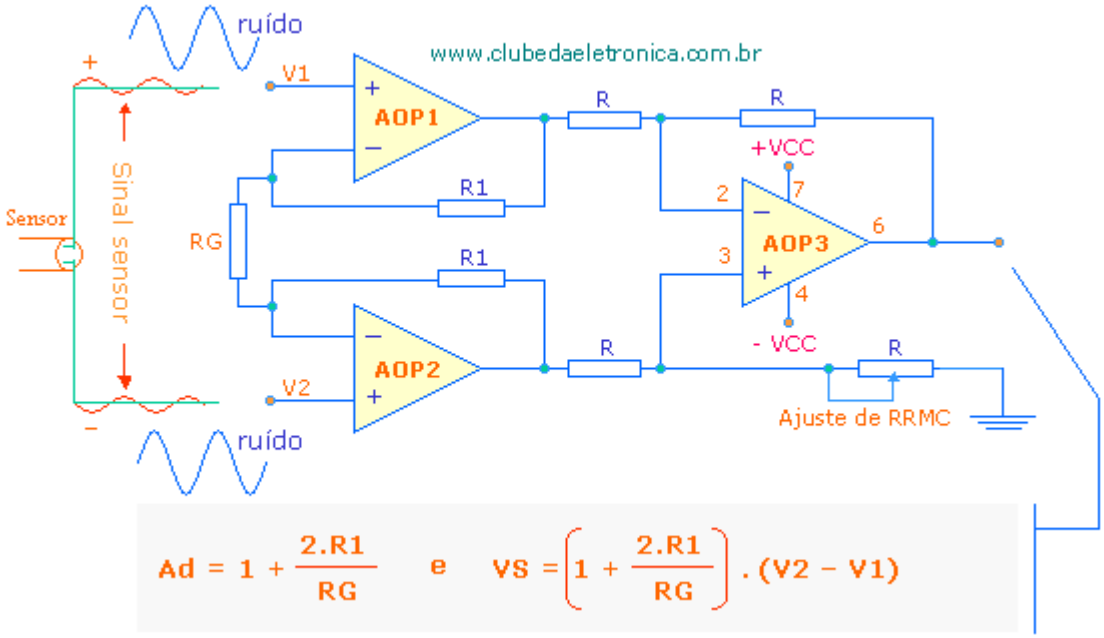

Figura 2.07 – O amplificador de instrumentação típico

No circuito acima, o sinal do sensor no AOP2 é defasado 180º em relação ao sinal do sensor no AOP1, já com o ruído isto não acontece. O controle de ganho diferencial é feito por RG e o ganho em modo comum é zerado pelo ajuste de RRMC.

Exercício

05 – Projete um amplificador de ganho 20 dB, para o sinal de ±100mV proveniente de um termopar. Use R = 10kΩ e P1 = 10kΩ.

Solução:
Encontrando R1

Ad = 1 + (2.R1 ÷ P1)
10 = 1 + (2.R1 ÷ 10kΩ)
10 – 1 = 2.R1 ÷ 10kΩ
9 . 10kΩ = 2.R1
90kΩ = 2.R1
R1 = 45kΩ

Nota: O resistor R1 deve ser de precisão.

A tensão de saída será:

VS = Ad . (V1–V2)
VS = 10 . (100mV+100mV)
VS = 2V

Nota: Se P1 for um potenciômetro o ganho poderá se ajustado de 1 até infinito (∞). Em alguns amplificadores de instrumentação típicos como o LH0036 este ajuste é de 1 a 1000

O Circuito integrador

O integrador realiza a operação matemática chamada integração, que é a soma da área sob uma curva ou sinal em um período de tempo. Sua aplicação mais comum é a geração de uma rampa linear, dependente de um pulso de tensão aplicada em sua entrada.

