

## **Sumário**

<b>Introdução</b>	<b>5</b>
<b>Circuito integrador e diferenciador</b>	<b>6</b>
<b>Pulsos</b>	<b>6</b>
Ciclo	7
Frequência	7
Período	8
Largura de pulso	8
Ciclo de trabalho	8
Tempo de subida e descida	9
Componente <i>cc</i>	11
<b>Circuito integrador</b>	<b>14</b>
<b>Circuito diferenciador</b>	<b>17</b>
<b>Integrador e diferenciador com amplificador operacional</b>	<b>22</b>
Integrador com amplificador operacional	23
Diferenciador com amplificador operacional	29
<b>Apêndice</b>	<b>33</b>
<b>Questionário</b>	<b>33</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>34</b>



**Espaço SENAI**

### **Missão do Sistema *SENAI***

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

# Introdução

Circuitos  $RC$  são muito utilizados em sistemas  $ca$  com a finalidade de proporcionar defasagens entre sinais elétricos bem como para facilitar o acoplamento entre estágios amplificadores.

Existe no entanto uma aplicação importante dos circuitos  $RC$  em equipamentos de instrumentação e controle industrial. Nesses equipamentos o resistor e o capacitor compõem circuitos integradores e diferenciadores que recebem pulsos na entrada e fornecem sinais de disparo para o controle de motores, válvulas, solenóides, relés etc.

Este fascículo tem por objetivo apresentar e discutir os princípios de funcionamento dos circuitos integradores e diferenciadores que são elementos fundamentais utilizados na análise dos circuitos de controle industrial.



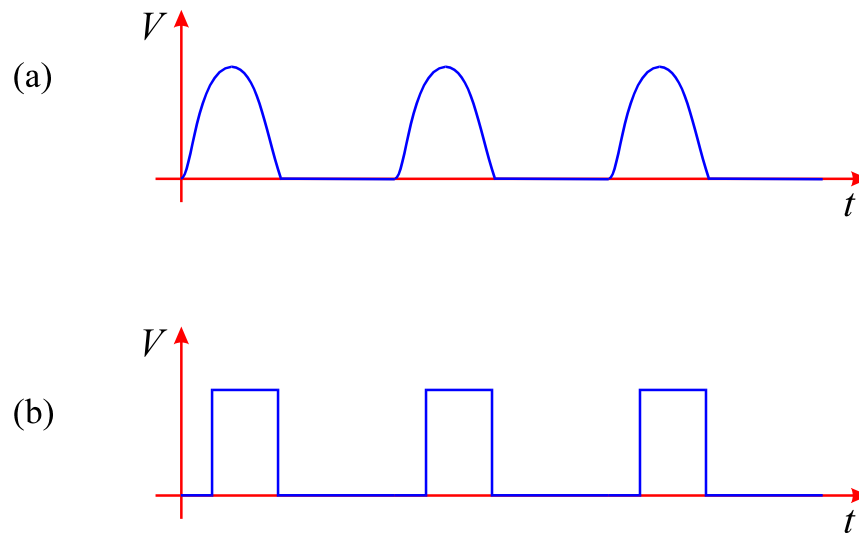
***Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:***

- Dinâmica de carga e descarga em capacitores.
- Amplificador operacional.

# Circuito integrador e diferenciador

## PULSOS

O termo **pulso** pode ser usado para designar uma forma de onda tendo uma componente que se repete como função do tempo, conforme mostrado na **Fig1a**. Entretanto, é comum aplicar esse termo em referência a formas de ondas retangulares, do tipo mostrado na **Fig.1b**.



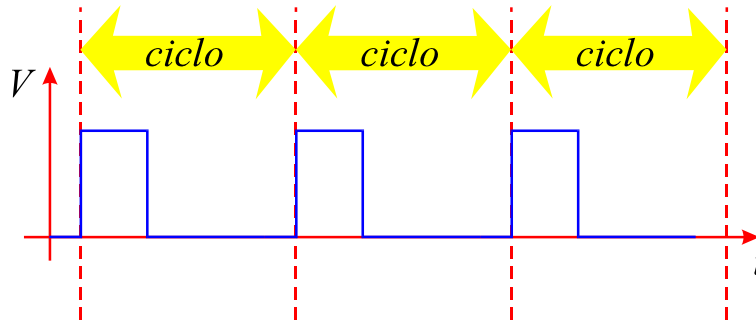
**Fig.1** Formas de onda: **(a)** arbitrária, **(b)** retangular.

Pulsos podem ser caracterizados pelos seguintes parâmetros:

- Ciclo
- Frequência.
- Período.
- Largura do pulso.
- Ciclo de trabalho.
- Tempos de subida e descida.
- Componente *cc*.

## CICLO

Um sinal periódico consiste na reprodução no tempo de uma porção básica do sinal. O intervalo de tempo que contém essa porção básica delimita um ciclo do sinal periódico, conforme ilustrado no gráfico da **Fig.2**.

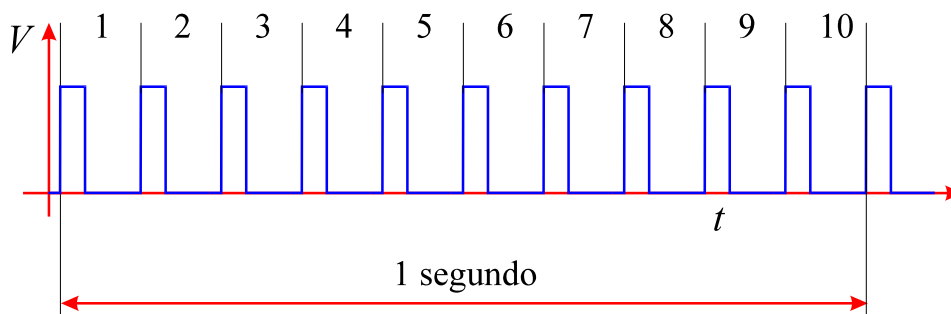


**Fig.2** Ciclos associados a uma seqüência de pulsos.

## FREQÜÊNCIA

A freqüência  $f$  de uma seqüência de pulsos é definida como sendo o número de ciclos por segundo. No exemplo da **Fig.3**, existem 10 ciclos em um intervalo de tempo de 1 segundo ou equivalentemente 1 ciclo ocorrendo em um intervalo de tempo de 0,1 seg. A freqüência associada à seqüência de pulsos vale

$$f = \frac{10}{1 \text{ seg}} = \frac{1}{0,1 \text{ seg}} = 10 \text{ Hz}$$



**Fig.3** Seqüência de pulsos de freqüência 10 Hz.

## PERÍODO

Um período de uma seqüência de pulsos é o intervalo de tempo que contém um ciclo da forma de onda. O período  $T$  está relacionado com a freqüência pela relação

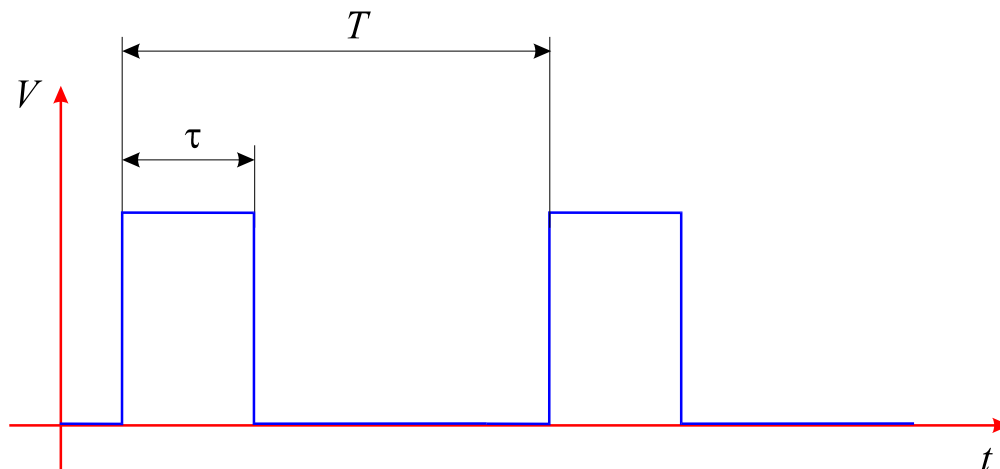
$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Para a seqüência de pulsos da **Fig.3**,  $f = 10$  Hz e da **Eq.(1)**,

$$T = 1/10 = 0,1 \text{ seg} = 100 \text{ msec}$$

## LARGURA DE PULSO

A largura de pulso  $\tau$  corresponde ao intervalo de tempo ocupado por cada pulso, conforme mostrado na **Fig.4**.



**Fig.4** Seqüência de pulsos retangulares e definição da largura de pulso.

## CICLO DE TRABALHO

Ciclo de trabalho  $v$ , originado do termo inglês *duty cycle*, é definido como a razão entre a largura de pulso e o período associado à seqüência de pulsos. De acordo com essa definição tem-se que

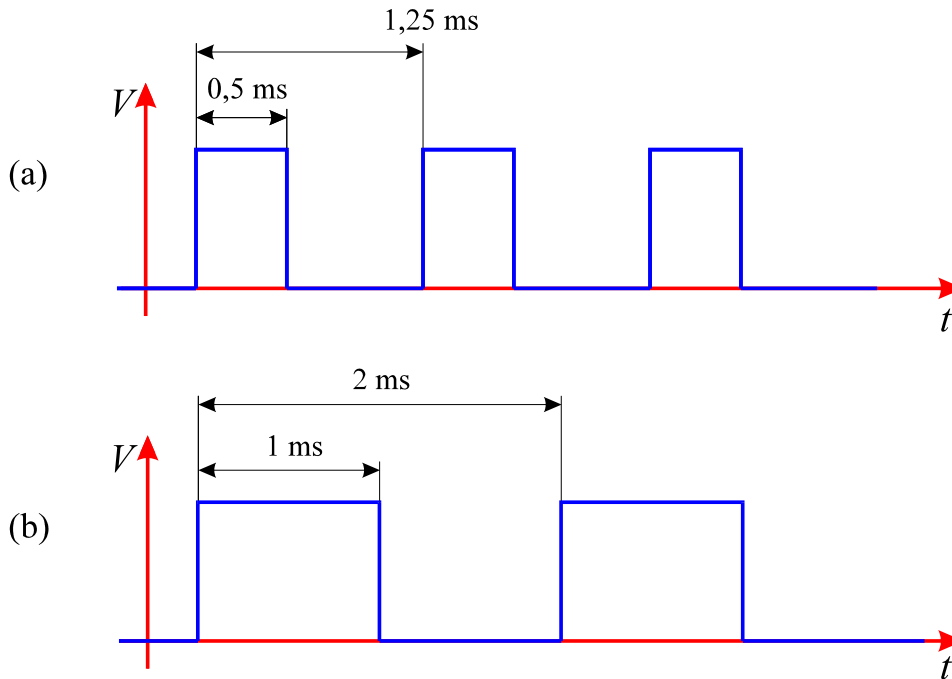
$$v = \frac{\tau}{T} \quad (2)$$

Por exemplo, para a seqüência de pulsos mostrada na **Fig.5a**,  $\tau = 0,5$  mseg e  $T = 1,25$  mseg. O ciclo de trabalho vale portanto

$$v = \frac{0,5}{1,25} = \frac{1}{5} = 0,2$$

Para o caso da **Fig.5b** o ciclo de trabalho vale

$$v = \frac{1 \text{ mseg}}{2 \text{ mseg}} = \frac{1}{2} = 0,5$$

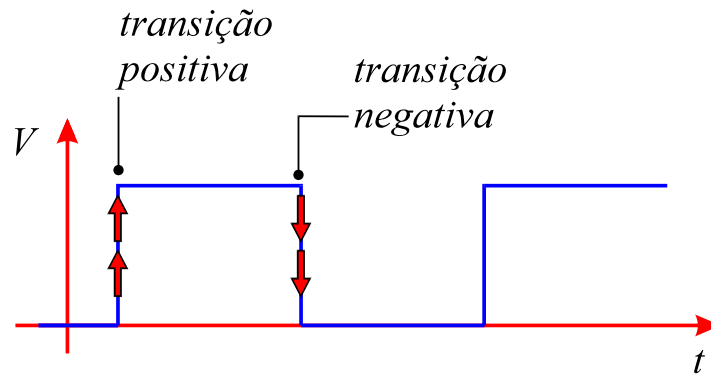


**Fig.5** Seqüência de pulsos: (a) assimétrica, (b) simétrica.

A forma de onda mostrada na **Fig.5b** é constituída de **pulsos simétricos**, isto é, pulsos cuja largura corresponde exatamente a meio período, tendo portanto um ciclo de trabalho  $v=1/2$ . Quando a seqüência de pulsos exibe  $v \neq 1/2$ , como no caso da **Fig.5a**, diz-se que a seqüência é formada por **pulsos assimétricos**.

