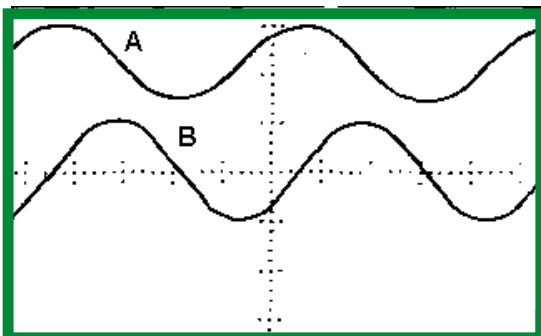
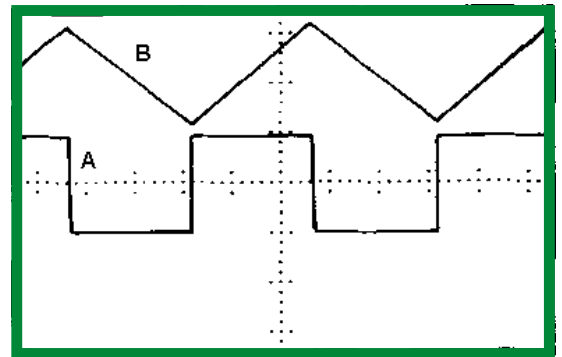
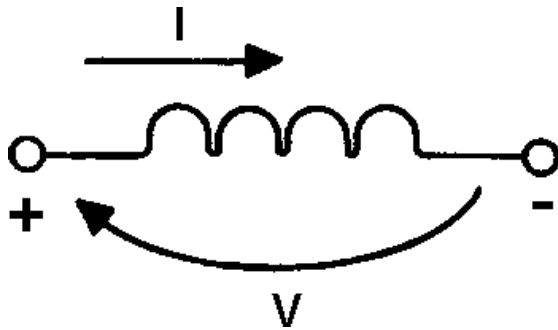


ANÁLISE DE CIRCUITOS E FORMAS DE ONDA



Aldo Lopes
ECCEL ELETRÔNICA
www.eccel.com.br

Todos os direitos reservados. Proibida a
reprodução total ou parcial sem prévia
autorização por escrito do autor.

**COPYRIGHT BY
ALDOBERTO LOPES
ECCEL ELETRÔNICA
www.eccel.com.br
©1996-2008**

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INDUTORES E CAPACITORES	6
O Indutor	6
O Capacitor	12

CAPÍTULO 2

FILTROS PASSIVOS	19
Filtro RL	19
Filtro RC	20
Curva de Resposta em Frequência	22
Filtro LC	26
Filtro Passa-Faixa	27
Filtro Rejeita-Faixa	27

CAPÍTULO 3

DIODOS	29
A Junção PN	29
Polarização Direta	31
Polarização Reversa	31
Retificador de Meia Onda	32
Retificador de Onda Completa	33
Secundário com Derivação Central	33
Retificador de Onda Completa em Ponte	37
Filtro Capacitivo	38
Filtro RC	40
Filtro LC	41
Limitador ou Grampo de Diodo	41
Limitador Polarizado	42
Grampeador DC	44
Retificador de Pico-a-Pico	46
Multiplicadores de Tensão	47
Dobrador de Tensão de Meia Onda	47
Dobrador de Tensão de Onda Completa	48
Triplicador de Tensão	48
Quadruplicador de Tensão	48

INTRODUÇÃO

Uma das formas mais eficientes de se interpretar o funcionamento de um circuito eletrônico, sem dúvidas, é através da análise das formas de onda desenvolvidas em alguns pontos estratégicos do mesmo.

Elaboramos este trabalho com o objetivo de auxiliar o estudante, principalmente iniciante na Eletrônica, técnico ou hobbysta, a desvendar o funcionamento dos circuitos básicos através do acompanhamento de suas formas de onda, fazendo uma correlação entre a análise descritiva e a comprovação experimental com as formas de onda apresentadas em um osciloscópio.

As experiências demonstradas são desencadeadas com base em perguntas, feitas por um suposto aluno acompanhando as demonstrações de um professor.

Naturalmente, não incluiremos todos os circuitos possíveis, o que demandaria muitos e muitos livros como esse, dada a infinidade de diagramas e configurações que poderíamos abordar, mas esperamos em outra oportunidade dar continuidade a esse trabalho, analisando circuitos diversos que utilizem transistores, circuitos integrados e outros dispositivos especiais da eletrônica.

Aos leitores que desejam conhecer melhor o funcionamento, e mesmo àqueles que ainda não sabem como utilizar os importantes recursos de um osciloscópio, sugerimos a leitura do livro "Manual do Osciloscópio - Uma Ferramenta Indispensável", do autor Gentil F. Silva - editora Eltec.

Aldo Lopes

CAPÍTULO 1

INDUTORES E CAPACITORES

O INDUTOR

Sabemos que tanto o indutor, como o capacitor, são elementos passivos capazes de armazenar e fornecer energia em quantidades finitas, ou seja, não são como uma fonte ideal, sendo incapazes de manterem o fornecimento contínuo de uma potência média.

Essa propriedade nos ajuda a diferenciar bem um elemento ativo de um elemento passivo: o elemento ativo é aquele que apresenta a capacidade de fornecer uma quantidade infinita de energia, enquanto a energia fornecida por um elemento passivo é limitada.

No início do século passado, Oersted, um cientista holandês, demonstrou que quando uma corrente elétrica passava por um condutor, o ponteiro de uma bússola colocada nas proximidades se deslocava. Ele provou portanto a existência do campo magnético produzido pela corrente elétrica.

Logo em seguida, Ampère, na França, demonstrou com suas medições que a relação entre o campo criado e a corrente que o produz é linear.

Somente vinte anos depois, o inglês Michael Faraday e o americano Joseph Henry descobriram, quase que simultaneamente, o fenômeno da indução. Foi Faraday quem primeiro demonstrou que um campo magnético variável produzia uma voltagem em um circuito próximo.

Faraday verificou que a voltagem produzida era proporcional à razão de variação da corrente com o tempo.

Hoje, chamamos essa constante de proporcionalidade de **indutância**, e a simbolizamos pela letra L maiúscula.

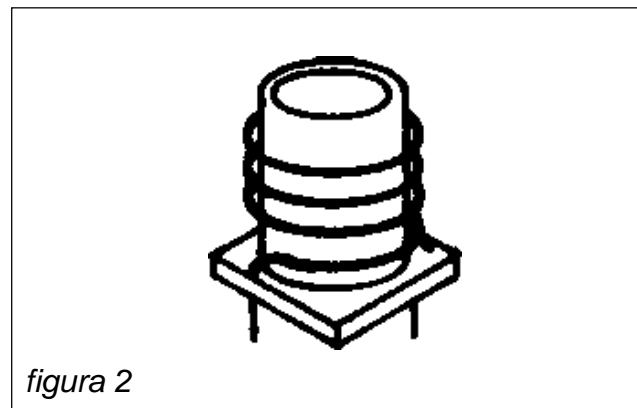
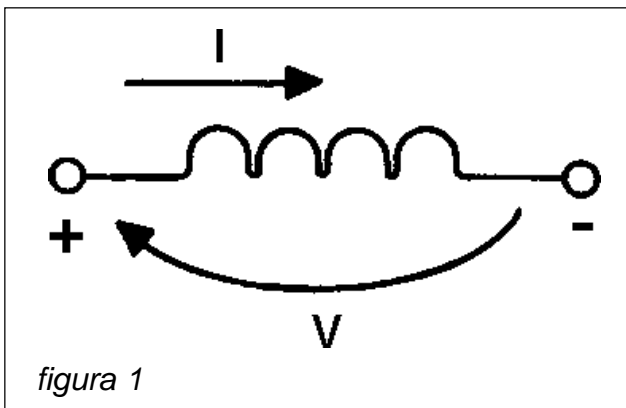
O símbolo do circuito indutor é visto na **figura 1**, junto com os sinais para sua tensão e corrente.

A unidade de medida da indutância é o **henry** (H), em homenagem a Joseph Henry, para expressar volt-segundo/ampère.

Construímos um indutor enrolando um pedaço de fio em uma fôrma (**figura 2**). Esse “formato” assumido pelo fio enrolado aumenta efetivamente o campo magnético produzido. A indutância dessa bobina é proporcional ao quadrado do seu número de espiras.

A voltagem nos terminais de um indutor é proporcional à razão da variação da corrente que o atravessa com o tempo.

Sem variação, ou seja, se a corrente for constante (DC), não haverá tensão sobre o indutor, de modo que podemos dizer que um indutor real comporta-se como um curto-circuito para DC, independente da



magnitude dessa corrente contínua que o atravessa.

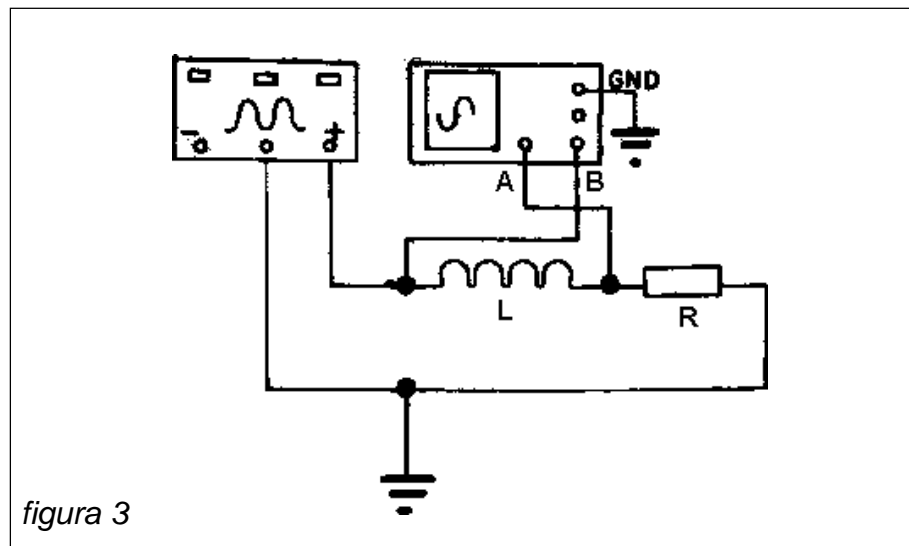
Por outro lado, se forçarmos uma variação muito brusca na corrente que passa por um indutor, essa variação forçará uma mudança também muito brusca na energia nele armazenada, o que se traduz pelo aparecimento de uma tensão muito alta entre seus terminais. Verificamos essa propriedade ao interromper bruscamente uma alta corrente que circula por um indutor (a corrente de um motor ou do enrolamento de um transformador, por exemplo). Se essa interrupção for feita por uma chave, certamente aparecerá um arco entre os contatos dessa chave, que pode inclusive com o tempo danificá-la. É a energia armazenada na forma de campo magnético produzido pelo indutor sendo “devolvida”, despendida através da ionização do ar na região dos contatos, provocando assim o arco elétrico.