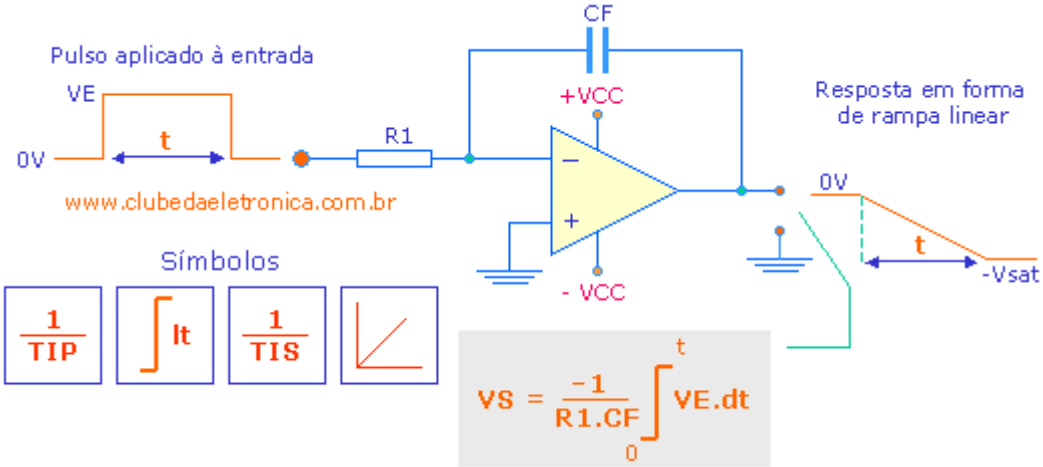

Figura 2.08 – Circuito integrador ideal

No circuito integrador o resistor de realimentação (RF) é substituído por um capacitor de realimentação (CF), que tem a propriedade de acumular ao longo do tempo qualquer sinal continuo, por menor que seja, fornecendo à saída uma rampa linear.

A equação acima pode ser rescrita de uma forma mais simplificada, ideal para aplicações mais práticas.

A tensão de saída é instantânea, ou seja, haverá um novo valor de tensão para cada segundo novo segundo integrado à entrada.

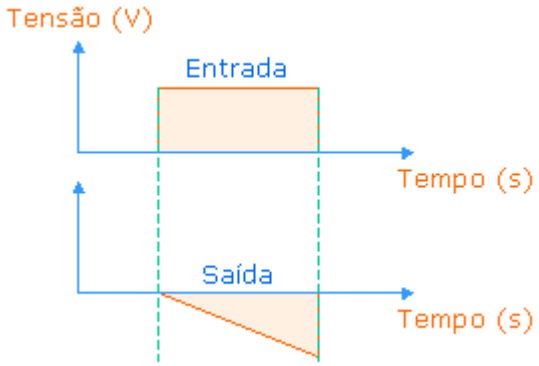

Figura 2.09 – Sinal entrada saída do integrador

Exercício

06 – Considerando o Amp-Op ideal e o capacitor inicialmente descarregado, que tensão de saída será produzida pelo circuito abaixo, se um pulso de 3V for aplicado à entrada durante os tempos 1, 2, 3, 4 e 5 segundos ? Use R1 = 1MΩ e C1 = 1μF.

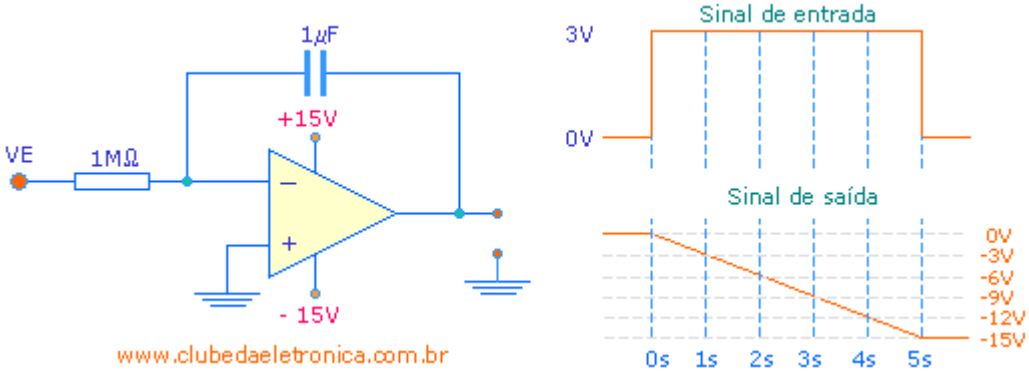

Figura 2.10 – Circuito integrador

Solução 1

A integral de uma constante é a própria constante multiplicada pelo intervalo de tempo.

t ⇒ VS = -1÷(R1C1).VE.t
1s ⇒ VS = -1÷(1MΩ.1μF).3V.1s = - 3V
2s ⇒ VS = -1÷(1MΩ.1μF).3V.2s = - 6V
3s ⇒ VS = -1÷(1MΩ.1μF).3V.3s = - 9V
4s ⇒ VS = -1÷(1MΩ.1μF).3V.4s = - 12V
3s ⇒ VS = -1÷(1MΩ.1μF).3V.5s = - 15V

Solução 2

I1 = VE÷R1
I1 = 3V÷1MΩ = 3μA

VS = I1.Ti ÷ CF
VS = 3μA.1s÷1μF = -3V
VS = 3μA.2s÷1μF = -6V
VS = 3μA.3s÷1μF = -9V
VS = 3μA.4s÷1μF = -12V
VS = 3μA.5s÷1μF = -15V

Nota: A rampa é negativa porque o circuito é um inversor.