## TEMPO DE SUBIDA E DESCIDA

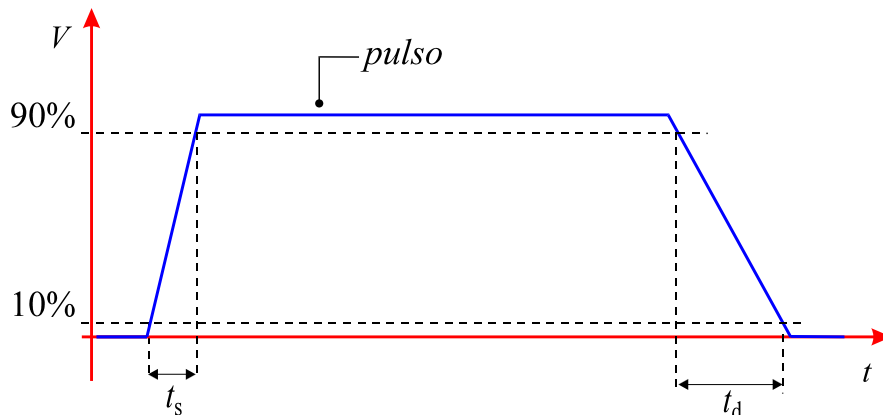
Cada pulso de uma seqüência exibe duas transições que ocorrem nas bordas do pulso, conforme ilustrado na **Fig.6**. A **subida** está associada a uma transição positiva e a **descida**, a uma transição negativa, conforme indicado na **Fig.6**.



**Fig.6** Transições associadas aos pulsos de uma seqüência.

Um exame mais detalhado do formato do pulso indica que suas transições não ocorrem de forma vertical e abrupta. Como se pode observar na **Fig.7**, existem tempos de transição associados à subida e à descida do pulso.

Define-se o **tempo de subida** ( $t_s$ ) como aquele necessário à ocorrência de uma transição positiva entre os limites correspondentes a 10% e 90% do valor máximo da transição, conforme mostrado na **Fig.7**.



**Fig.7** Tempos de subida e de descida associados às transições de um pulso.

Na **Fig.7**, o **tempo de descida** ( $t_d$ ) é aquele necessário à ocorrência de uma transição negativa entre os limites correspondentes a 90% e 10% do valor máximo da transição.

Um pulso retangular ideal seria aquele exibindo transições verticais, ou seja, transições com  $t_s = t_d = 0$ . Entretanto esse tipo de transição nunca ocorre, pois nenhum evento físico pode variar abruptamente. Pode-se no entanto minimizar os valores de  $t_s$  e  $t_d$ , de forma a garantir o bom funcionamento de dispositivos eletrônicos que operem com formas de onda pulsadas.



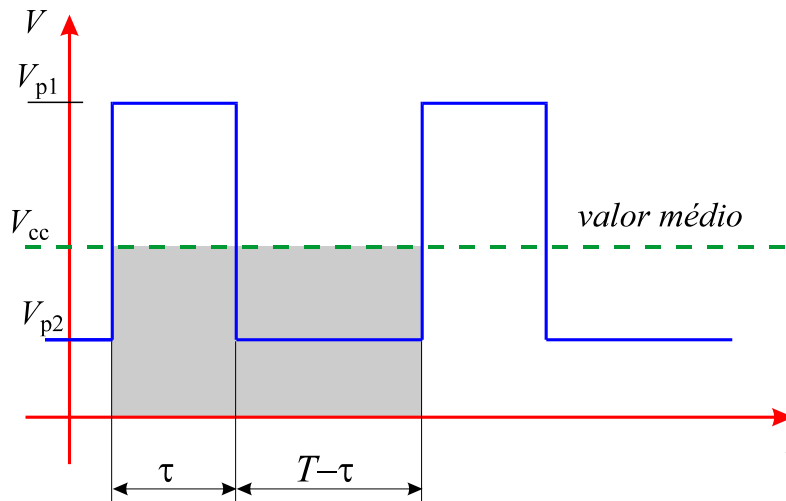
## COMPONENTE *cc*

A componente *cc* de uma seqüência periódica de pulsos retangulares representa o valor médio do sinal calculado em um período  $T$ . Para a seqüência de pulsos retangulares mostrada na **Fig.8** o valor médio do sinal pode ser calculado diretamente, notando que durante uma fração  $\tau/T$  do período o sinal se mantém no nível  $V_{p1}$  e durante uma fração  $(T-\tau)/T$  do período o sinal se mantém no nível  $V_{p2}$ . O valor médio ou componente *cc* do sinal é portanto

$$V_{cc} = \frac{\tau}{T}V_{p1} + \frac{T-\tau}{T}V_{p2}$$

ou equivalentemente

$$V_{cc} = \frac{1}{T}(\tau V_{p1} + (T-\tau)V_{p2}) \quad (3)$$



**Fig.8** Valor médio associado a uma seqüência de pulsos.

O valor médio definido pela **Eq.(3)** tem uma interpretação simples. Para isso basta colocar a **Eq.(3)** na forma

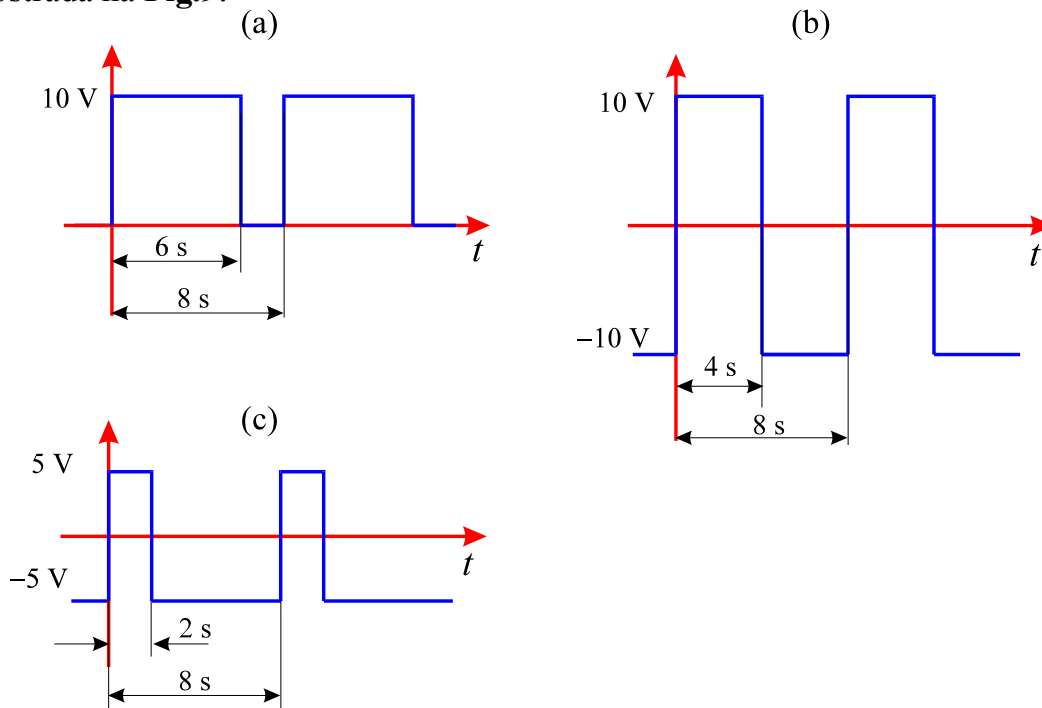
$$TV_{cc} = \tau V_{p1} + (T-\tau)V_{p2}$$

Essa última expressão em conjunto com a **Fig.8** permite extrair as seguintes observações:

- O primeiro membro da expressão representa a área do retângulo sombreado na **Fig.8**.
- O segundo membro é a soma das áreas dos retângulos de dimensões  $V_{p1} \times \tau$  e  $V_{p2} \times (T-\tau)$ .

Ou seja, o valor médio ou componente  $cc$  do sinal representa a altura de um retângulo de área igual àquela ocupada pelos dois pulsos que estão contidos no período  $T$ . Note-se que se existirem pulsos negativos, sinais negativos devem ser atribuídos às áreas a eles associadas e portanto a componente  $cc$  poderá ser negativa ou mesmo nula, conforme ilustra o exemplo a seguir.

**Exemplo 1:** Determinar a componente  $cc$  para cada seqüência de pulsos mostrada na **Fig.9**.



**Fig.9** Seqüências de pulsos para o **Exemplo 1**.

Para o caso da **Fig.9a**, a **Eq.(3)** fornece

$$V_{cc} = \frac{1}{8} (6 \times 10 + (8 - 6) \times 0) = \frac{1}{8} \times 60 = \frac{60}{8}$$

$$\Rightarrow V_{cc} = 7,5 \text{ V}$$

Para a seqüência de pulsos mostrada na **Fig.9b** tem-se que

$$V_{cc} = \frac{1}{8} [4 \times 10 + (8 - 4) \times (-10)] = \frac{1}{8} (40 - 40)$$

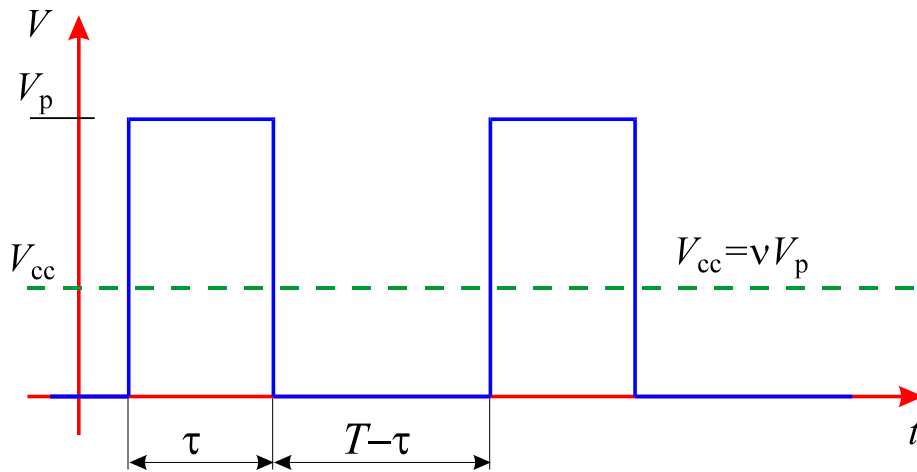
$$\Rightarrow V_{cc} = 0 \text{ V}$$

Finalmente, para a seqüência de pulsos mostrada na **Fig.9c** obtém-se

$$V_{cc} = \frac{1}{8} [5 \times 2 + (8 - 2) \times (-5)] = \frac{1}{8} (10 - 30) = -\frac{20}{8}$$

$$\Rightarrow V_{cc} = -2,5 \text{ V}$$

Um caso particular da **Eq.(3)** ocorre quando o sinal se anula em uma porção do período, conforme ilustrado na **Fig.10**.