Podemos analisar o comportamento do indutor também com outro enfoque: através da aplicação de uma forma de onda de excitação em tensão, verificamos a forma de onda de corrente produzida.

Segundo suas propriedades, vimos que o indutor tem a tendência de se opor a variações bruscas de corrente, respondendo com uma alta tensão entre seus terminais na “tentativa” de manter a corrente que o atravessa constante. O mesmo tipo de oposição podemos constatar submetendo o indutor a variações bruscas de tensão. Nesse caso, sua reação também será no sentido de impedir variações rápidas da corrente, ou seja, ele “tenta” manter a corrente que o atravessa em um valor constante, retardando sua variação.

Por exemplo, vamos submeter um indutor de 100 mH a uma onda quadrada de 10 Vpp, inicialmente com frequência de 10 kHz, e observar a forma de onda da corrente nele produzida.

Para poder monitorar a corrente, associamos em série ao indutor um resistor de valor muito baixo quando comparado à reatância desse indutor. Assim, iremos verificar a forma de onda de tensão sobre esse resistor, que terá o mesmo aspecto da forma de onda da corrente que atravessa o circuito. A representação desse experimento é vista na **figura 3**.



Na frequência de 10 kHz em que ajustamos o gerador, o indutor apresenta uma reatância indutiva X_L dada pela fórmula (1):

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (1)$$

Onde:

$$\pi = 3,14$$

$$f = 10000 = 10 \text{ kHz}$$

$$L = 0,1\text{H} = 100 \text{ mH}$$

Portanto:

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 10000 \cdot 0,1 = 6280 \text{ ohms}$$

Utilizamos para R um valor menor que 1% dessa reatância, ou seja $R < (0,01 \cdot 6280)$. Assim, R deve ser menor que 62,8 ohms para não ter participação considerável no comportamento do circuito. Adotamos $R = 50$ ohms.

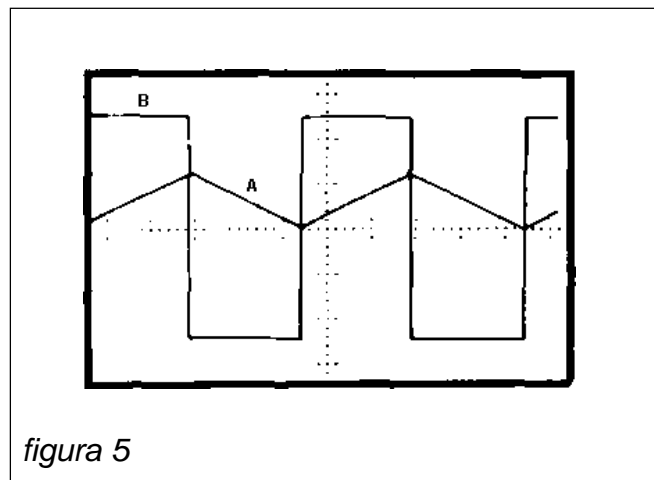
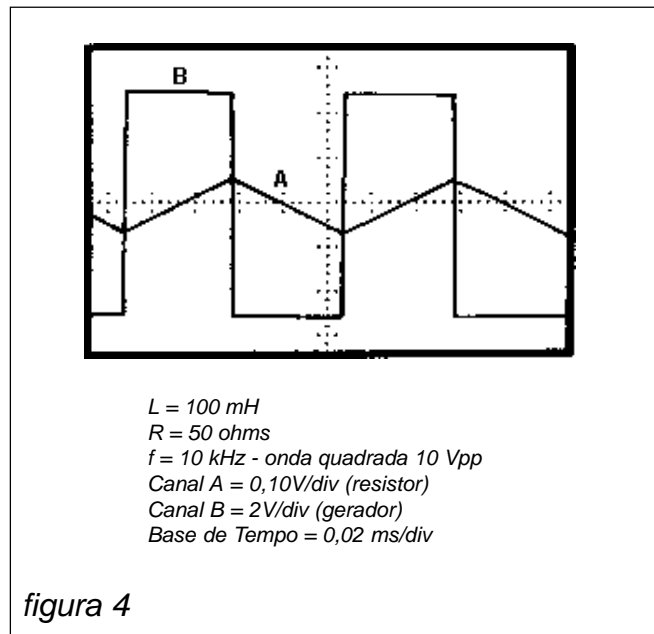
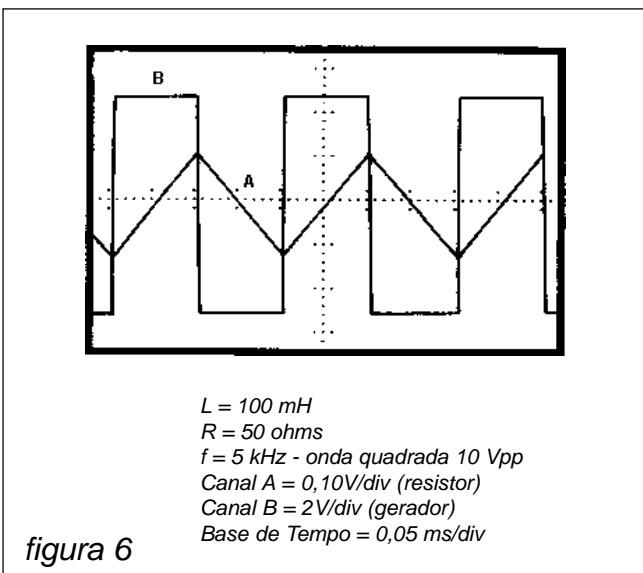
O canal A do osciloscópio recebe a tensão sobre o resistor de monitoração, o que significa que a forma de onda traçada com base nessa informação será proporcional à corrente que atravessa o circuito.

O canal B recebe a tensão do gerador de funções, de modo que a forma de onda traçada será quadrada, correspondendo ao sinal aplicado pelo gerador ao circuito.

Na **figura 4** temos os traçados que devemos obter na tela do osciloscópio.

- Por que assim que se liga o gerador, logo no início da onda quadrada a corrente no circuito já se encontra em um valor negativo, em vez de partir do zero ?

Devemos lembrar que a forma de onda observada no osciloscópio corresponde a um regime estável de funcionamento do circuito. Se observarmos os instantes iniciais, assim que o gerador foi ligado, naturalmente a corrente inicial será zero, subindo gradativamente até o pico máximo da onda triangular e, em seguida, com a inversão de polaridade da tensão do gerador no seu segundo semi-ciclo, ela irá decrescer até atingir novamente o zero. Nesses primeiros instantes de funcionamento dizemos que o circuito encontra-se em um regime transitório (comportamento temporário e variável). As duas ondas - de tensão e de corrente - no instante inicial de funcionamento, começariam como mostra a **figura 5**.



Assim que se liga o gerador, logo no início da onda quadrada a corrente no circuito já se encontra em um valor negativo, em vez de partir do zero ?

À medida que os ciclos vão se sucedendo, o circuito vai assumindo o regime estável de operação, no qual a variação de corrente fica defasada em relação à variação de tensão, conforme impõe o indutor, chegando inclusive a assumir patamares negativos, como mostra a **figura 4**.

- O que aconteceria agora, se reduzíssemos a frequência do gerador à metade, ou seja, 5 kHz ?

De imediato, sabemos que a reatância cairá também à metade do valor anterior, ou seja, passará de 6280 ohms para 3140 ohms, como sugere a equação (1). Conclusão: a corrente no circuito deverá ser dobrada. Realmente, é isso que observamos na tela do osciloscópio pela forma de onda sobre o resistor usado para monitorar essa corrente (**figura 6**).

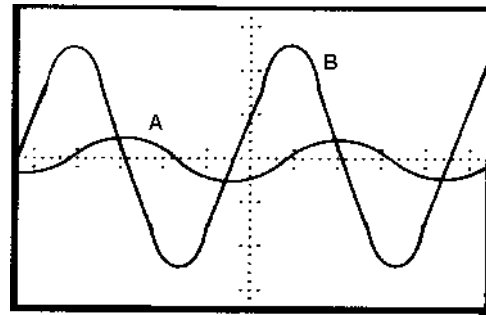
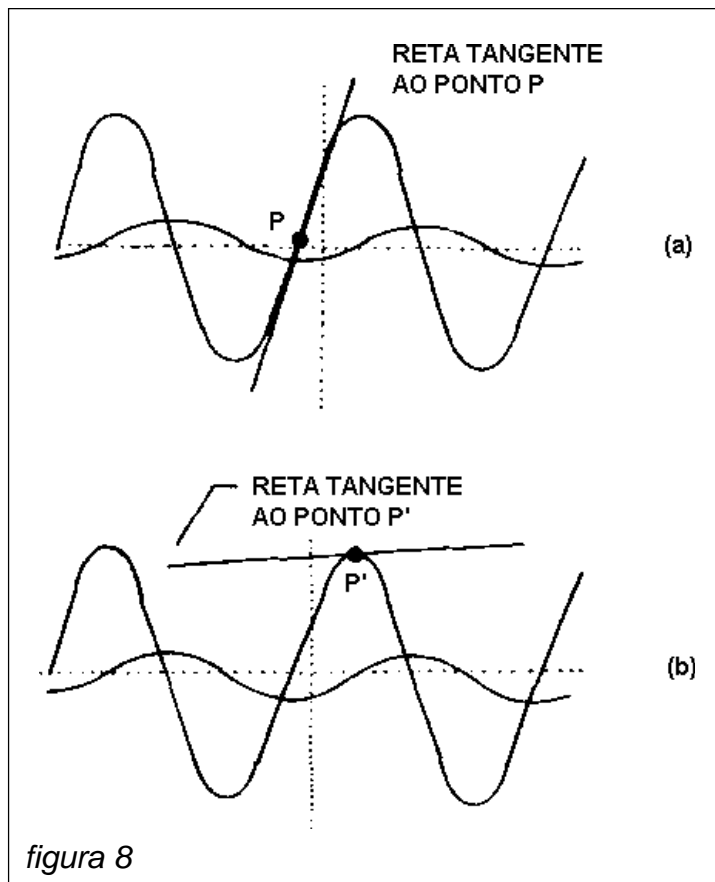
Mas não é somente reduzindo a frequência que podemos diminuir a reatância indutiva. Se o indutor for de 50 mH, em vez de 100 mH, a corrente no circuito também será dobrada para a mesma frequência do gerador.