Relação freqüência ganho

O ganho do integrador é dado pela seguinte equação:

$$AV = \frac{1}{2.\pi.f.R1.CF}$$

Note que, se a freqüência se aproximar de zero o ganho se aproxima do infinito e a saída será saturada. Isto ocorre porque o capacitor é considerado uma chave aberta, para sinais DC, assim, não há realimentação negativa na freqüência zero.

Uma forma de solucionar esse problema é colocando um resistor de realimentação paralelo ao capacitor.

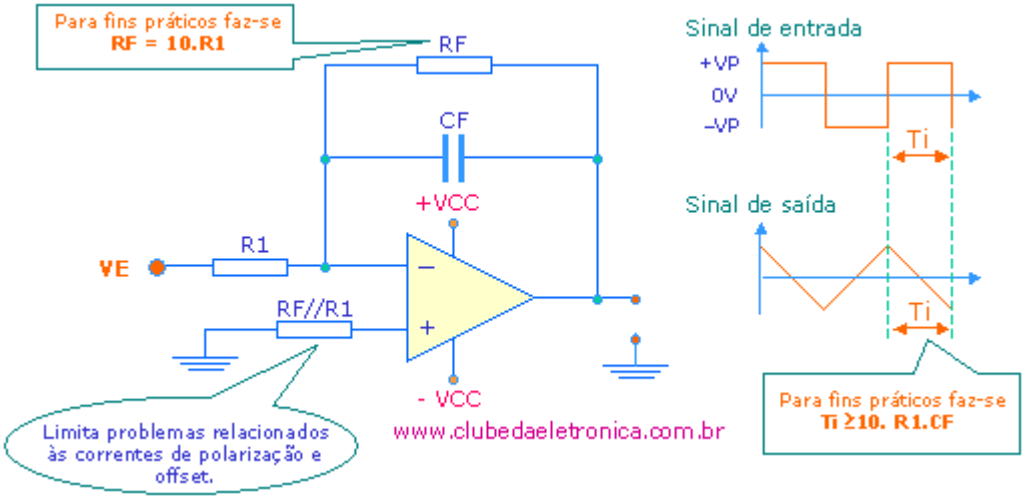

Figura 2.11 – Circuito integrador real

Adicionando o resistor RF, o ganho será limitado e o circuito poderá operar em baixas freqüências. O novo ganho pode ser calculado por:

$$AV = \frac{RF \div R1}{\sqrt{1 + (2.\pi.f.RF.CF)^2}}$$

Nota-se, agora, um duplo comportamento, ou seja, ora atua como circuito inversor, ora como circuito integrador, o que define esse comportamento é a freqüência de corte. Esta freqüência é dada por:

$$fc = \frac{1}{2.\pi.RF.CF}$$

Se a freqüência aplicada for inferior a freqüência de corte (fc) o circuito atua como um circuito inversor simples, se superior atua como integrador. Para garantir uma boa integração f ≥10fc

Exercício

07 – O circuito integrador representado abaixo, em um certo momento detecta em sua entrada, um sinal de 1V. Este sinal é acumulado pelo integrador, gerando uma rampa linear.