**Fig.10** Seqüência de pulsos intercalados por valores nulos do sinal.

Nessa situação a **Eq.(3)** fornece

$$V_{cc} = \frac{1}{T} (\tau V_p + (T - \tau) \times 0) = \frac{\tau}{T} V_p$$

e utilizando a definição dada pela **Eq.(2)** resulta em

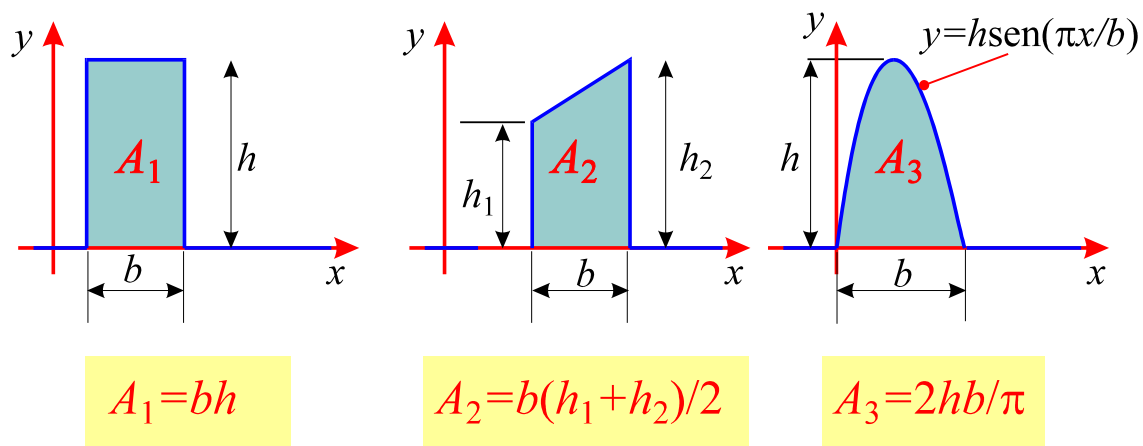
$$V_{cc} = v V_p \quad (4)$$

A **Eq.(4)** indica que nesse caso particular, a componente *cc* se reduz ao produto (ciclo de trabalho)×(altura do pulso).

## CIRCUITO INTEGRADOR

Para que se possa entender o funcionamento do circuito integrador é necessário que se tenha, inicialmente, uma noção matemática da operação de **integração**.

A operação matemática de integração é freqüentemente utilizada como ferramenta de cálculo de área de figuras regulares e irregulares, possibilitando a determinação da área sob uma curva de forma arbitrária. A **Fig.11** ilustra alguns exemplos de áreas calculadas utilizando o processo de integração.

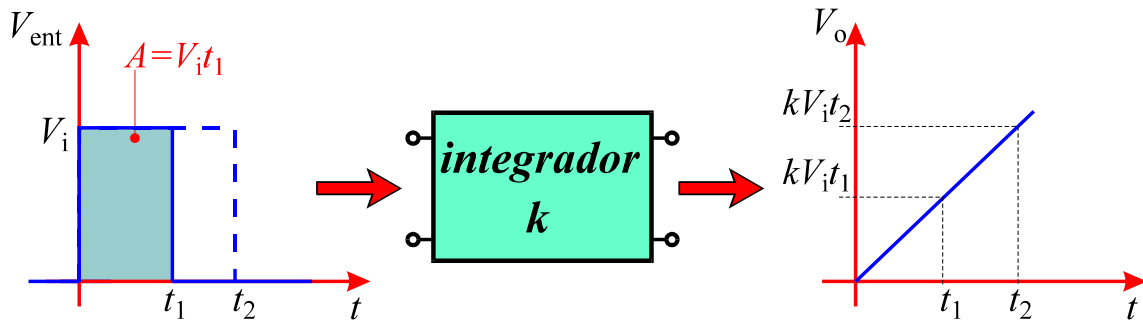


**Fig.11** Exemplos de áreas calculadas através do processo de integração.

Em qualquer um dos exemplos mostrados na **Fig.11**, a área sob a curva é sempre proporcional ao produto de uma dimensão horizontal e outra vertical.

Esses conceitos básicos podem ser aplicados ao circuito eletrônico denominado de integrador. Um **circuito integrador** fornece na saída uma tensão que é proporcional à área sob a curva que define o sinal. A dimensão horizontal associada à área representa o tempo de aplicação do sinal na entrada e a dimensão vertical é associada à amplitude do sinal.

Para ilustrar a operação de um circuito integrador, suponha que o bloco mostrado na **Fig.12** represente um circuito integrador que produza na saída uma tensão proporcional à integral do sinal de entrada. Essa relação de proporcionalidade é definida pela constante  $k$  mostrada da **Fig.12**.



**Fig.12** Bloco integrador submetido a um sinal de entrada constante.

Admitindo-se que o sinal de entrada na **Fig.12** seja aplicado em  $t = 0$ , decorrido um tempo  $t_1$  a área sob a curva que define o sinal vale

$$A(t_1) = V_i t_1$$

e o circuito integrador produziria na saída um sinal

$$V_o(t_1) = kV_i t_1$$

Em um tempo  $t_2 > t_1$  o sinal de saída passa a ser

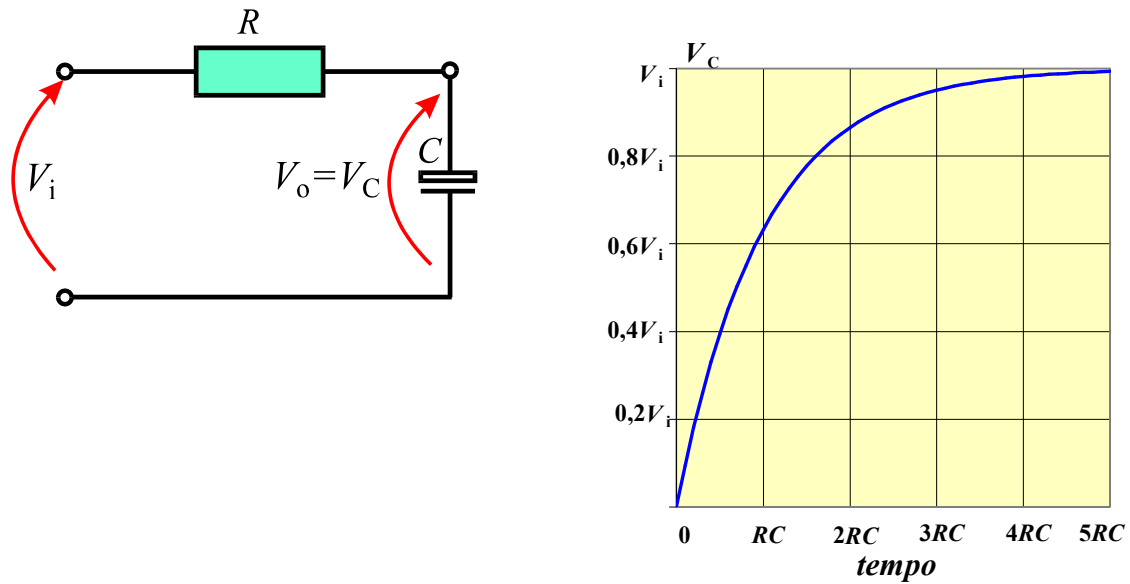
$$V_o(t_2) = kV_i t_2$$

e assim sucessivamente. Para um tempo  $t$  arbitrário, o sinal de saída é dado por

$$V_o(t) = kV_i t$$

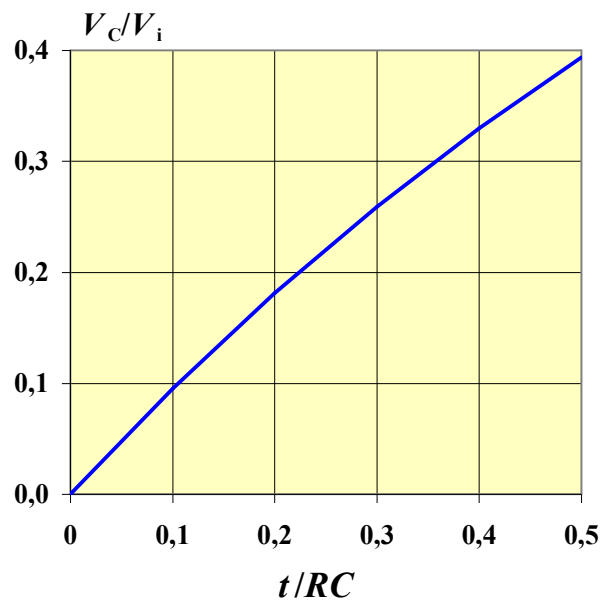
Essa última expressão mostra que a saída do circuito integrador aumenta linearmente com o tempo a partir da aplicação de um sinal de entrada constante em  $t=0$ , conforme mostrado na **Fig.12**.

Verifica-se que um circuito  $RC$ , do tipo mostrado na **Fig.13** executa, sob determinadas condições, uma função semelhante àquela de um circuito integrador. Isso pode ser verificado a partir da curva de carga do capacitor mostrada na **Fig.13**.



**Fig.13** Circuito  $RC$  e curva de carga do capacitor.

Analisando-se com mais detalhe a região do gráfico correspondente a  $t < 0,5RC$ , verifica-se que nessa região a tensão no capacitor aumenta de forma praticamente proporcional ao tempo, conforme mostrado na **Fig.14**.