- Com outras formas de onda, o indutor também provoca defasagem entre tensão e corrente ?

Sim, mesmo com uma excitação do tipo harmônica (senoidal ou co-senoidal), a variação da corrente é sempre defasada em relação à variação da tensão.

Vamos acompanhar o comportamento do mesmo circuito aplicando 10 Vpp - 10 kHz senoidais na sua entrada - **figura 7**.

Nesse caso, notamos que no instante em que a forma de onda de corrente cruza o eixo, ou seja, quando ela assume o valor zero, a tensão sobre o indutor é máxima (ponto de pico da forma de onda), tanto positiva como negativamente. Comprovamos portanto que existe realmente a defasagem entre as duas grandezas.

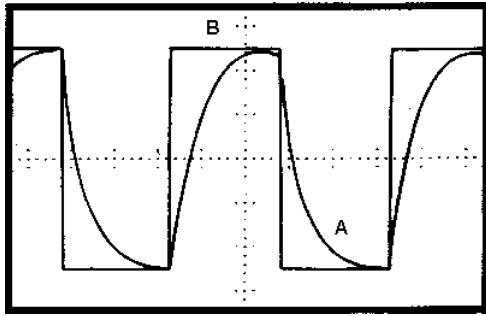


$L = 100 \text{ mH}$
 $R = 50 \text{ ohms}$
 $f = 10 \text{ kHz} - \text{onda quadrada } 10 \text{ Vpp}$
 Canal A = 0,10V/div (resistor)
 Canal B = 2V/div (gerador)
 Base de Tempo = 0,02 ms/div

figura 7

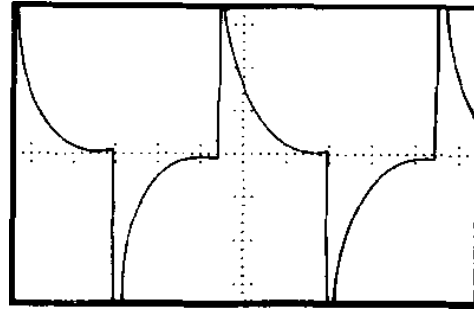
Essa relação máximo da tensão - zero de corrente já seria de se esperar. Devemos lembrar que a tensão sobre o indutor aparece em função da “velocidade” de variação da corrente que o atravessa. Quando a corrente se aproxima do ponto zero, temos a maior inclinação na sua curvatura que compõe sua forma de onda, o que equivale à maior variação de magnitude. Quando a corrente é máxima, seja positiva ou negativa, a variação no seu valor instantâneo se dá mais lentamente.

Constatamos isso traçando uma reta tangente imaginária no ponto em que queremos avaliar a taxa de variação do valor instantâneo. Na **figura 8a**, a reta tangente ao ponto P da curva próximo ao eixo horizontal apresenta-se praticamente na vertical, indicando que a grandeza representada pela curva (corrente) varia rapidamente nesses instantes. Já na **figura 8b**, a reta tangente ao ponto P' encontra-se quase que na horizontal, demonstrando que nesses instantes de pico a variação do valor instantâneo da corrente é mais lenta,



$L = 100 \text{ mH}$
 $R = 10 \text{ k ohms}$
 $f = 10 \text{ kHz}$ - onda quadrada 10 Vpp
 Canal A = 2V/div (resistor)
 Canal B = 2V/div (gerador)
 Base de Tempo = 0,02 ms/div

figura 9



Canal A = 2V/div (indutor)
 Base de Tempo = 0,02 ms/div

figura 10

chegando a zero no ponto de inflexão (inversão do sentido de variação de crescente para decrescente ou vice-versa).

Como estudamos, a uma variação mais rápida da corrente corresponde uma maior tensão entre os terminais do indutor, enquanto a uma taxa de variação pequena, teremos associada uma tensão baixa entre os terminais desse componente.

É exatamente isso que demonstra a **figura 7**.

- O que aconteceria se o resistor tivesse um valor significativo quando comparado à reatância indutiva ?

Vamos passar R para 10k ohms. Nesse caso, o circuito passa a ser do tipo RL série, ou seja, deixa de ser apenas um indutor, e não temos mais sobre o indutor a exata tensão do gerador, já que essa se divide entre os dois componentes do circuito em série. O mesmo poderíamos afirmar se a indutância fosse menor, em vez do resistor maior. O importante é a comparação XL versus R.

Vamos analisar as forma de onda no circuito RL, iniciando pela corrente, comparada à tensão de excitação (onda quadrada do gerador) - **figura 9**.

Notamos que a corrente deixa de ter a forma de onda triangular, passando a ser exponencial. Lembrando que estamos avaliando essa corrente pela forma de onda de tensão sobre o resistor, notamos no osciloscópio que a onda de tensão no resistor chega aos mesmos valores de pico da onda quadrada de excitação, apesar do retardo provocado pelo indutor. A **figura 10** tem o osciloscópio monitorando a forma de onda sobre o indutor. Podemos notar que a soma ponto-a-ponto dessa forma de onda com a onda de tensão do resistor resulta exatamente na onda quadrada de

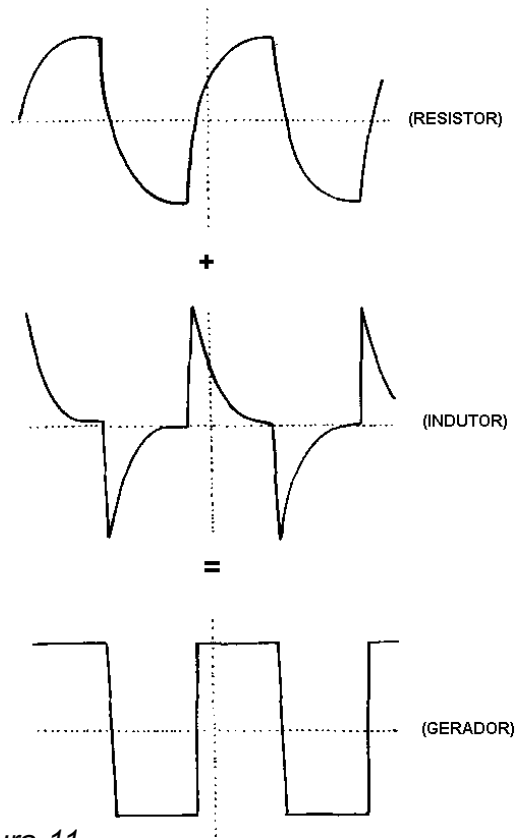
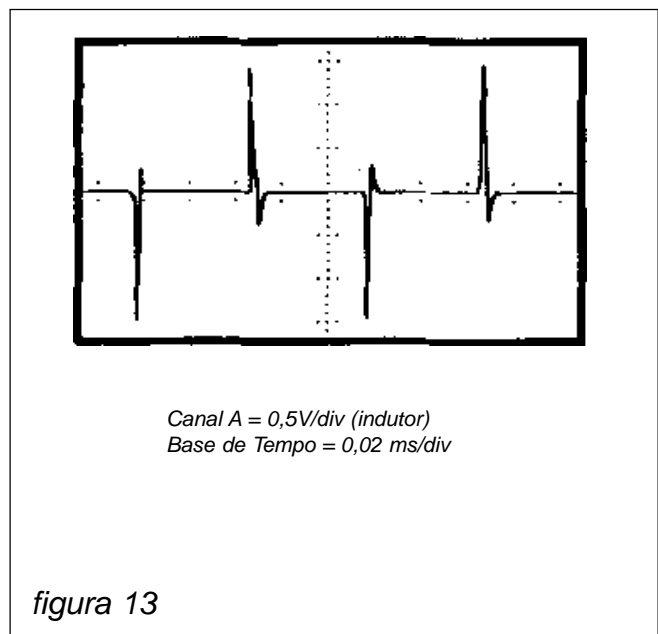
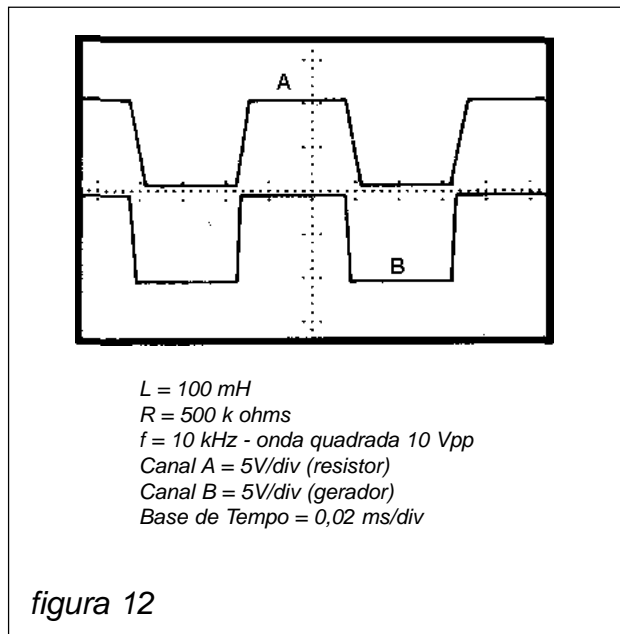


figura 11



excitação (**figura 11**). Aos pontos de máximos da onda sobre o resistor corresponde os pontos de mínimos sobre o indutor, e vice-versa.

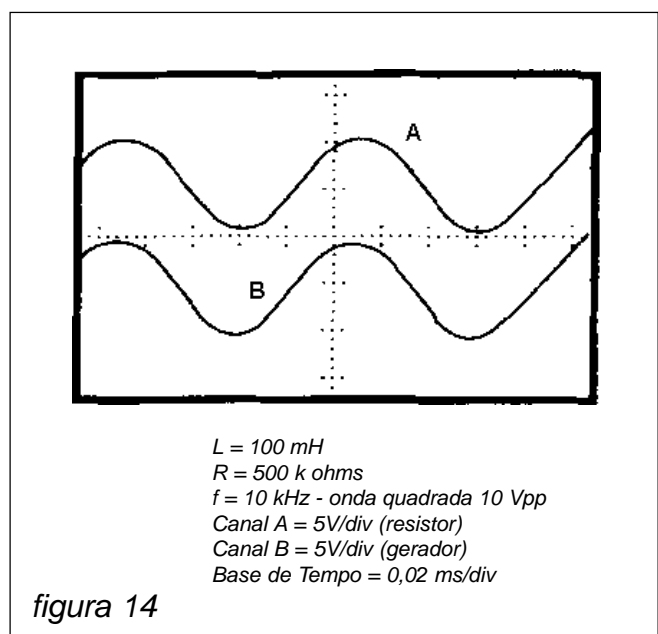
- E Se o resistor tiver uma resistência muito maior do que a reatância indutiva, o indutor passa a ser desprezível ?