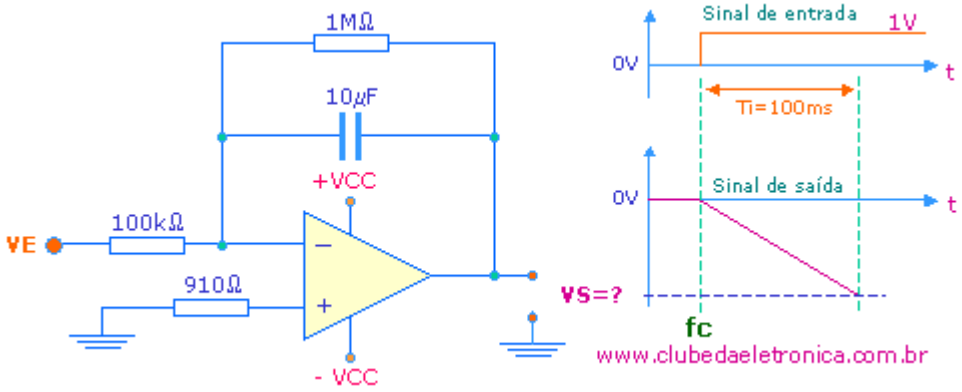

Figura 2.12 – Circuito integrador real

Pergunta-se:
a - Qual a tensão de saída 100ms, após a detecção do sinal ?

solução:
I1 = VE÷R1
I1 = 1V÷1kΩ = 1mA

VS = I1.Ti ÷ CF
VS = 1mA.100ms ÷ 10µF = -10V

b – Qual a freqüência limite ou de corte, para que o circuito funcione como integrador?

solução:
Fc = 1 ÷ (2π.RF.CF)
Fc = 1 ÷ (2π.1MΩ.10µF)
Fc = 15,92mHz

Para obter uma boa integração deve-se fazer f ≥10.fc, ou seja, se o interesse for um sinal triangular perfeito, deve-se aplicar um sinal retangular, com freqüência acima de 159,2mHz.

O Circuito integrador com reativação

O capacitor de realimentação necessita ser preparando para um próximo pulso, ou seja, deve ser descarregado. A descarga do capacitor pode ser conseguida colocando um JFET paralelo com o capacitor, assim, quando a reativação for zero o JFET é levado à saturação (funciona como chave fechada) e o capacitor é zerado, quando a reativação é –VCC o JFET opera em corte (funciona como chave aberta), permitindo a carga do capacitor.

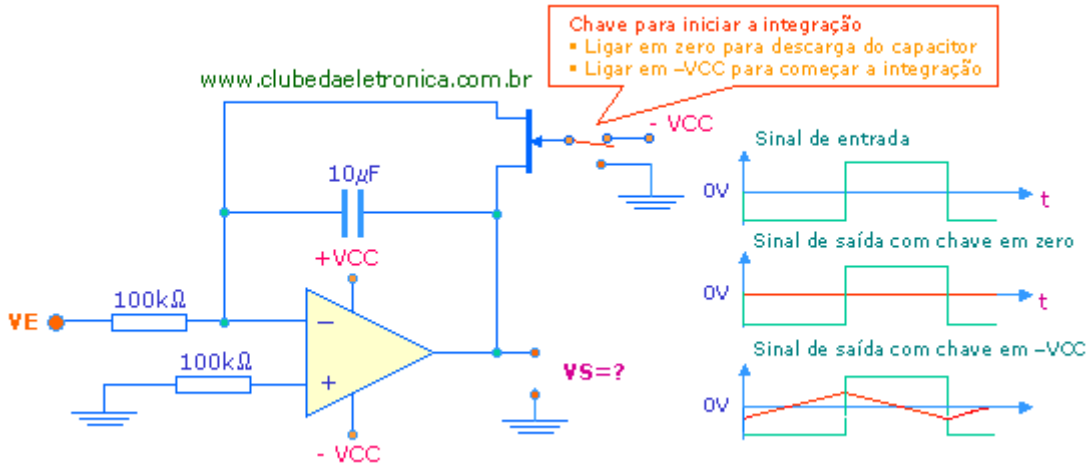

Figura 2.13 – Circuito integrador com reativação

O circuito diferenciador

O diferenciador realiza a operação inversa do integrador, ou seja, ele deriva o sinal aplicado em sua entrada, produzindo uma tensão de saída proporcional à variação da tensão de entrada. A saber, a derivada de uma constante é zero, portanto, se o sinal aplicado for constante a saída será zero.