**Fig.14** Detalhe da curva de carga do capacitor na região  $t < 0,5RC$ .

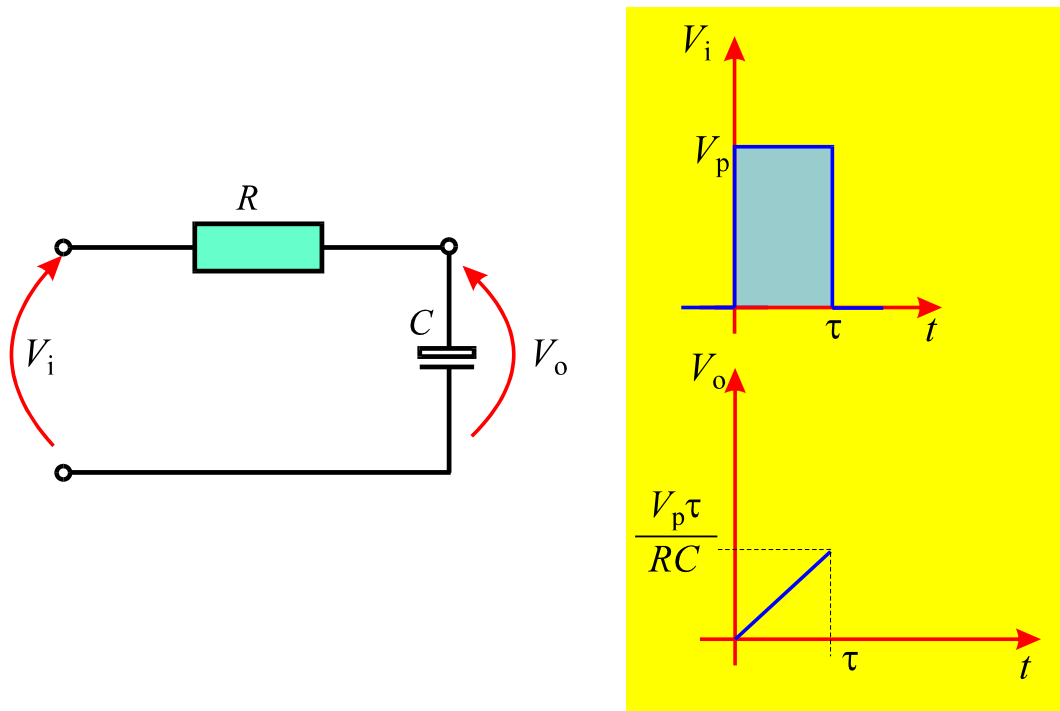
Pode-se mostrar que na região  $t < 0,5RC$ , a dependência temporal do parâmetro  $V_c$  de um circuito  $RC$  submetido a uma tensão  $V_i$ , é aproximadamente

$$V_c = \frac{1}{RC} V_i t \quad (5)$$

Dessa forma, a aplicação de um pulso de tensão de altura  $V_p$  e de largura  $\tau < 0,5RC$ , na entrada de um circuito  $RC$ , conforme ilustrado na **Fig.15**, resulta em uma saída dada por

$$V_o = \frac{1}{RC} V_p t$$

onde  $t$  é o tempo decorrido após a aplicação do pulso.



**Fig.15** Aplicação de um pulso na entrada de um circuito  $RC$  e tensão de saída correspondente.

## CIRCUITO DIFERENCIADOR

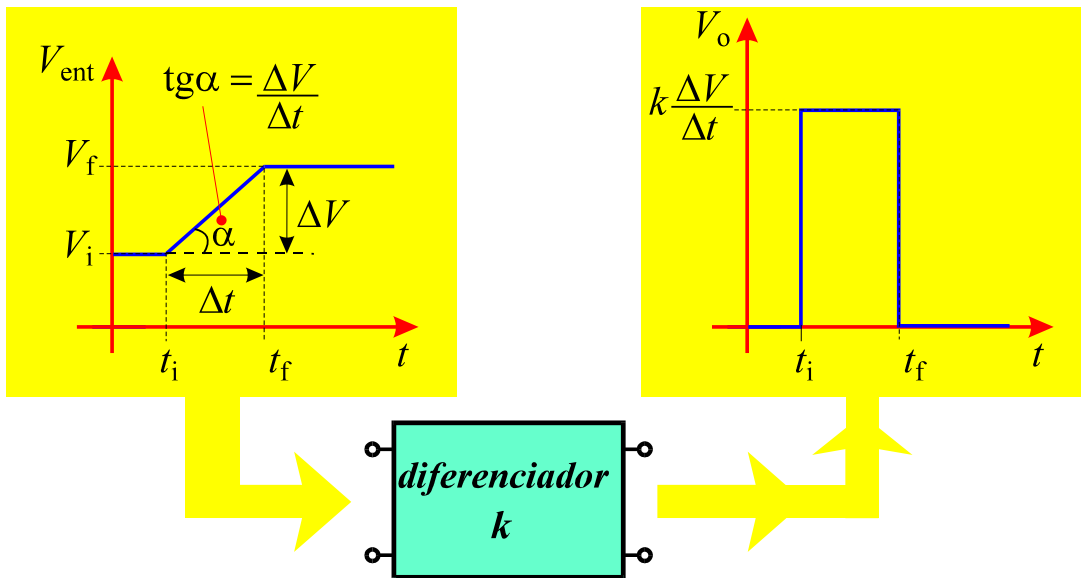
O circuito diferenciador é essencialmente um detetor da taxa de variação de sinal com relação ao tempo. Nesse tipo de circuito, a tensão de saída é proporcional ao grau de variação do sinal e inversamente proporcional ao intervalo de tempo em que ocorre essa variação.

A **Fig.16** ilustra um sinal que varia de  $V_i$  a  $V_f$  do tempo  $t_i$  ao tempo  $t_f$ . A variação do sinal é portanto

$$\Delta V = V_f - V_i$$

e o intervalo de tempo referente a essa variação vale

$$\Delta t = t_f - t_i$$



**Fig.16** Bloco diferenciador submetido a uma variação de sinal.

Esse sinal aplicado à entrada de um circuito diferenciador produziria um valor nulo na saída até a ocorrência da variação de sinal. No instante de tempo  $t_i$ , a saída do diferenciador indicaria a existência da variação de sinal fornecendo uma tensão dada por

$$V_o = k \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (6)$$

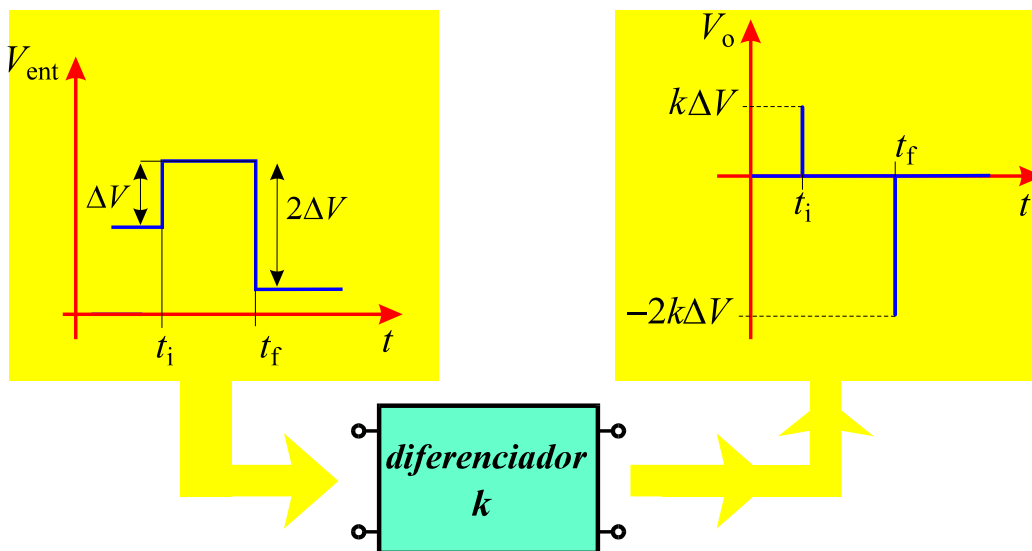
onde  $k$  é um constante.

Para  $t > t_f$  a saída do diferenciador forneceria uma tensão nula, indicando a ausência de variações do sinal, conforme mostrado na **Fig.16**.

A fração no segundo membro da **Eq.(6)** representa a **taxa de variação do sinal no tempo**, ou equivalentemente, a declividade da função representando o sinal, no tempo  $t_i$ , como indicado na **Fig.16**.

A aplicação mais comum do diferenciador é na detecção das bordas de subida ou descida de pulsos retangulares. Conforme mostrado na **Fig.17**, o circuito diferenciador detecta essas variações, produzindo um pico positivo durante a transição positiva e outro negativo durante a transição negativa do pulso.



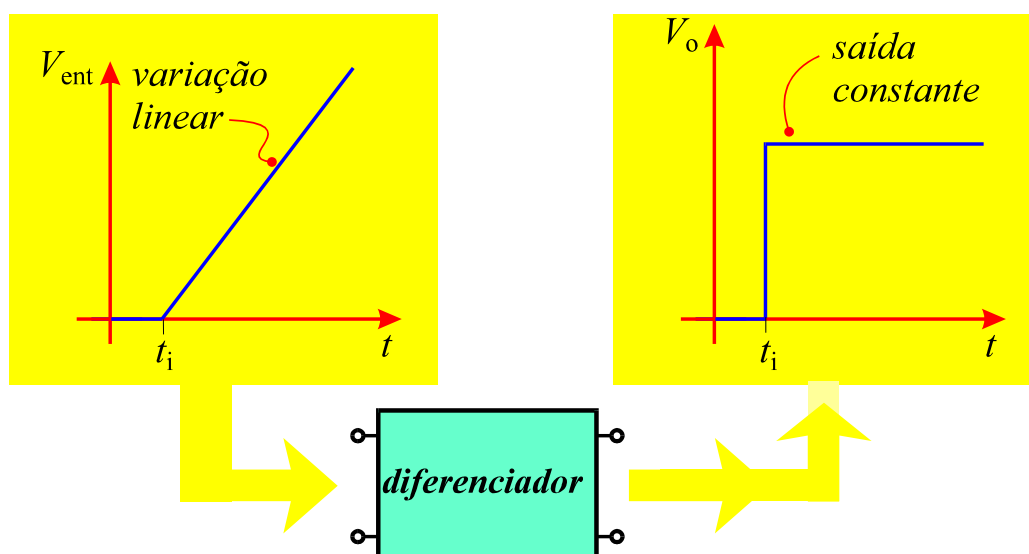


**Fig.17** Circuito diferenciador submetido a um pulso de sinal.

Se a tensão de entrada varia linearmente com o tempo, conforme ilustrado na **Fig.18**, tem-se que a taxa de variação do sinal de entrada no tempo é constante, ou seja,

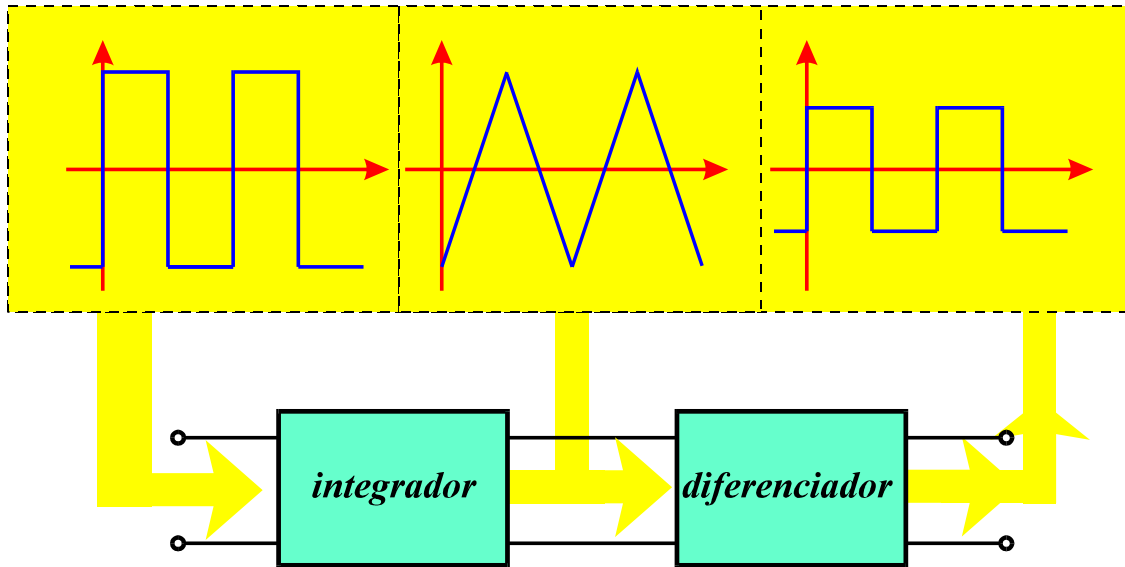
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{constante}$$

e como indica a **Eq.(6)** o circuito diferenciador fornece uma saída constante, como ilustrado na **Fig.18**.