Sim, o circuito como um todo passa a ter o resistor como componente predominante. Vamos comprovar na prática, passando R para 500 k ohms, ou seja, quase dez vezes maior do que a reatância indutiva nessa frequência de 10 kHz. Na **figura 12** temos a forma de onda sobre o resistor comparada à do gerador. Para poder visualizar as duas ondas, precisamos deslocar os feixes, deixando o do canal A da metade da tela para baixo e o do canal B da metade para cima. Se não fizessemos isso, as duas ondas estariam sobrepostas e não conseguiríamos distinguí-las.

- Se as duas formas de onda são praticamente idênticas, o que sobrou para o indutor ?

O indutor continua tendo o mesmo comportamento de se opor às variações bruscas, no entanto, afetado pelo resistor, que entre outras coisas limita a intensidade do campo gerado ao redor da bobina, já que a corrente no circuito diminuiu com a maior resistência do resistor. Assim, sobre o indutor teremos apenas alguns picos de tensão que surgem nas transições da onda quadrada aplicada pelo gerador, onde temos as variações mais bruscas. A **figura 13** traz essa forma de onda, onde podemos notar que a amplitude desses picos está bem abaixo do valor de pico da onda quadrada de entrada.

- Só de curiosidade, que tal passarmos o gerador para a forma de onda senoidal nesse circuito com o resistor de 500 k ?



Vamos fazer isso e comparar a forma de onda da entrada, ou seja, do gerador, com a do resistor - **figura 14**.

Notamos que as formas de onda também são praticamente idênticas, e observamos também que a defasagem é muito pequena, justificada pela predominância do efeito resistivo sobre o indutivo.

- Mas essa ligação indutor com resistor, com a saída sobre o resistor, não forma um filtro passa-baixas ?

Forma sim, mas vamos estudar os filtros mais à frente. Antes, é importante analisarmos os circuitos RC, da mesma forma que fizemos com os RL.

O CAPACITOR

Sabemos que um capacitor é construído com duas superfícies condutoras em que cargas podem ser armazenadas, sendo as mesmas separadas por uma fina camada de isolante que possua uma resistividade bastante elevada.

Essa construção física do capacitor é lembrada no seu símbolo, que pode ser visto na **figura 15**, junto com os seus sinais de corrente e tensão.

Admitindo que a resistividade do isolante entre as placas seja tão elevada a ponto de impedir a recombinação de cargas de polaridade oposta colocadas nas superfícies condutoras, nunca haverá corrente fluindo pelo interior do capacitor (através do isolante).

Mas, ligando o capacitor a uma fonte, sabemos que a corrente entra em uma placa do capacitor e sai da outra. Foi esse dilema que levou o cientista escocês James Clerk Maxwell à teoria eletromagnética unificada, que prevê uma "corrente de deslocamento", existente sempre que um campo elétrico ou voltagem varia no tempo.

A corrente de deslocamento flui na região entre placas do capacitor, sendo exatamente igual à corrente de condução que flui no terminal do capacitor.

Na análise de circuitos não nos preocupamos com a corrente de deslocamento, servindo a mesma apenas para justificar a corrente de condução.

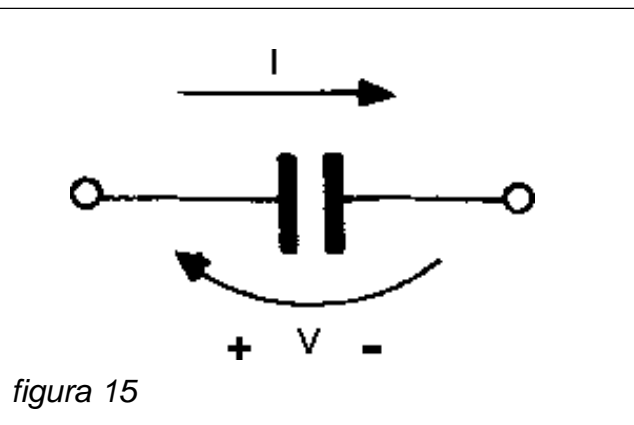


figura 15

Conceitos de campo elétrico e corrente de deslocamento são mais apropriados a um curso de Física ou de teoria eletromagnética.

Tudo que comentamos em termos de corrente para o indutor acontece em tensão para o capacitor.

Assim, a corrente de um capacitor é proporcional à razão da variação com o tempo da tensão a ele aplicada.

Sem variação, ou seja, se a tensão for constante (DC), não haverá corrente, de modo que podemos dizer que um capacitor real comporta-se como um circuito aberto para DC, independente da magnitude da voltagem aplicada.

Por outro lado, se formos uma variação

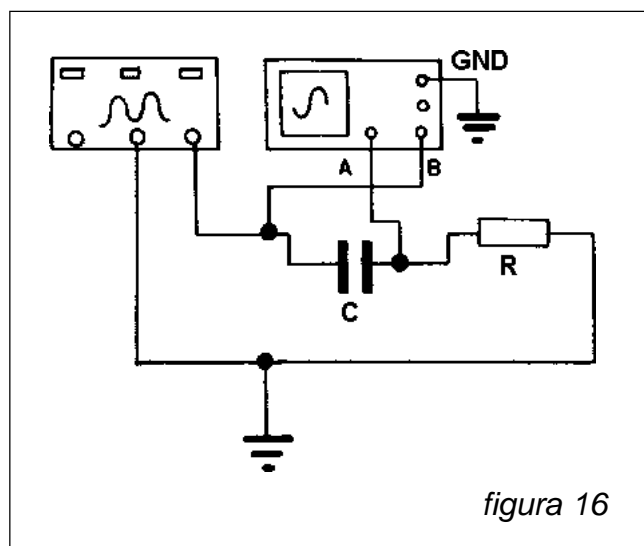


figura 16

muito brusca na tensão entre os terminais do capacitor, essa variação forçará uma mudança também muito brusca na energia nele armazenada, o que se traduz pelo aparecimento de uma corrente muito alta entre seus terminais. Verificamos essa propriedade, por exemplo, ao curto-circuitar os terminais de um capacitor para descarregá-lo. Forçamos com isso a variação muito rápida da tensão entre seus terminais, produzindo assim uma alta corrente que circula de uma placa à outra, provocando inclusive uma faísca no momento de fechar o curto.

Podemos analisar o comportamento do capacitor através da aplicação de uma forma de onda de excitação em tensão, verificando a forma de onda de corrente produzida.

Segundo suas propriedades, o capacitor tem a tendência de se opor a variações bruscas na tensão entre suas placas, respondendo com uma alta corrente entre seus terminais na “tentativa” de manter a tensão armazenada sempre constante.

Por exemplo, vamos submeter um capacitor de 10nF a uma onda quadrada de 5V de pico (10 Vpp), inicialmente com frequência de 10 kHz, e observar a forma de onda da corrente nele produzida.

Para poder monitorar a corrente, novamente associamos em série um resistor de valor muito baixo quando comparado à reatância desse capacitor. Assim, iremos verificar a forma de onda de tensão sobre esse resistor, que terá o mesmo aspecto da forma de onda da corrente que atravessa o circuito. A representação desse experimento é vista na **figura 16**.

Na frequência de 10 kHz em que ajustamos o gerador, o capacitor apresenta uma reatância capacitiva X_C dada pela fórmula (2):

$$X_C = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C) \quad (2)$$

Onde:

$$\pi = 3,14$$

$$f = 10000 = 10 \text{ kHz}$$

$$C = 100 \text{ nF} = 0,1 \mu\text{F}$$

Portanto:

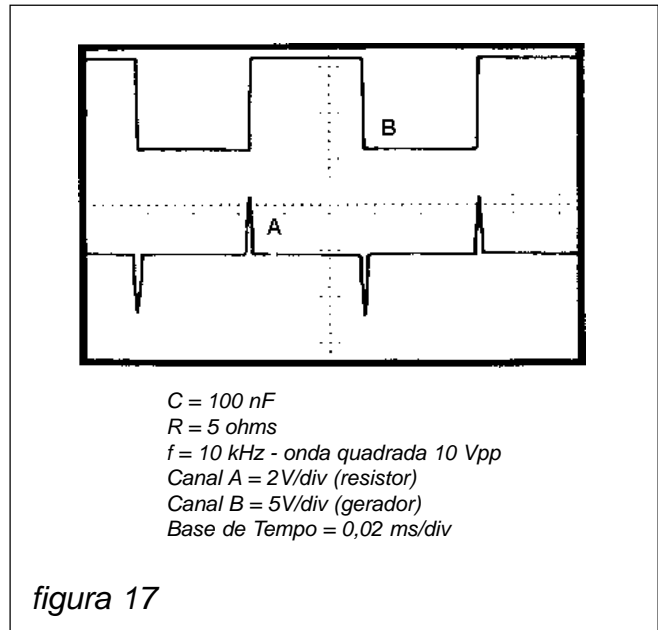
$$X_C = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}) = 159,2 \text{ ohms}$$

Utilizamos para R um valor menor que 5% dessa reatância para não ter participação considerável no comportamento do circuito. Adotamos $R = 5 \text{ ohms}$.

O canal A do osciloscópio recebe a tensão sobre o resistor de monitoração, o que significa que a forma de onda traçada com base nessa informação será proporcional à corrente que atravessa o circuito.

O canal B recebe a tensão do gerador de funções, de modo que a forma de onda traçada será quadrada, correspondendo ao sinal aplicado pelo gerador ao circuito.

Na **figura 17** temos os traçados que devemos obter na tela do osciloscópio. deslocamos os feixes para as ondas não ficarem sobrepostas. A forma de onda da metade da tela para cima corresponde à do canal B, ou seja, do gerador de funções. Da metade da tela para baixo temos a forma de onda da tensão sobre o resistor, que é proporcional à corrente do circuito.



- Quer dizer que o capacitor comporta-se de forma contrária ao indutor, evitando variações rápidas da tensão entre suas placas ?

Isso mesmo. Por isso, nas transições da onda quadrada temos os picos de corrente, e quando a tensão fica constante, não há corrente, resultando em tensão nula no resistor.

- O que aconteceria agora, se dobrássemos a frequência do gerador ?

De imediato, sabemos que a reatância cairá à metade do valor anterior, ou seja, passará de 1592 ohms para 796 ohms, como sugere a equação (2). Conclusão: a corrente no circuito deverá ser dobrada. Realmente, é isso que observamos na tela do osciloscópio pela forma de onda sobre o resistor usado para monitorar essa corrente (**figura 18**).