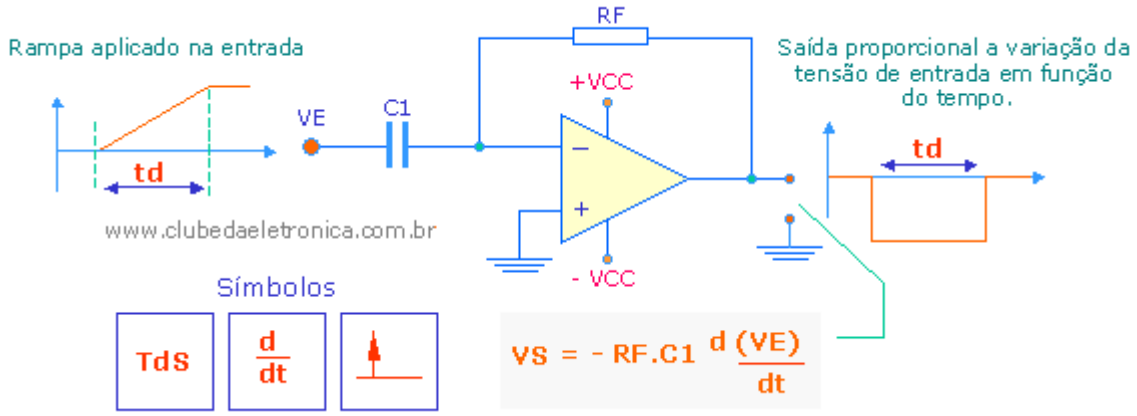

Figura 2.14 – Circuito diferenciador ideal

A equação acima pode ser rescrita de uma forma mais simplificada, ideal para aplicações mais práticas.

$$VSP = RF.C1.\left(\frac{VE_{(p\text{-}p)}}{T \div 2}\right)$$

Onde:
- VSP = tensão de saída de pico (V)
- VEP = tensão de entrada de pico a pico (V)
- T = período (s)

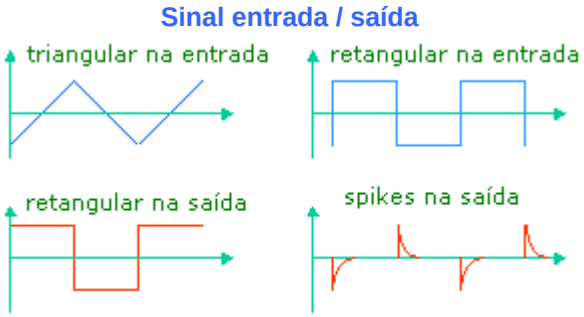

Figura 2.15 – Relação sinal entrada / saída

Relação freqüência ganho

O ganho do integrado pode se calculado pela seguinte equação:

$$AV = 2.\pi.f.RF.C1$$

Agora ocorre o contrário do integrador, se a freqüência se aproximar de zero o ganho também se aproxima de zero, se a freqüência aumentar o ganho também aumenta levando o sinal de saída à saturação.

Uma forma de solucionar esse problema é colocando um resistor em série com o capacitor de entrada.

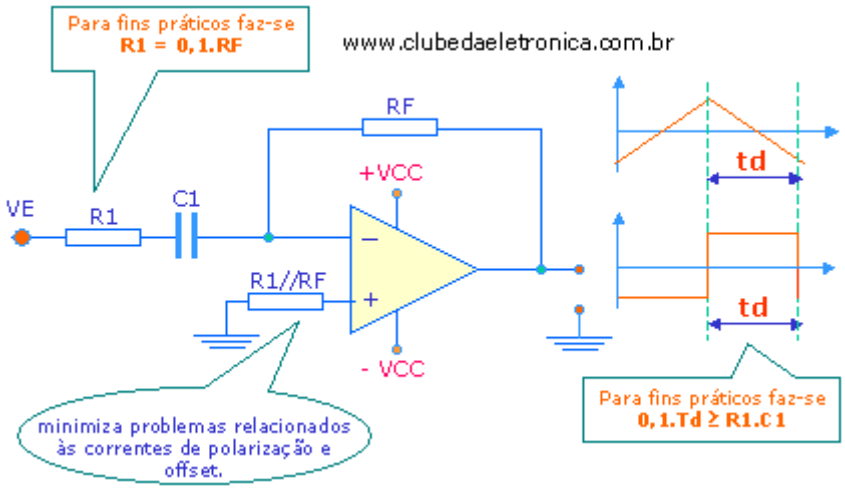

Figura 2.16 – Circuito diferenciador real

Adicionando o resistor R1, o ganho será limitado e o circuito poderá operar em altas freqüências. O novo ganho pode ser calculado por:

$$AV = \frac{RF \div R1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2.\pi.f.R1.C1}\right)^2}}$$

Novamente, um duplo comportamento, dependente da freqüência. Para o circuito operar como um diferenciador a freqüência de corte deve ser no mínimo 10 vezes maior que a freqüência do sinal aplicado, se isso não ocorrer o circuito será um inversor simples. A freqüência de corte do diferenciador é dada por:

$$fc = \frac{1}{2.\pi.R1.C1}$$

Para garantir uma boa diferenciação, fazer fc≥10.f.