**Fig.18** Circuito diferenciador submetido a uma variação linear de sinal.

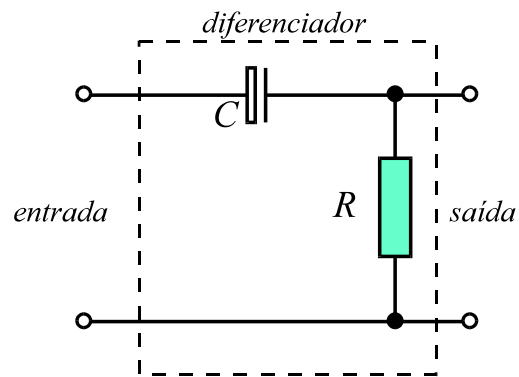
Uma inspeção nas operações realizadas por um integrador e um diferenciador indica que esses circuitos realizam operações inversas, conforme ilustrado na **Fig.19**.



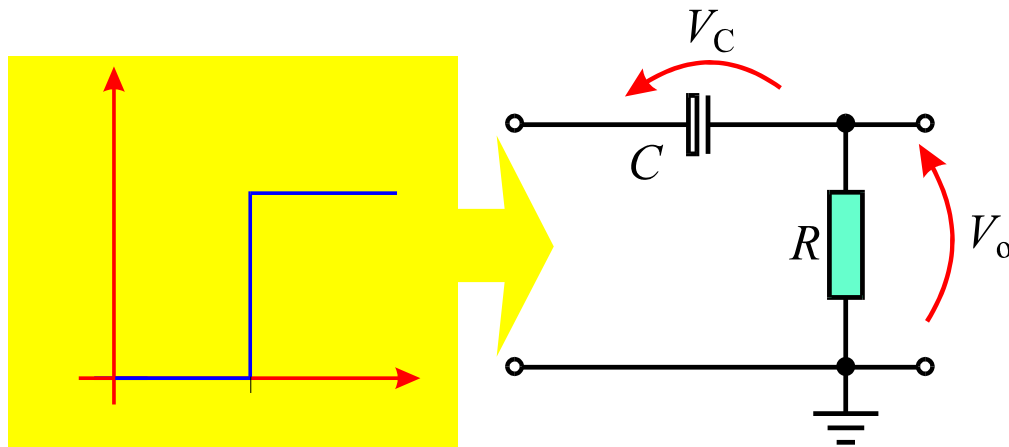
**Fig.19** Comparação entre as operações realizadas por um integrador e um diferenciador.

O circuito  $RC$  série também pode ser utilizado como circuito diferenciador, desde que sejam atendidas algumas condições. Uma das condições requer que os terminais de saída correspondam aos terminais do resistor, conforme mostrado na **Fig.20**.

A análise do funcionamento do circuito é feita com base na **Fig.21** que mostra a aplicação de um sinal de entrada que varia subitamente no tempo  $t_i$ .

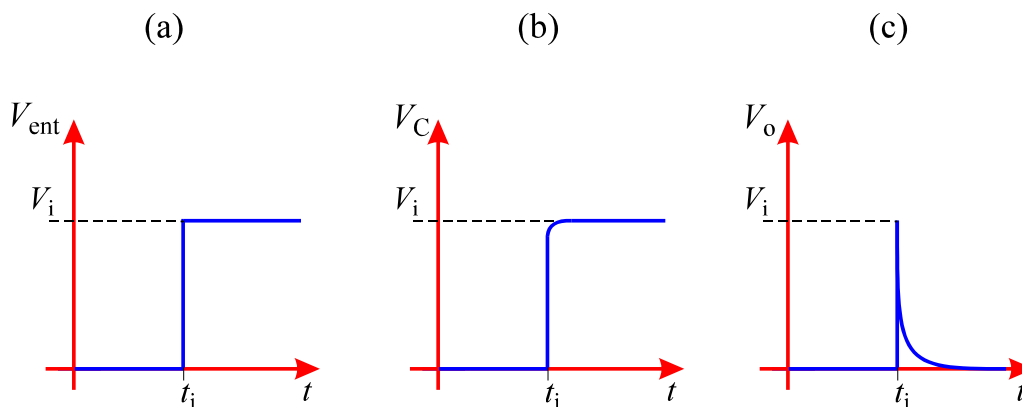


**Fig.20** Circuito  $RC$  série configurado como diferenciador.



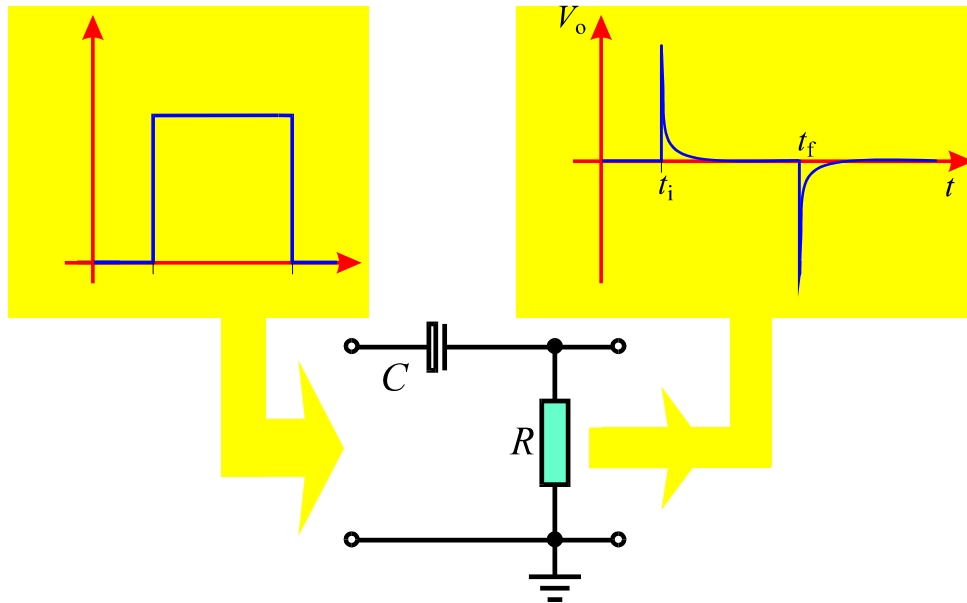
**Fig.21** Circuito  $RC$  série configurado para operação como diferenciador.

Como se pode observar na **Fig.22a**, enquanto a tensão de entrada permanece nula, o mesmo ocorre na saída. No momento em que a tensão de entrada atinge o valor  $V_i$  no tempo  $t_i$  o capacitor inicia um processo de carga. **Se a constante de tempo  $RC$  for suficientemente pequena**, o capacitor se carregará rapidamente, como indicado na **Fig.22b**. Como durante o carregamento circula corrente, surge uma queda de tensão sobre o resistor apenas durante um **curto intervalo de tempo**. Como se pode observar na **Fig.22c**, na saída do circuito aparece apenas um pico de tensão indicativo de uma variação positiva na tensão de entrada. Enquanto não houver nova variação na tensão de entrada, a tensão de saída permanecerá nula.



**Fig.22** Sinais elétricos no circuito  $RC$  da **Fig.21**: (a) Tensão de entrada, (b) tensão no capacitor e (c) tensão de saída do circuito.


Se a tensão de entrada retornar a zero no tempo  $t_f$ , o capacitor se descarregará rapidamente através do resistor, gerando um novo pico de tensão na saída. Como a corrente de descarga circula em sentido oposto ao da carga, o pico de tensão nesse caso será negativo, como mostrado na **Fig.23**.



**Fig.23** Tensão de saída para o circuito  $RC$  da **Fig.21** após a aplicação de um pulso de sinal.

Verifica-se, então, que a tensão de saída existe apenas quando ocorrem variações de tensão na entrada do circuito. Nota-se também que a tensão de saída exibe o sinal correspondente ao sentido de variação do sinal de entrada.

A partir da discussão anterior pode-se estabelecer a condição que deve ser imposta para que o circuito  $RC$  funcione como diferenciador:

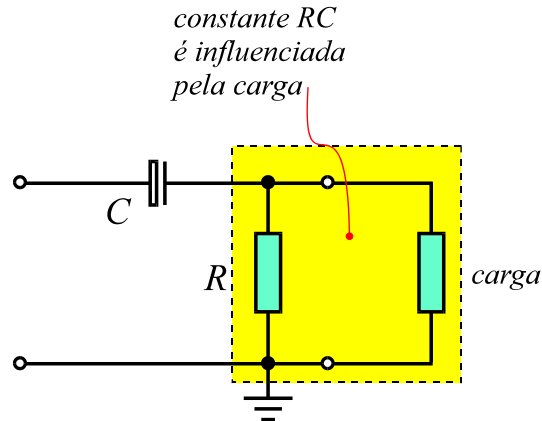
 **Um circuito  $RC$  série quando configurado como circuito diferenciador tem de ser projetado com uma constante  $RC$  pequena. Na prática a constante  $RC$  deve ser no máximo  $1/10$  da menor largura de pulso aplicado à entrada do circuito.**

## INTEGRADOR E DIFERENCIADOR COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Os circuitos integradores e diferenciadores passivos (que contêm apenas resistores e capacitores) apresentam as seguintes limitações práticas:

**Integrador:** Só opera satisfatoriamente durante a primeira meia constante de tempo de ocorrência do sinal, onde a carga e a tensão no capacitor variam linearmente com o tempo.

**Diferenciador:** A constante de tempo tem de ser, no máximo, 1/10 da menor largura de pulso do sinal aplicado à entrada. Além disso, verifica-se que a ligação de uma carga à saída altera o comportamento do circuito, pois modifica a constante  $RC$  do circuito, conforme ilustrado na **Fig.24**.



**Fig.24** Influência de uma carga externa no circuito  $RC$  diferenciador.

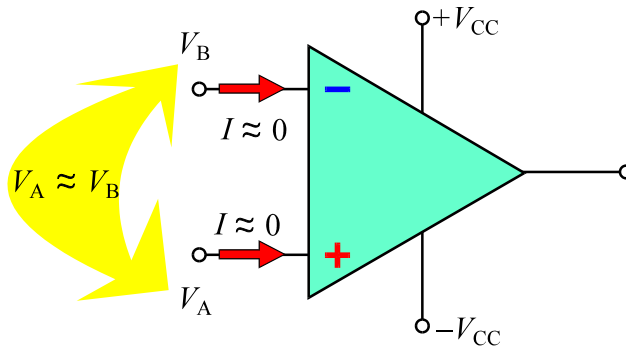
Essas limitações podem ser contornadas com o uso de um componente ativo, tal como o amplificador operacional, conforme examinado a seguir.