Mas não é somente dobrando a frequência que podemos diminuir a reatância capacitiva. Se o capacitor for de 200 nF, em vez de 100 nF, a corrente no circuito também será dobrada para a mesma frequência de 10 kHz do gerador.

- E com outras formas de onda, o capacitor também tem o mesmo comportamento ?

Vamos verificar o seu comportamento quando submetido a uma onda triangular - **figura 19**.

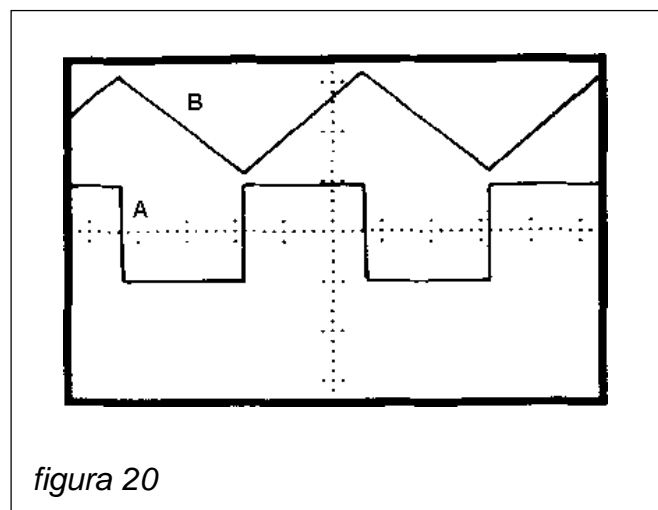
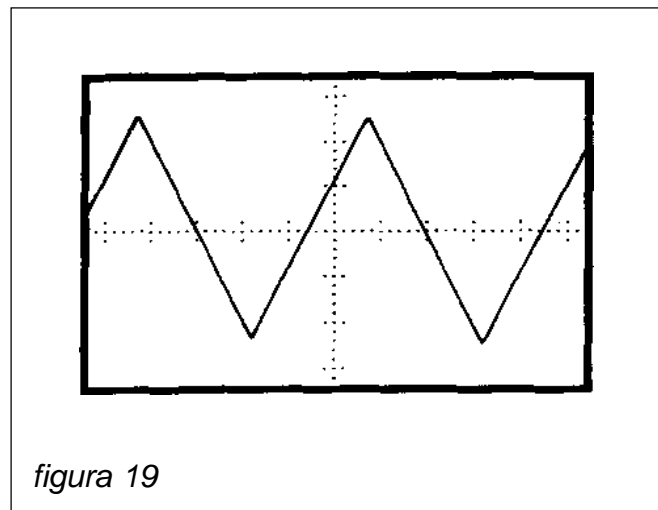
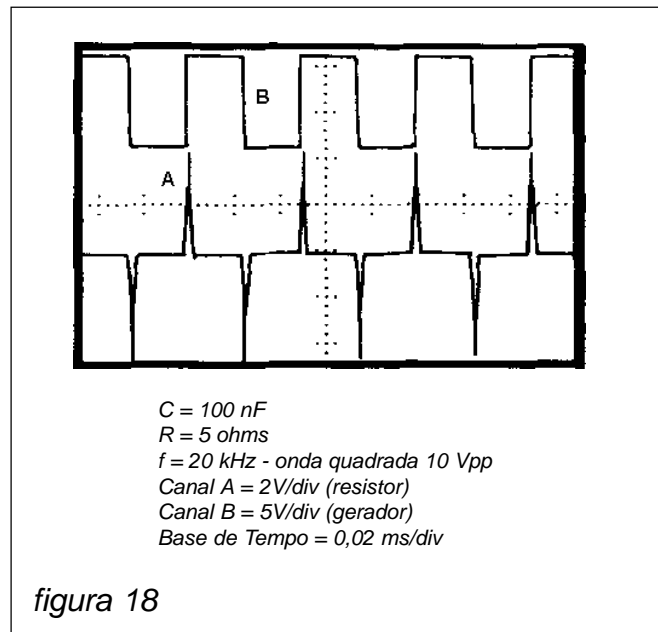
Na onda triangular a tensão instantânea sempre está variando com uma taxa constante, representada pela reta inclinada. Em um semi-ciclo essa variação é crescente - a tensão vai subindo; no outro, ela é decrescente - a tensão vai caindo.

Se a taxa, ou “velocidade” de variação é fixa, a corrente pelo capacitor também será constante. No entanto, ela terá seu sentido alterado, conforme o semi-ciclo da onda triangular.

É o que notamos na **figura 20**. Deslocamos a onda triangular para cima na tela para não se sobrepor à forma de onda de corrente (tensão sobre o resistor).

Verificamos que a corrente ora é positiva e ora é negativa, respectivamente nos semi-ciclos crescente e decrescente da tensão do gerador.

O resultado, portanto, é uma forma de onda quadrada para a corrente no circuito (igual à tensão sobre o resistor).



- Então, à partir de uma onda triangular, com o capacitor eu posso até gerar uma onda quadrada ?

Sim, isso é possível, assim como no circuito RL gera-se uma triangular à partir de uma quadrada, ou seja, o inverso.

Em uma análise matemática mais avançada, dizemos que a corrente no indutor é proporcional à “integral” da tensão a ele aplicada. No capacitor, a corrente é proporcional à “derivada” da tensão que ele recebe.

Integral e derivada são operandos muito utilizados em matemática e engenharia, no entanto, fogem à linha adotada em nosso trabalho.

Para uma análise mais objetiva, podemos dizer que a função matemática representada pela forma de onda de corrente no indutor está sempre um grau acima da função matemática da sua tensão.

Traduzindo: se a forma de onda da tensão sobre o indutor é do tipo $v = k$ (constante), a corrente será do tipo $i = k' \cdot t$ (equação do primeiro grau), ou seja, varia linearmente em função do tempo (assume a forma de uma reta). Da mesma forma, se $v = -k$, então $i = -k' \cdot t$

Isso explica a “transformação” da forma de onda. A onda quadrada nada mais é do que dois trechos constantes (um positivo e outro negativo), originando as correntes respectivamente crescentes e decrescentes em forma de rampas (retas inclinadas), que juntas compõem a onda triangular.

No capacitor, a função matemática representada pela forma de onda de corrente está sempre um grau abaixo da função matemática da sua tensão.

Em outras palavras: se a forma de onda da tensão sobre o indutor é do tipo $v = k \cdot t$ (equação do primeiro grau), a corrente será do tipo $i = k$ (constante). Da mesma forma, se $v = -k \cdot t$, então $i = -k$.

Essas conclusões se aplicam para qualquer grau das funções, como demonstram as **tabelas 1 e 2**.

- E se a excitação for do tipo harmônica, ou seja, senoidal, por exemplo ?

Com uma excitação do tipo harmônica (senoidal ou co-senoidal), a variação da corrente será sempre defasada em relação à variação da tensão, conforme o comportamento do capacitor no sentido de “tentar” evitar variações rápidas na tensão entre suas placas.

Vamos acompanhar o comportamento do mesmo circuito aplicando 5Vpp - 10 kHz senoidais na sua entrada - **figura 21**.

Nesse caso, notamos que no instante em que a forma de onda de tensão cruza o eixo, ou seja, quando ela assume o valor zero, a corrente que atravessa o capacitor é máxima (ponto de pico da forma de onda), tanto positiva como negativamente. Comprovamos portanto que existe realmente a defasagem entre as duas grandezas.

Essa relação mínimo de tensão - máximo de corrente já seria prevista. Devemos lembrar que a

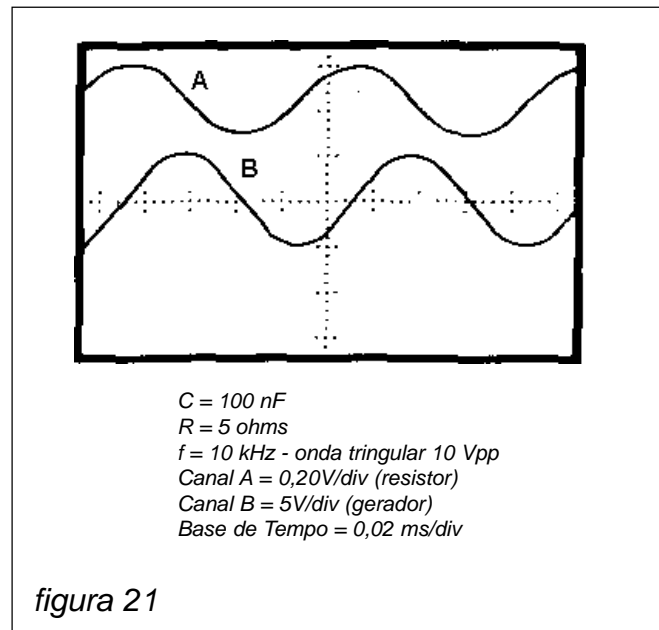


Tabela 1

TENSÃO x CORRENTE NO INDUTOR	
TENSÃO	CORRENTE
constante	1o grau (reta)
1o grau (reta)	2o grau
2o grau	3o grau
sen	-cos
cos	sen

Tabela 2

TENSÃO x CORRENTE NO CAPACITOR	
TENSÃO	CORRENTE
3o grau	2o grau
2o grau	1o grau (reta)
1o grau (reta)	constante
sen	cos
cos	-sen
constante	0

corrente sobre o capacitor aparece em função da “velocidade” de variação da tensão aplicada entre suas placas. À medida que a tensão se aproxima do ponto zero, temos a maior inclinação na curvatura que compõe sua forma de onda, o que equivale à variação mais rápida no valor instantâneo. Quando a tensão é máxima, seja positiva ou negativa, a variação no seu valor instantâneo se dá mais lentamente.

Constatamos isso traçando uma reta tangente imaginária no ponto em que queremos avaliar a taxa de variação do valor instantâneo. Na **figura 22a**, a reta tangente ao ponto P da curva próximo ao eixo horizontal apresenta-se próxima a uma reta vertical, indicando que a grandeza representada pela curva (tensão) varia rapidamente nesses instantes. Já na **figura 22b**, a reta encontra-se quase que na horizontal, demonstrando que nesses instantes de pico a variação do valor instantâneo da tensão é mais lenta.

Como vimos, a uma variação mais rápida da tensão corresponde uma maior corrente atravessando o capacitor, enquanto a uma taxa de variação pequena, teremos associada uma corrente baixa, chegando a zero no ponto de inflexão (inversão do sentido de variação de crescente para decrescente ou vice-versa).