Exercício

08 – O diferenciador abaixo, recebe um sinal triangular de freqüência 800Hz e tensão de pico de converte para um sinal triangular.

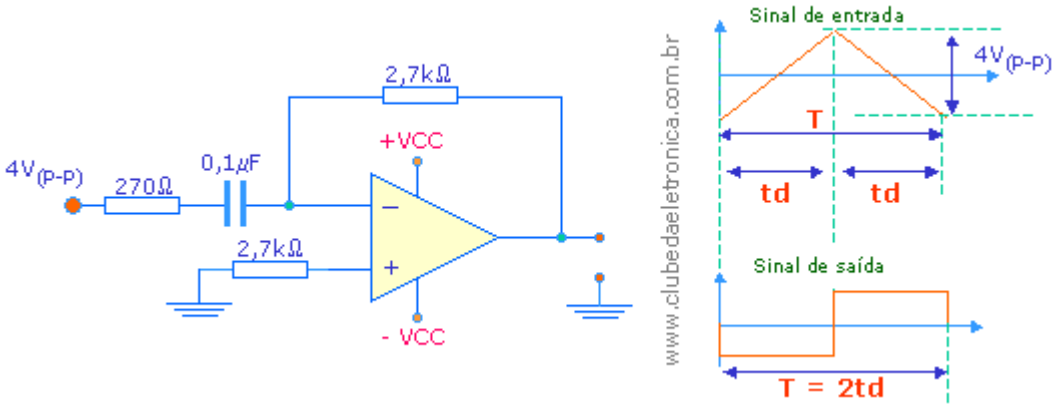

Figura 2.17 – Circuito diferenciador real

Pergunta-se:

a - Qual a amplitude do pulso apresentado na saída do diferenciador?

Solução:
T = 1 ÷ f
T = 1 ÷ 800Hz
T = 0,00125s

$$VSP = RF.C1.\left(\frac{VE_{(P-P)}}{T \div 2}\right)$$

$$VSP = 2{,}7k\Omega.0{,}1\mu F.\left(\frac{4V}{0{,}000625s}\right)$$

$$VSP = 1{,}728V\ (pico)$$

b - Qual a máxima freqüência, para garantir uma boa diferenciação?

Solução
Fc = 1 ÷ (2π.R1.C1)
Fc = 1 ÷ (2π.270Ω.0,1μF)
Fc = 5897,61 Hz

Para garantir uma boa diferenciação, fazer fc≥10.f. Assim, 589,76Hz.

c – Reduzindo a freqüência de entrada para 500Hz, qual a tensão de saída?

Solução:
T = 1 ÷ f
T = 1 ÷ 500Hz
T = 0,002s

$$VSP = RF.C1.\left(\frac{VE_{(P-P)}}{T \div 2}\right)$$

$$VSP = 2{,}7k\Omega.0{,}1\mu F.\left(\frac{4V}{0{,}001s}\right)$$

$$VSP = 1{,}08V\ (pico)$$

Os circuitos integradores e diferenciadores são usados em sistemas de controle PID. De maneira simplificada, pode-se dizer que o integrador tem função de diminuir o erro estacionário e o diferenciador de estabilizar o sistema.

Um gênio é uma pessoa de talento que faz toda a lição de casa.
Thomas A. Edison

Referências bibliográficas

- Pertence, A. Amplificadores Operacionais – 5ª edição. São Paulo: Makron Books, 1996.
- Gluiter, A .F. Amplificadores Operacionais fundamentos e aplicações. São Paulo: McGraw Hill , 1988.
- Malvino, A.P. Eletrônica - volume II. São Paulo: Makron Books, 1997.
- Boylestad, R. e Nashelsky, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1994.
- O' Marlley, John. Analise de circuitos - 2ª edição. São Paulo: Makron Books, 1994.
- Lalond, D.E. e Ross, J.A. Princípios de dispositivos e circuitos eletrônicos. São Paulo: Makron Books, 1999.
- Notas de aula: Professor: Álvaro Murakami, 1991.
- Site: www.eletronica24h.com.br
- Handbook of operational amplifier applications – Texas Instruments