## INTEGRADOR COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Para analisar o funcionamento do circuito integrador com  $AO$ , convém considerar duas importantes características associadas a este componente:

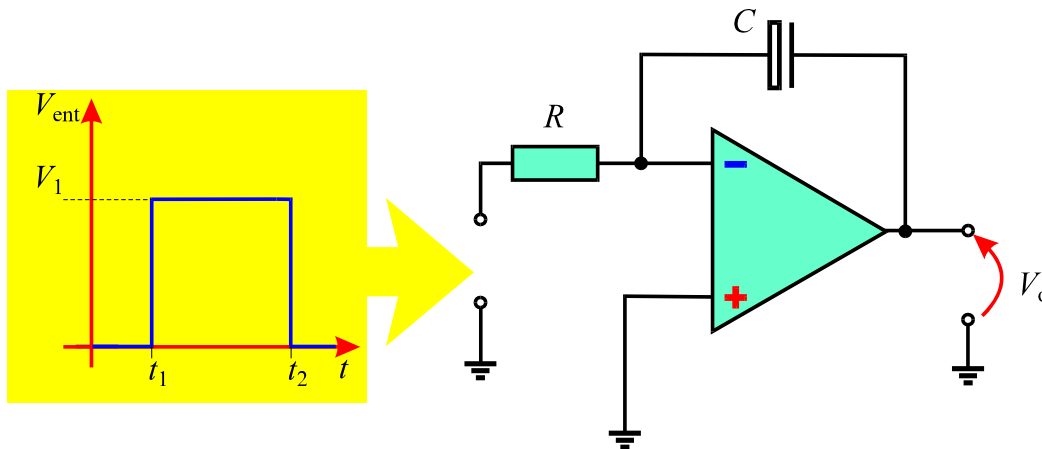
- Ambas as entradas de um  $AO$  se mantêm praticamente no mesmo potencial.
- A corrente injetada em cada entrada de um  $AO$  é praticamente nula.

Essas características estão representadas na **Fig.25**.



**Fig.25** Representação de duas características de entrada de um  $AO$ .

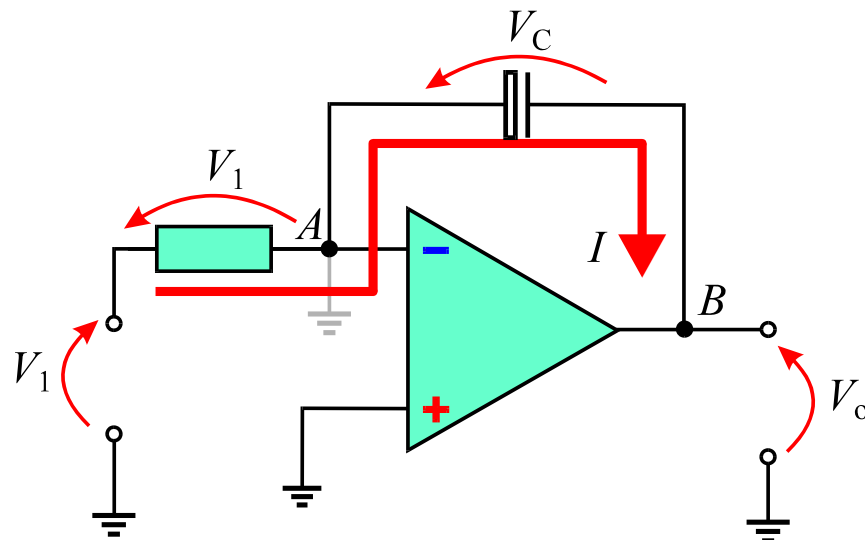
A partir dessas considerações, a análise do integrador com *AO* é feita com base no diagrama de circuito mostrado na **Fig.26**, onde se admite a aplicação de um pulso retangular na entrada do circuito.



**Fig.26** Circuito integrador com *AO*.

No intervalo de tempo  $0 < t < t_1$ , a tensão de entrada é nula. Considerando-se o *AO* corretamente ajustado, a tensão de saída também é nula.

Em  $t = t_1$  a tensão de entrada aumenta para o valor  $V_1$ , permanecendo constante até o instante de tempo  $t=t_2$ . Durante o intervalo de tempo  $t_1 < t < t_2$  a tensão  $V_1$  permanece totalmente aplicada entre os terminais do resistor, uma vez que um de seus terminais corresponde ao terra virtual do *AO*, conforme mostrado na **Fig.27**.

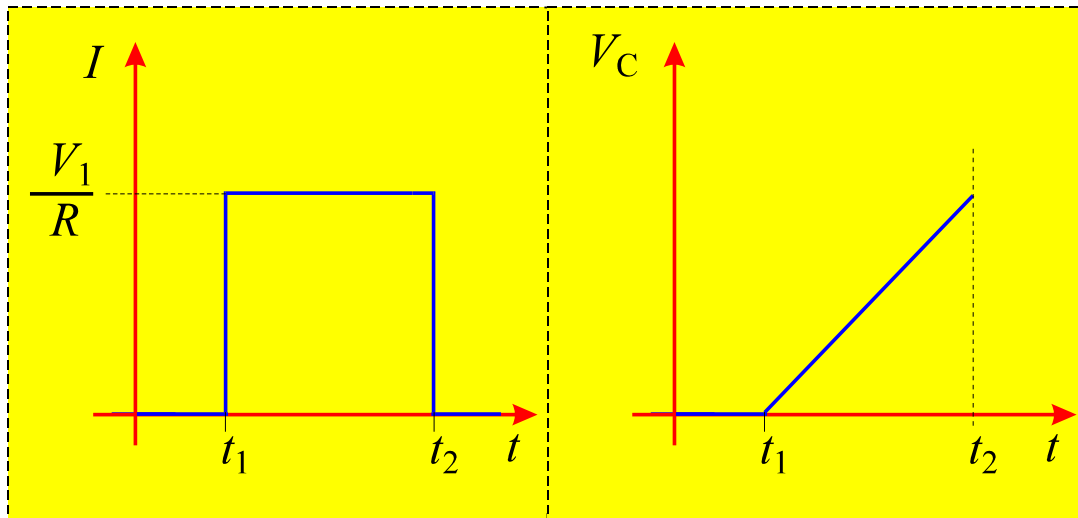


**Fig.27** Operação do integrador no intervalo de tempo  $t_1 < t < t_2$ .

Sendo nula a corrente injetada no terminal inversor, circula através do resistor e do capacitor uma corrente dada por

$$I = \frac{V_1}{R}$$

É importante observar que o terra virtual na entrada inversora garante que essa corrente se mantenha constante durante a permanência do sinal de entrada no valor  $V_1$ . O capacitor começa a se carregar devido à circulação de corrente. Como a corrente é constante, a carga armazenada aumenta linearmente com o tempo, o mesmo ocorrendo com a tensão entre os terminais do capacitor, conforme ilustrado na **Fig.28**.

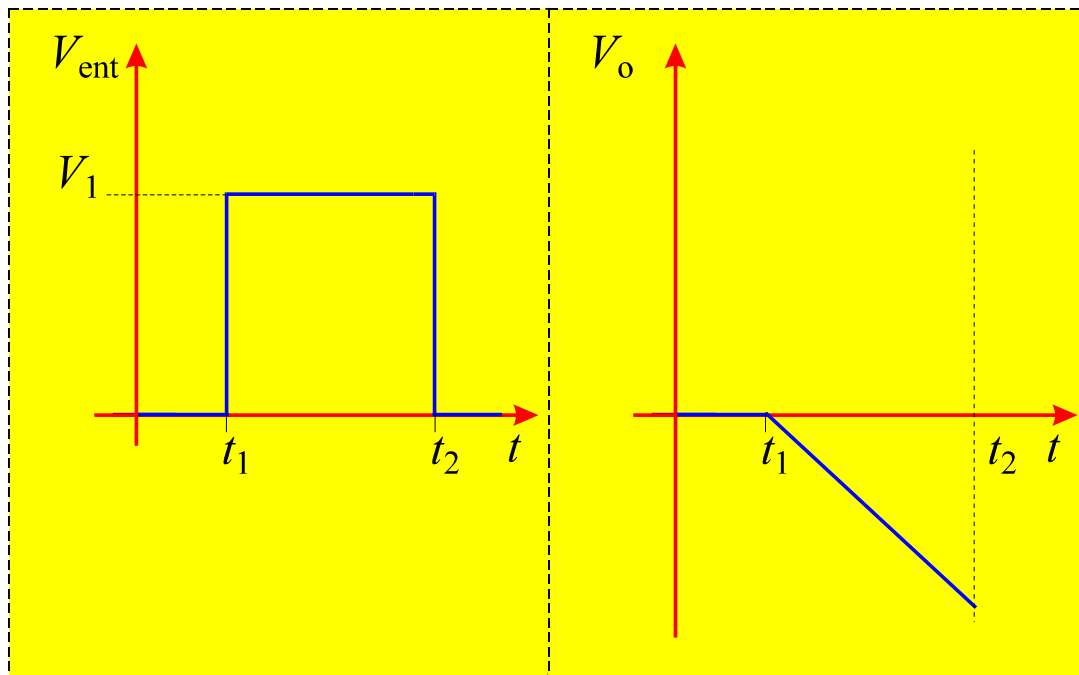


**Fig.28** Corrente no resistor e tensão no capacitor para  $t_1 < t < t_2$ .

Como o terminal  $A$  do capacitor está mantido a um potencial essencialmente nulo, o aumento de tensão no capacitor só pode ocorrer se a tensão de saída  $V_o$  diminuir linearmente com o tempo, de forma que

$$V_C(t) = V_A - V_o(t) = 0 - V_o(t) = -V_o(t)$$

Assim, uma queda de tensão positiva entre os terminais do capacitor só pode ocorrer se a tensão  $V_o$  tornar-se negativa, conforme mostrado na **Fig.29**, de forma que o segundo membro da expressão anterior seja positivo.



**Fig.29** Tensões de entrada e saída no circuito integrador para  $t_1 < t < t_2$ .

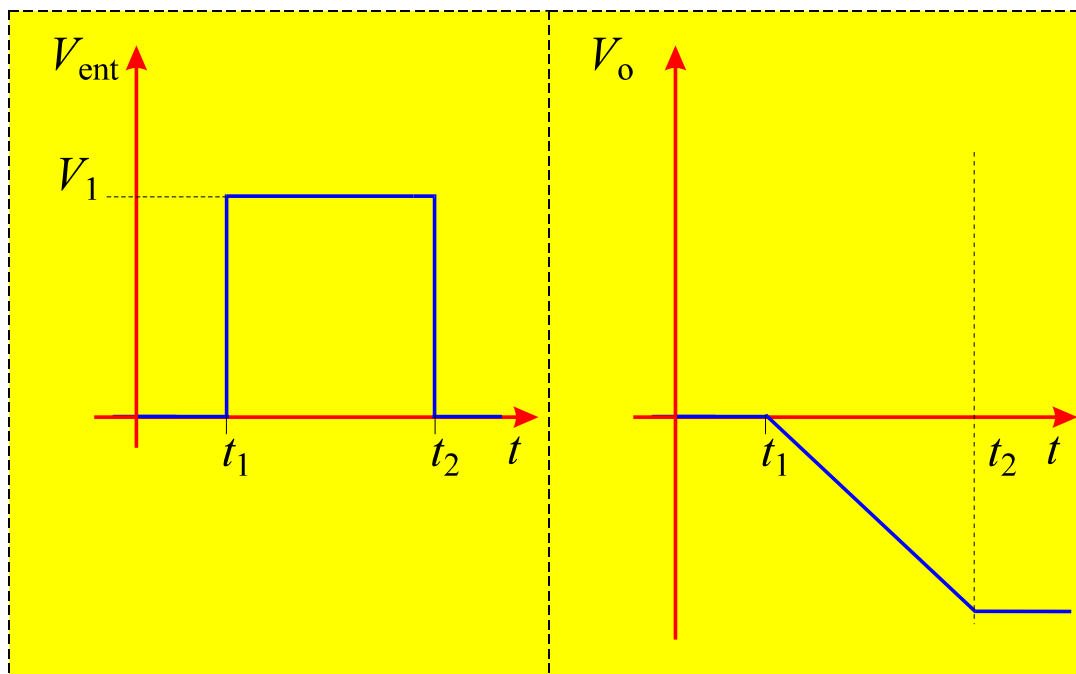
A tensão de saída assume portanto um valor negativo que varia linearmente com o tempo e permanece variando enquanto a tensão de entrada permanecer no valor  $V_1$ . Essa variação poderá ser interrompida em três situações:

- Se a tensão de saturação do operacional for atingida.
- Se o capacitor atingir seu limite de carga.
- Se a tensão de entrada mudar de valor.