É exatamente isso que demonstra a **figura 21**.

- O que aconteceria se o resistor tivesse um valor significativo quando comparado à reatância capacitiva ?

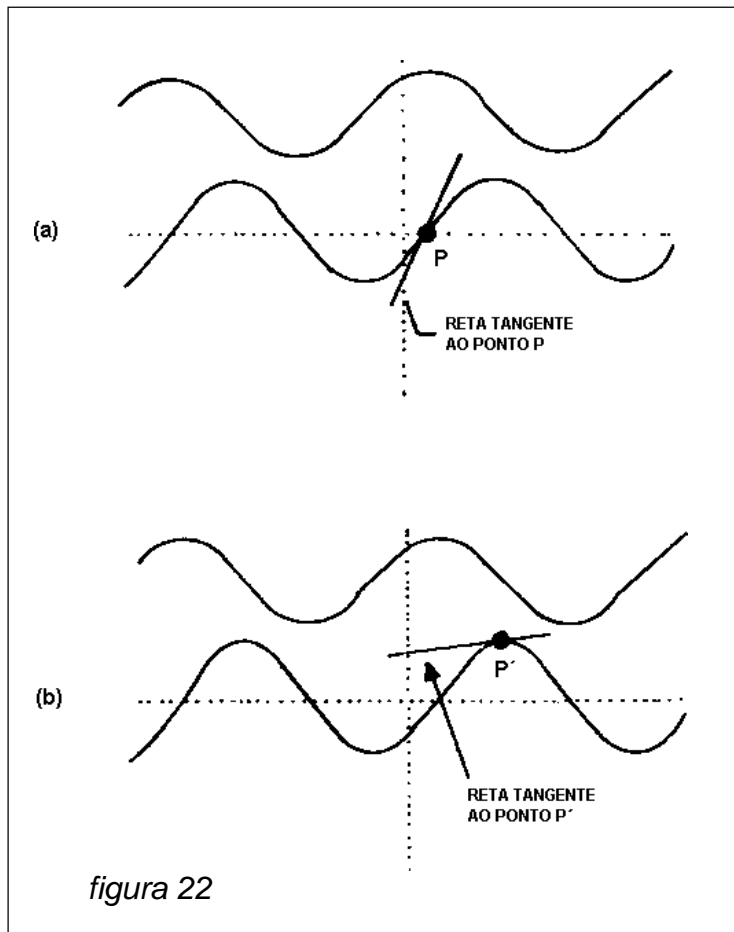
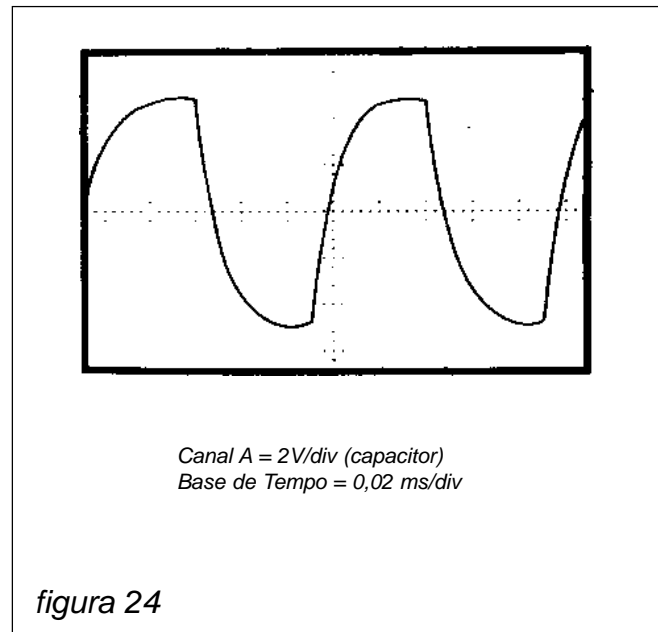
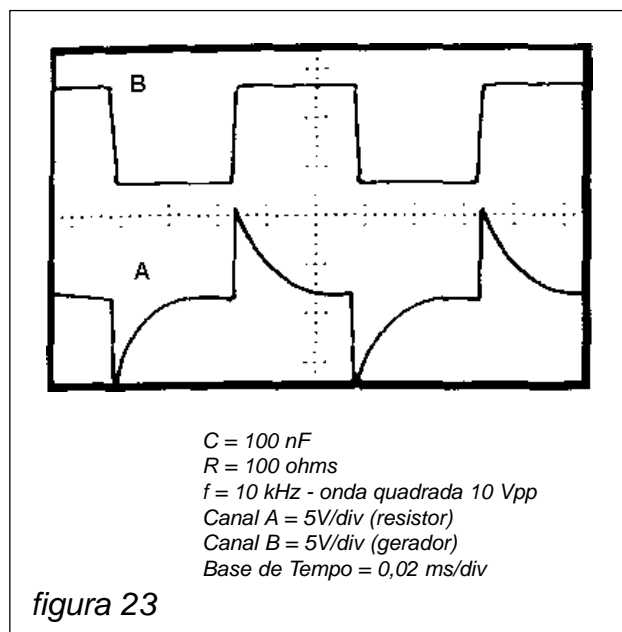


figura 22



Passamos R para 100 ohms. Nesse caso, o circuito passa a ser do tipo RC série, ou seja, deixa de ser apenas um capacitor, e não temos mais sobre o capacitor a exata tensão do gerador, já que essa se divide entre os dois componentes do circuito em série. O mesmo poderíamos dizer se a capacitância fosse menor, em vez da resistência maior. O importante é a comparação X_C versus R.

Vamos analisar as forma de onda no circuito RC (**figura 23**), iniciando pela corrente, comparada à tensão de excitação (onda quadrada do gerador). Deslocamos os feixes para evitar a sobreposição das ondas.

Notamos que a corrente deixa de ter a forma de onda pulsada que tínhamos na **figura 17**, passando a ser exponencial. Lembrando que estamos avaliando essa corrente pela forma de onda de tensão sobre o resistor, notamos no osciloscópio que a onda de tensão no resistor chega aos valores de pico da onda quadrada de excitação, apesar de decair logo em seguida em função do efeito do capacitor.

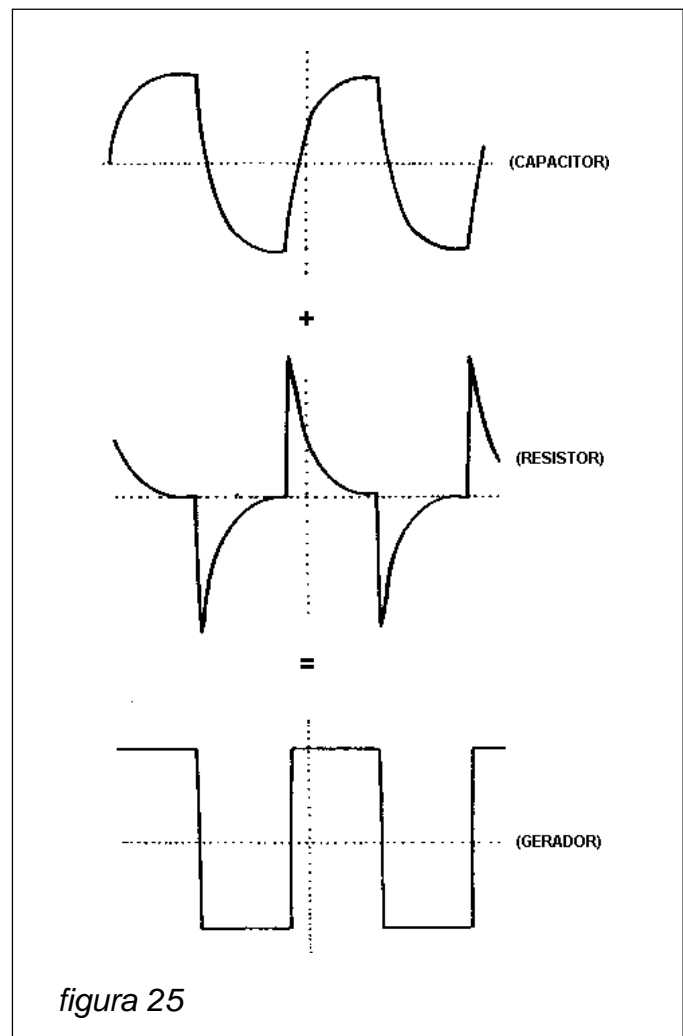
A **figura 24** tem o osciloscópio monitorando a forma de onda sobre o capacitor. Podemos notar que a soma ponto-a-ponto dessa forma de onda com a onda de tensão do resistor resulta exatamente na onda quadrada de excitação (**figura 25**). Aos pontos de máximos da onda sobre o resistor corresponde os pontos de mínimos sobre o capacitor, e vice-versa.

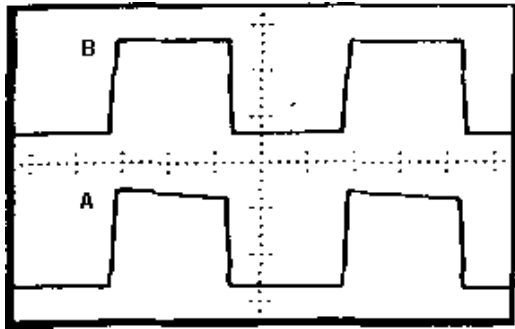
- E se o resistor tiver uma resistência muito maior do que a reatância capacitiva, o capacitor passa a ser desprezível ?

Sim, o circuito como um todo passa a ter o resistor como componente predominante. Vamos comprovar na prática, passando R para 3k ohms, ou seja, quase três vezes maior do que a reatância capacitiva nessa frequência de 10 kHz. Na **figura 26** temos a forma de onda sobre o resistor comparada à do gerador. Para poder visualizar as duas ondas, precisamos deslocar os feixes, deixando a do canal A da metade da tela para baixo e a do canal B da metade para cima, evitando assim a sobreposição.

- Acontece como no indutor, ou seja, as duas formas de onda são praticamente idênticas, mas o capacitor continua atuando, se opondo às variações mais bruscas da tensão aplicada ?