A saturação do operacional pode ser evitada se a tensão  $V_1$  aplicada for sempre inferior a tensão de saturação do operacional. A segunda depende dos valores de  $R$ ,  $C$  e largura do pulso de entrada e pode ser evitada pelo emprego de valores adequados para  $R$  e  $C$ .

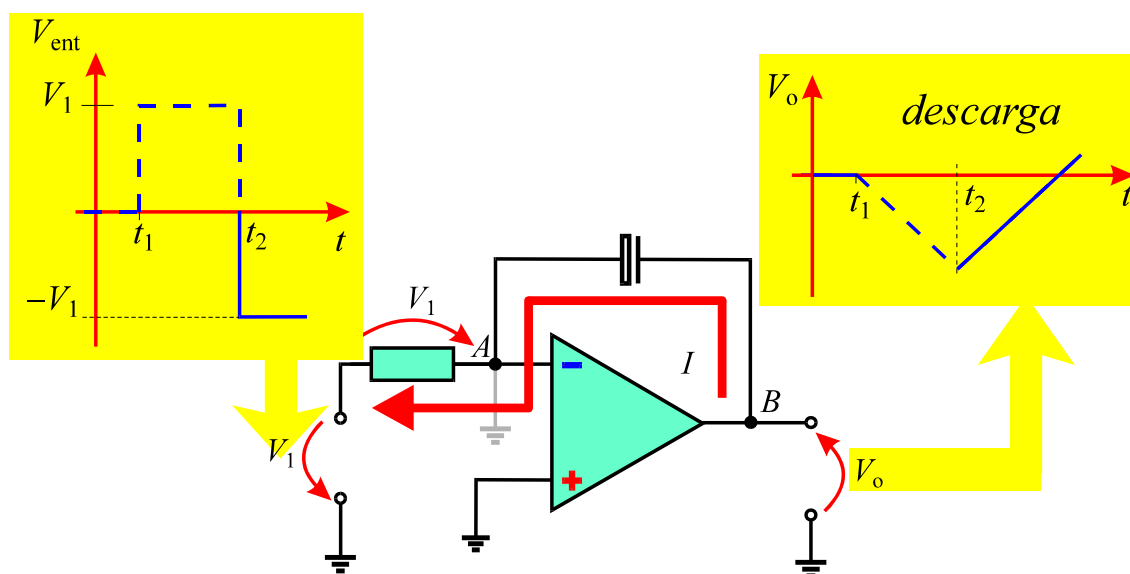
Se a tensão de entrada retorna novamente a zero para  $t > t_2$ , a queda de tensão no resistor torna-se nula, visto que o terminal  $A$  do operacional corresponde ao terra virtual, conforme mostrado na **Fig.30**. Esse valor nulo de tensão implica uma corrente nula circulando através do resistor e do capacitor. Nessas condições a carga armazenada no capacitor não se altera e a tensão de saída se mantém constante para  $t > t_2$ , conforme mostrado na **Fig.30**.





**Fig.30** Tensão de entrada e saída para um pulso de entrada que retorna a um valor nulo.

A única possibilidade de descarregar o capacitor é através da aplicação de uma tensão negativa na entrada conforme mostra a **Fig.31**.



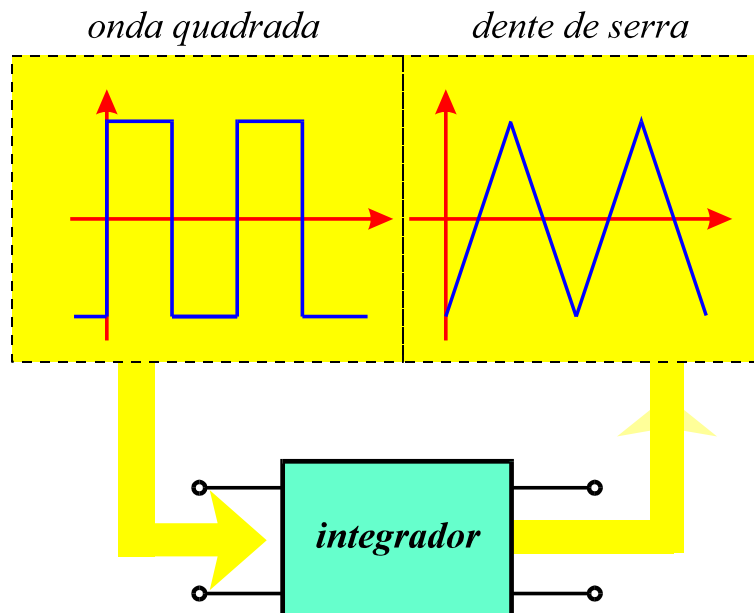
**Fig.31** Efeito produzido na saída do integrador por um pulso com uma componente negativa.

A tensão negativa na entrada do resistor fará circular uma corrente constante sobre o resistor, com o sentido indicado na **Fig.31**. Essa corrente constante faz que a carga do capacitor diminua linearmente como função do tempo.

A queda de tensão no capacitor diminui proporcionalmente, e como resultado a tensão de saída aumenta linearmente com o tempo. Se o tempo de aplicação da tensão negativa na entrada for longo o suficiente, a carga armazenada na armadura positiva passa a se tornar negativa e a queda de tensão no capacitor muda de sinal.

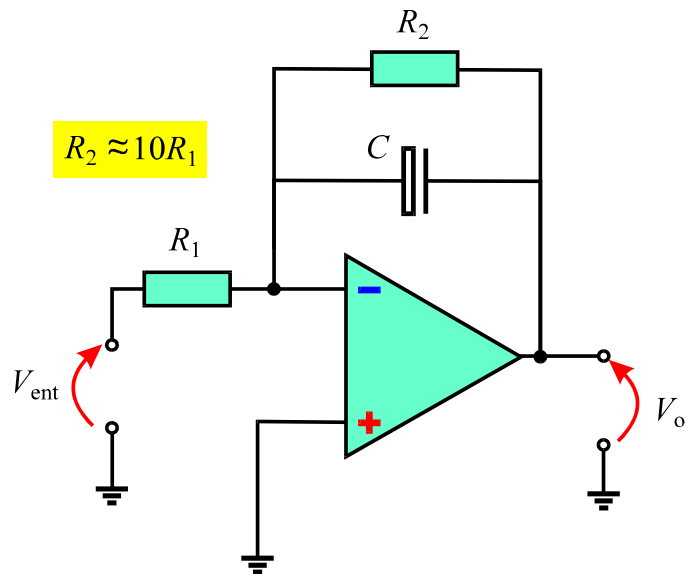
Como resultado a tensão de saída passa a ser positiva, como mostrado na **Fig.31**.

Assim, a aplicação de uma onda quadrada simétrica na entrada de um integrador com  $AO$ , produz na saída uma onda **dente de serra**, do tipo mostrado na **Fig.32**.



**Fig.32** Onda dente de serra gerada a partir de uma onda quadrada simétrica na entrada de um integrador com  $AO$ .

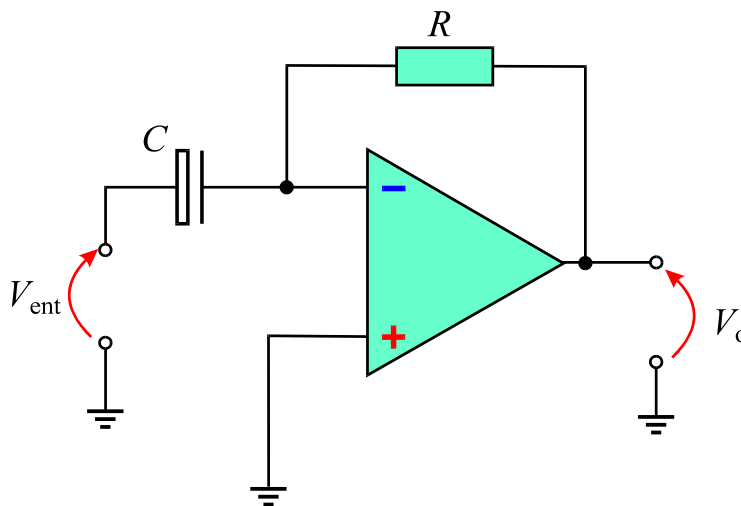
Na prática, acrescenta-se ao circuito integrador um resistor em paralelo com o capacitor para que o  $AO$  possa também operar com realimentação  $cc$ , como indicado na **Fig.33**. Esse resistor, em geral, tem uma resistência 10 vezes maior que aquela do resistor de entrada do circuito. Esse alto valor de resistência minimiza interferências na constante de tempo e formas de onda do circuito, e melhora sua estabilidade.



**Fig.33** Circuito integrador com a adição de um resistor em paralelo com o capacitor na malha de realimentação.

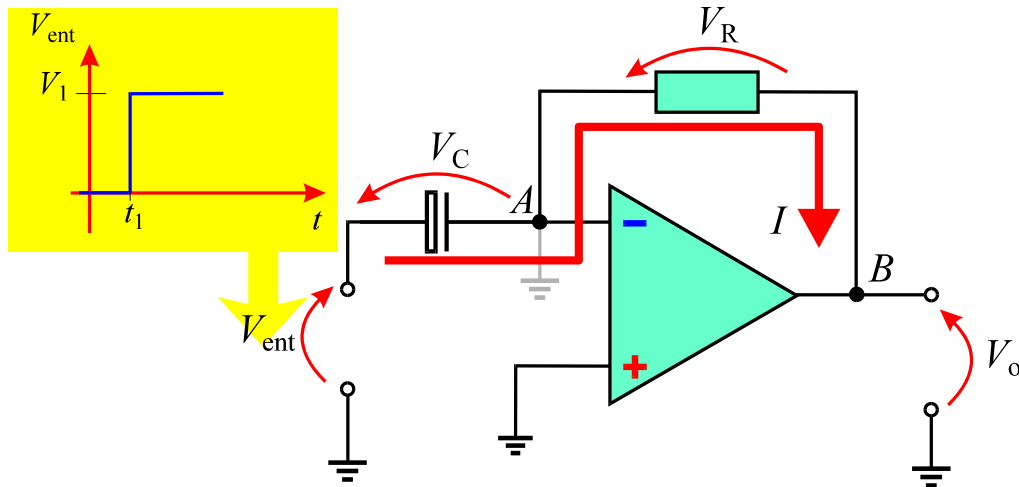
## DIFERENCIADOR COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O diferenciador com *AO* tem uma configuração que se assemelha à do integrador e pode ser obtido alternando a posição do resistor com a posição do capacitor, conforme ilustrado na **Fig.34**.