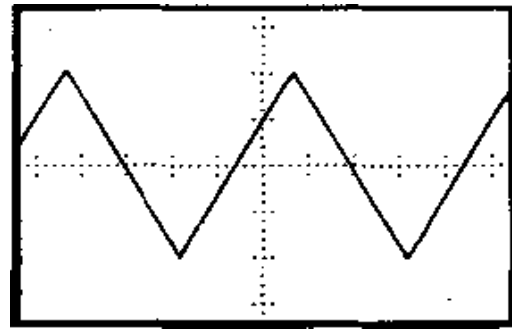
Sim, ele tem o mesmo comportamento, no entanto menos ativo, por ser afetado pelo resistor, que entre outras coisas limita a parcela de tensão entre as placas do capacitor. Assim, sobre o capacitor teremos apenas pequenas variações de tensão que surgem nos instantes em que a onda quadrada do gerador está com tensão constante (partes planas da forma de onda). A **figura 27** traz essa forma de onda, onde podemos notar se tratar de uma onda triangular, com os pontos de máximo da tensão bem abaixo dos picos da onda quadrada de entrada.





$C = 100 \text{ nF}$
 $R = 3 \text{ k ohms}$
 $f = 10 \text{ kHz}$ - onda quadrada 10 Vpp
 Canal A = 5V/div (resistor)
 Canal B = 5V/div (gerador)
 Base de Tempo = 0,02 ms/div

figura 26



Canal A = 0,2V/div (capacitor)
 Base de Tempo = 0,2 ms/div

figura 27

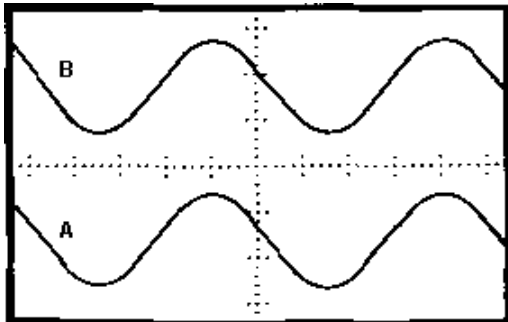
- Interessante, agora a tensão do capacitor passou a ser perfeitamente triangular, ou seja, assumiu uma função do primeiro grau por causa da corrente praticamente constante através do capacitor em cada semi-ciclo, certo ?

Exatamente. Com o resistor de valor muito alto, passamos a forçar a corrente em forma de onda quadrada através do capacitor, e ele reage com uma queda de tensão em forma de onda triangular entre suas placas.

- O que acontece se passarmos o gerador para a forma de onda senoidal nesse circuito com o resistor de 3k ?

Vamos fazer isso e comparar a forma de onda da entrada, ou seja, do gerador, com a do resistor - figura 28.

As formas de onda também são praticamente idênticas, além da defasagem ser muito pequena, justificada pela predominância do efeito resistivo sobre o capacitivo.



$C = 100 \text{ nF}$
 $R = 3 \text{ k ohms}$
 $f = 10 \text{ kHz}$ - onda senoidal - 10 Vpp
 Canal A = 5V/div (resistor)
 Canal B = 5V/div (gerador)
 Base de Tempo = 0,02 ms/div

figura 28

- Essa ligação capacitor com resistor, com a saída sobre o resistor, também não forma um filtro, do tipo passa-altas ?

Forma, mas vamos dedicar o próximo capítulo para estudar os filtros RC e RL.

CAPÍTULO 2

FILTROS PASSIVOS

Sabemos que o resistor opõem-se à passagem da corrente elétrica, seja ela contínua ou alternada.

O indutor, como verificamos no capítulo anterior, também exerce uma oposição, mas não simplesmente à corrente, e sim à sua variação, ou seja, se não houver variação na intensidade da corrente, não haverá a reação (reatância indutiva). Em outras palavras, a tensão nos terminais de um indutor é proporcional à frequência da corrente alternada.

Já o capacitor exerce uma oposição à variação da tensão entre seus terminais. Sua reação (reatância capacitiva) diminui à medida que a frequência da corrente alternada aumenta. Portanto, a tensão nos terminais do capacitor é inversamente proporcional à frequência da corrente alternada.

Os filtros passivos são formados pela combinação de resistores, indutores e capacitores, aproveitando suas propriedades em função da frequência, facilitando ou dificultando a passagem da corrente ou desviando-a do circuito.

Circuitos que combinam resistores, capacitores e indutores são denominados circuitos RLC.

- Mas quais são as formas de interligarmos esses componentes para formarem os filtros ?

Em relação à faixa de passagem, os filtros são classificados em quatro tipos, a saber:

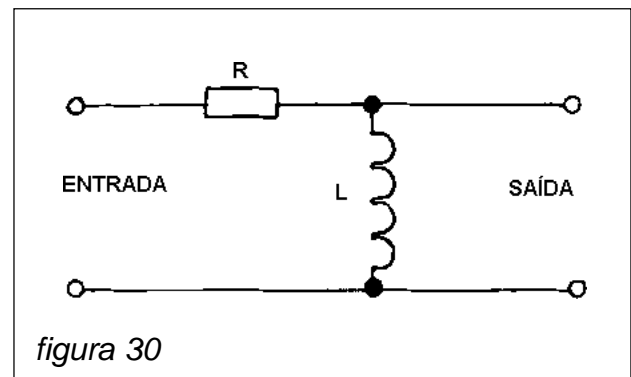
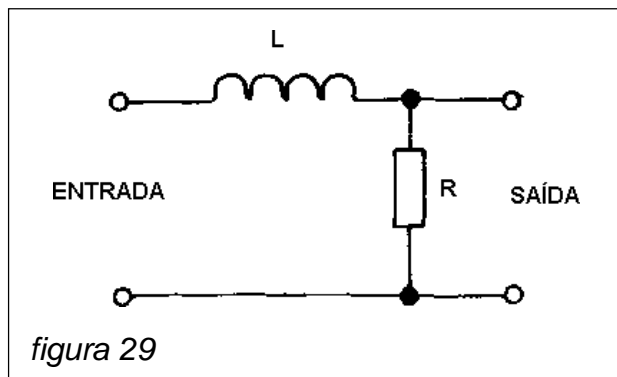
- Filtro Passa-Baixas (FPB) ou Low Pass Filter (LPF, do inglês)
- Filtro Passa-Altas (FPA) ou High Pass Filter (HPF, do inglês)
- Filtro Passa-Faixa (FPF) ou Band Pass Filter (BPF, do inglês)
- Filtro Rejeita-Faixa (FRF) ou Band Reject Filter (BRF, do inglês)

Vamos demonstrar a seguir como interligar os componentes na formação desses filtros.

FILTRO RL

Já vimos a associação série de indutor + resistor e de capacitor + resistor. Essa associação série é uma das formas de montarmos um filtro.

Estudamos que o indutor impede variações rápidas da corrente, ou seja, atua bloqueando a corrente alternada, se opondo mais intensamente quanto maior a frequência dessa corrente. Portanto, o circuito da **figura 29** forma um filtro passa-baixas. Quanto menor a frequência, maior a amplitude do sinal na saída (sobre o resistor).



Se invertermos a posição dos componentes, com o indutor do lado da saída, o filtro passará a ser do tipo passa-altas (**figura 30**). O indutor se comportará como um curto-circuito para as frequências baixas devido à sua pequena reatância indutiva, enquanto que nas frequências mais altas, ele apresentará maior reatância, aumentando o nível de sinal na saída. Assim, quanto maior a frequência, maior a amplitude do sinal de saída (sobre o indutor).

Conclusões: o filtro é chamado de passa-baixas quando favorece a passagem de frequências baixas e se opõe à passagem de frequências mais altas; analogamente, o filtro é chamado de passa-altas quando favorece a passagem de frequências altas e se opõe à passagem de frequências mais baixas. Esse comportamento é válido para qualquer tipo de filtro eletrônico, seja ele passivo ou ativo, com capacitores, indutores, ou mesmo sem esses componentes.

- Quer dizer que o filtro passa-baixas permite a passagem de frequências abaixo de um determinado valor, enquanto o filtro passa-altas só deixa passar frequências acima de um certo valor ?

Não exatamente. Devemos lembrar, por exemplo, que a bobina apresenta uma oposição proporcional à frequência da corrente alternada. Ela começa nula com a corrente contínua, aumentando à medida que a frequência também sobe.

Por isso, não existe um limite definido para que se possa dizer: no filtro passa-baixas até essa frequência passa e acima dela não passa; ou então: no filtro passa-altas acima dessa frequência passa e abaixo dela não.

O que se define é a frequência de corte, que é a frequência à partir da qual o sinal de saída do filtro (sobre a carga) fica abaixo de 70% do nível máximo, ou seja: $e_s = e_{smáx} / \sqrt{2} = 0,707 \cdot e_{smáx}$.

O filtro passa-baixas RL apresenta uma relação de tensão de -6 dB por oitava. Isto significa que o sinal de saída, em tensão, cai para a metade toda vez que a frequência aumenta de uma oitava (dobra) a partir da frequência de corte.

No filtro passa-altas a relação é de +6 dB/oitava, observada a cada oitava que a frequência do sinal aumenta, válida antes da frequência de corte.

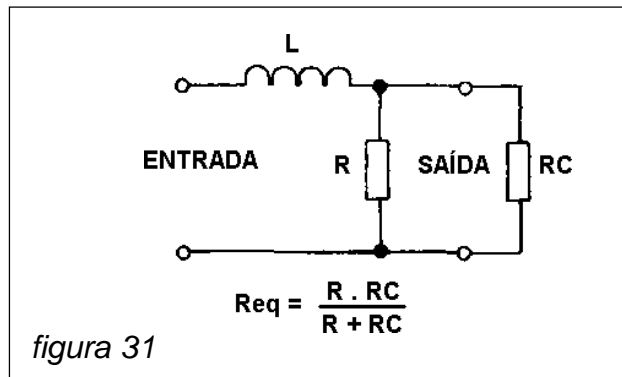
O valor 0,707 corresponde a -3 dB ($= 20 \log 0,707$). Portanto, também dizemos que a frequência de corte é aquela em que a tensão de saída (nível do sinal) cai de 3 dB em relação ao valor inicial (valor máximo na saída, longe da frequência de corte).

Podemos determinar a frequência de corte do filtro RL utilizando a fórmula (3):

$$f_c = R / (2 \cdot \pi \cdot L) \quad (3)$$

Onde:

- f_c = frequência de corte
- R = resistência do filtro em ohms
- L = indutância da bobina, em henrys
- $\pi = 3,14$ (constante)



Essa equação é utilizada tanto para o cálculo da frequência de corte do filtro passa-baixas (**figura 29**) como do passa-altas (**figura 30**) do tipo RL série.

Vale ressaltarmos que no caso do resistor R não ser a própria carga do circuito, sendo ligada à saída do filtro uma carga R_c (**figura 31**), o valor de R na fórmula deverá ser o equivalente à associação paralela dos resistores.