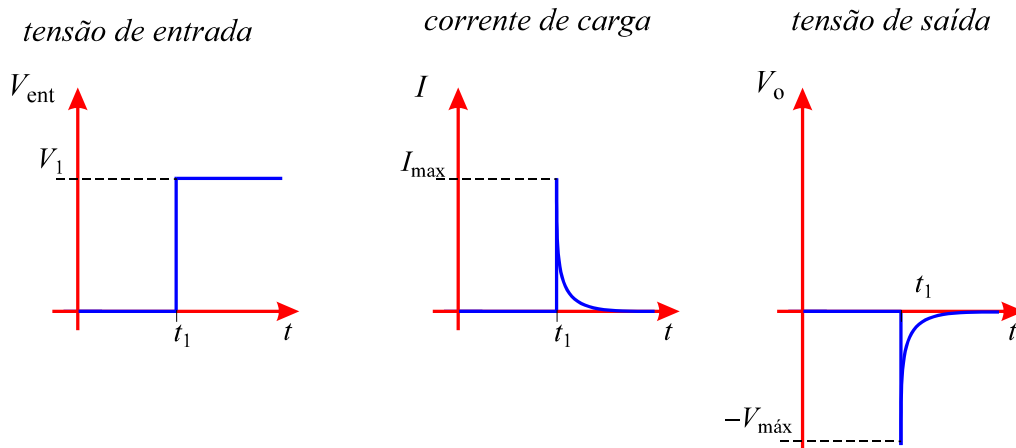
**Fig.34** Configuração básica de um diferenciador com *AO*.

Admitindo a aplicação do sinal mostrado na **Fig.35**, quando a tensão de entrada é nula, os dois lados do capacitor estão a um potencial nulo e como não há corrente circulando na malha de realimentação, a tensão de saída é nula.



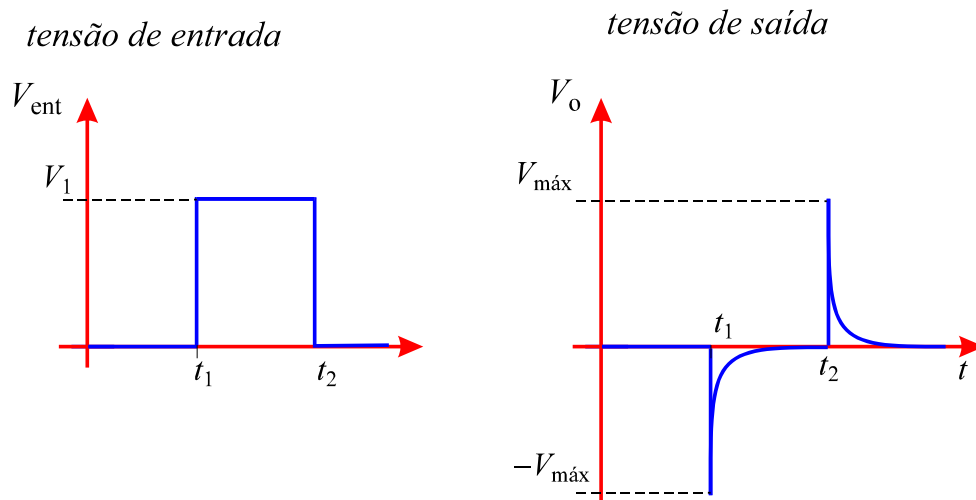
**Fig.35** Diferenciador com AO sujeito a um sinal de entrada.

Os sinais elétricos no circuito estão mostrados na **Fig.36**. Como pode ser aí observado, no instante de tempo  $t_1$ , quando a tensão de entrada varia de zero a um valor  $V_1$ , o capacitor tende a se carregar, o que implica uma circulação de corrente através do capacitor e do resistor. Essa corrente circula até que o capacitor se carregue totalmente. Durante esse tempo de carga do capacitor surge uma queda de tensão no resistor. Como o terminal  $A$  da **Fig.35** está a um potencial nulo, a tensão de saída torna-se negativa durante o tempo de carga do capacitor. O diferenciador exibe uma constante de tempo  $RC$  pequena, e a corrente de carga circula apenas durante um breve intervalo de tempo, provocando o aparecimento de um pico de tensão negativa na saída do circuito, como mostrado na **Fig.36**.



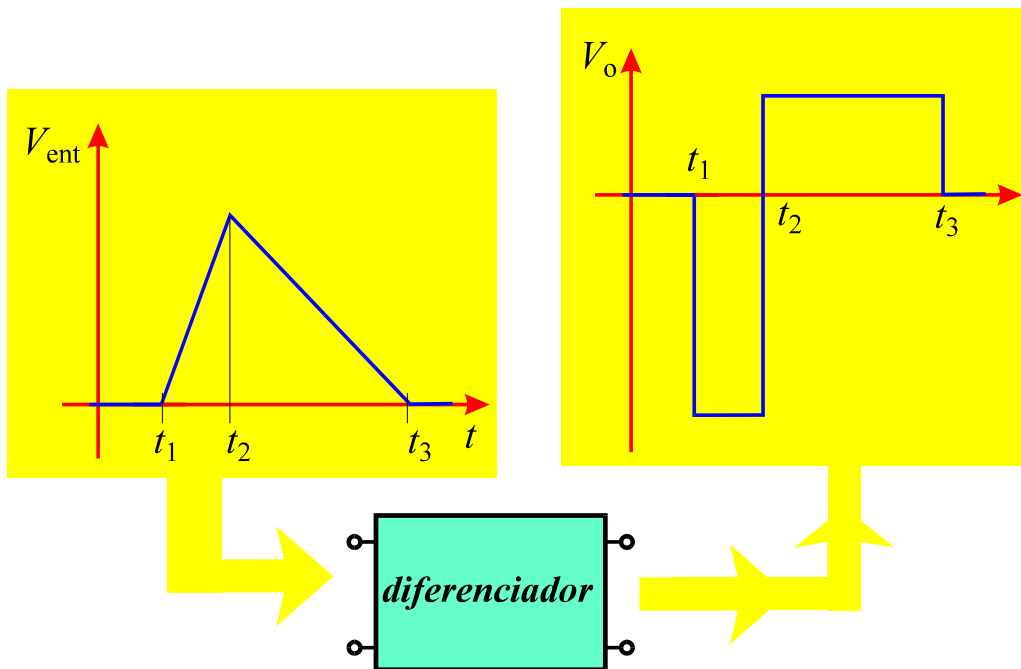
**Fig.36** Sinais elétricos no diferenciador com AO.

Para uma transição negativa do sinal de entrada, a corrente circula em sentido oposto, gerando um pico positivo na saída, conforme ilustrado na **Fig.37**.



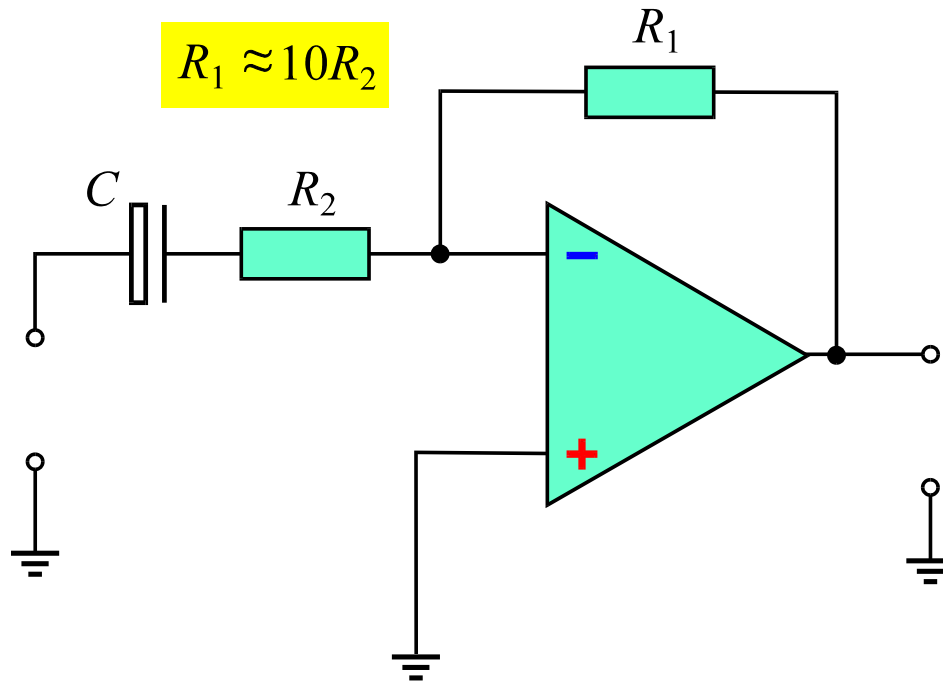
**Fig.37** Tensão na saída de um diferenciador submetido a um pulso de tensão.

É muito comum a aplicação de uma tensão dente de serra na entrada do diferenciador. Nesse caso, a variação linear na tensão de entrada, aplicada diretamente aos terminais do capacitor, impede que a corrente de carga varie, gerando tensões de saída constantes e proporcionais às inclinações das rampas associadas à tensão dente de serra, conforme ilustrado na **Fig.38**.



**Fig.38** Tensão de saída de um diferenciador submetido a um pulso de tensão.

Na prática acrescenta-se um resistor em série com o capacitor no circuito diferenciador, conforme mostrado no diagrama da **Fig.39**. Esse resistor evita oscilações do circuito em altas frequências e tem, geralmente, uma resistência 10 vezes menor que aquela do resistor da malha de realimentação.



**Fig.39** Diferenciador com  $AO$  com resistor em série com o capacitor.

# Apêndice

## QUESTIONÁRIO

1. Faça um desenho de uma seqüência periódica de pulsos retangulares e identifique os seguintes parâmetros: ciclo, período, largura de pulso, freqüência e componente *cc*.
2. O que se entende por integração, no sentido matemático?
3. Qual é a função básica de um circuito integrador?
4. Qual é a função básica de um circuito diferenciador?
5. De que forma um circuito *RC* pode ser configurado para servir como integrador? E como diferenciador?
6. Qual é a máxima largura de pulso que pode ser aplicada a um circuito *RC* integrador para que o circuito opere satisfatoriamente?
7. Qual é o máximo valor da constante de tempo de um circuito diferenciador *RC*, em relação à largura do pulso de entrada, para que ele opere satisfatoriamente?
8. Desenhe os diagramas de circuito de um integrador com *AO* e de um diferenciador com *AO*.
9. Qual é a vantagem de uso de diferenciadores e integradores com *AO* relativamente àqueles circuitos na configuração *RC*?

## **BIBLIOGRAFIA**

LANDO, Roberto Antônio & ALVES, Sérgio Rios, Amplificador operacional, São Paulo, Érica (1983).

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica vol.2, São Paulo, Mc-Graw Hill do Brasil, (1986).