FILTRO RC

O capacitor impede variações rápidas da tensão entre seus terminais, ou seja, não se opõe à corrente

alternada. Quanto maior a frequência dessa corrente, menor a oposição oferecida pelo capacitor (menor sua reatância). Portanto, o circuito da **figura 32** forma um filtro passa-altas. Quanto maior a frequência, maior a amplitude do sinal na saída (sobre o resistor).

Se invertermos a posição dos componentes, com o capacitor do lado da saída, o filtro passará a ser do tipo passa-baixas (**figura 33**). Nas frequências mais altas, o capacitor apresentará menor reatância, reduzindo o nível de sinal na saída, enquanto nas baixas frequências ele se comportará como um circuito aberto, devido à sua alta reatância capacitiva. Assim, quanto menor a frequência, maior a amplitude do sinal de saída (sobre o capacitor).

Como acontece no filtro RL, não existe um limite definido para que se possa dizer: no filtro passa-baixas RC até essa frequência passa e acima dela não passa; ou então: no filtro passa-altas RC acima dessa frequência passa e abaixo dela não.

Vale a mesma definição dos 70% para a determinação da frequência de corte.

O filtro passa-baixas RC também apresenta uma relação de tensão de -6 dB por oitava, ou seja, o sinal de saída, em tensão, cai para a metade toda vez que a frequência aumenta de uma oitava (dobra) à partir da frequência de corte.

No filtro passa-altas a relação é de +6 dB/oitava, ou seja, o nível de sinal na saída dobra quando a frequência também é dobrada, sendo válida para as frequências antes da frequência de corte.

A frequência de corte, em que a tensão de saída (nível do sinal) cai de 3 dB em relação ao valor inicial pode ser determinada utilizando a fórmula (4):

$$f_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R \cdot C) \quad (4)$$

Onde:

f_c = frequência de corte, em hertz
 R = resistência do filtro, em ohms
 C = capacitância do filtro, em farad
 π = 3,14 (constante)

Novamente, lembramos que no caso da ligação de uma carga R_c na saída do filtro, o valor de R na fórmula deverá ser a resistência equivalente da associação paralela dos resistores, como comentamos para o filtro RL.

Pela fórmula, não podemos dizer se o filtro calculado é do tipo passa-baixas ou passa-altas, já que a mesma é utilizada tanto para o cálculo da frequência de corte do filtro passa-baixas (**figura 33**) como do passa-altas (**figura 32**) do tipo RC série. O que determina o tipo de filtro, como vimos, é o posicionamento do capacitor.

- Mas e se o filtro estiver blindado em uma “caixa preta”. Como vou saber qual o seu tipo sem poder identificar o posicionamento dos seus componentes ?

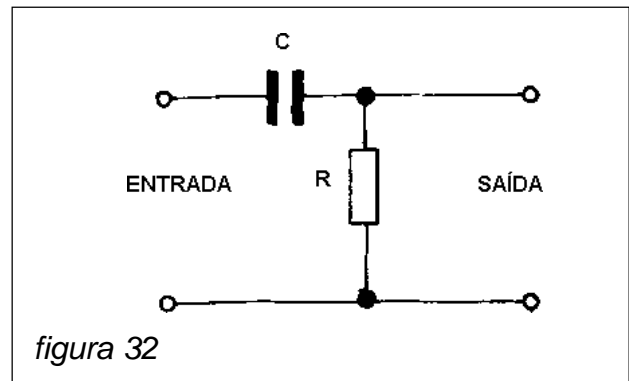


figura 32

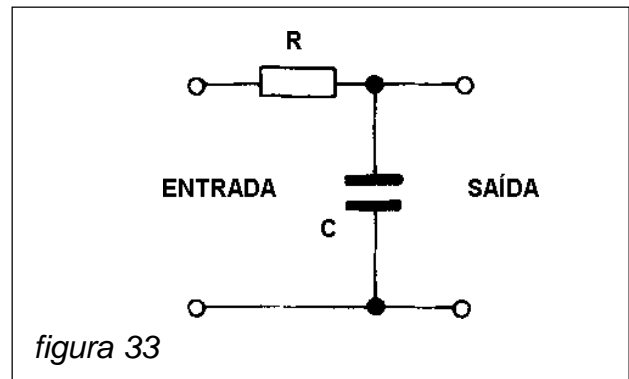


figura 33

CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Para determinarmos se o filtro é do tipo passa-baixas ou passa-altas podemos submetê-lo a um teste no laboratório, fazendo o que chamamos de “levantamento da sua curva de resposta em frequência”.

Esse levantamento consiste em variar a frequência do sinal aplicado à entrada do filtro e, para cada valor, medir o nível de sinal na sua saída. Dessa forma, poderemos determinar o seu comportamento: se à medida que aumentamos a frequência o nível de sinal da saída cai, estamos diante de um filtro passa-baixas; por outro lado, se aumentando a frequência do gerador ligado à entrada, o nível do sinal na saída também aumenta, o circuito sob análise é do tipo passa-altas.

A representação gráfica do comportamento do circuito, em relação à variação da frequência, é chamada de “curva de resposta”.

Para um circuito passa-baixas ideal (que na prática não existe), a curva de resposta seria como demonstrado na **figura 34a** - uma reta horizontal desde a frequência zero até a frequência de corte, com o nível do sinal de saída igual ao nível do sinal de entrada, ou seja, $es/ei = 1$; a partir da frequência de corte, o nível de sinal na saída seria zerado, ou seja, qualquer frequência imediatamente acima da frequência de corte não passaria pelo filtro.

Estudamos que esse comportamento na prática não existe, já que o filtro real apresenta uma transição gradual na região da frequência de corte, como representado pelo gráfico da **figura 34b**.

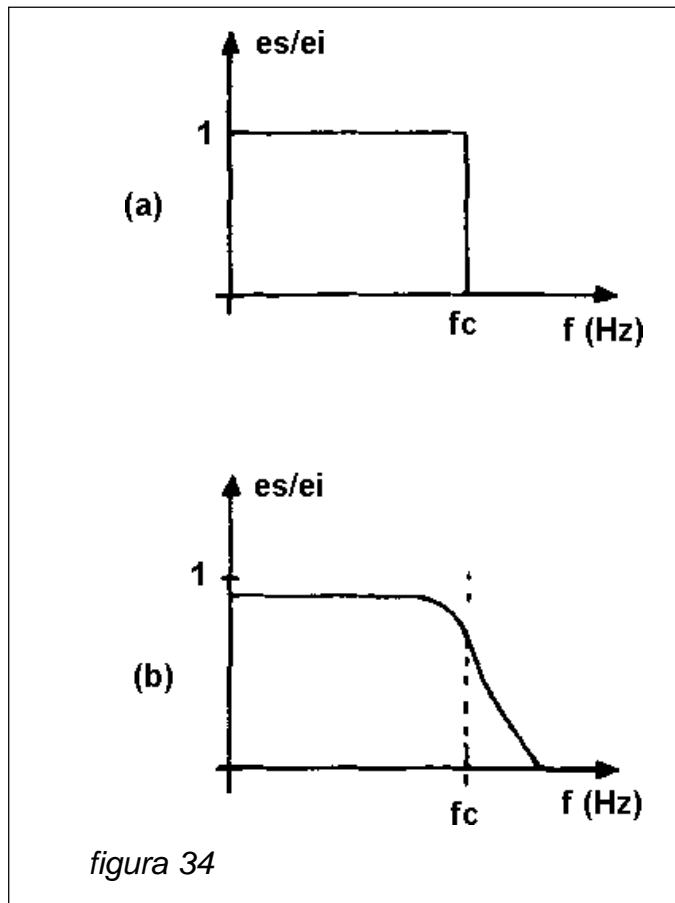


figura 34

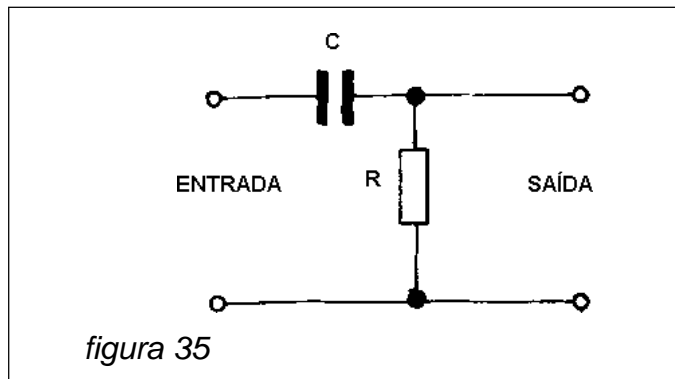


figura 35

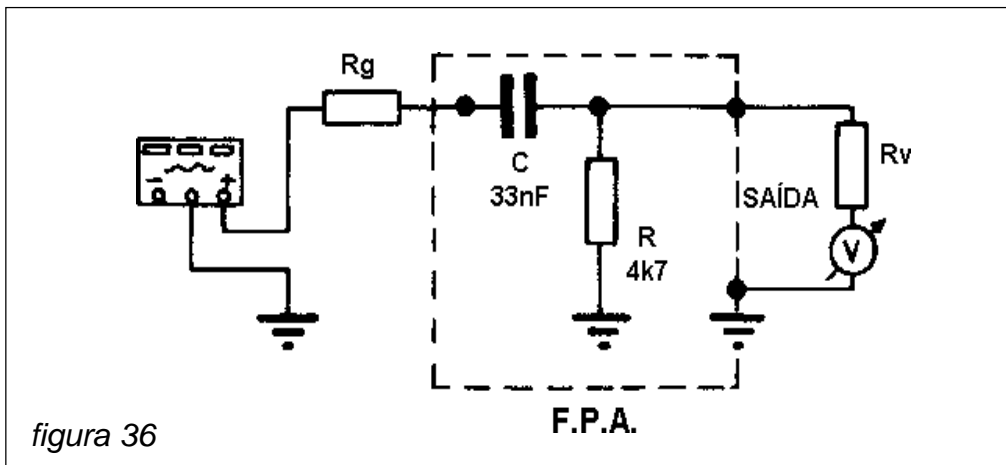


figura 36

A título de exemplo, vamos considerar que se queira levantar a curva de resposta do circuito da **figura 35**.

Conforme a disposição dos componentes desse circuito, já sabemos tratar-se de um filtro passa-altas, mas esse conhecimento não é relevante, pois poderíamos estar submetendo uma “caixa preta” à experiência.

Para esse levantamento, devemos montar o arranjo demonstrado na **figura 36**.

Nessa figura, consideramos participantes do circuito a resistência interna do gerador (que deve ser muito baixa) e a resistência interna do voltímetro (que deve ser muito elevada).

Para desencadear esse experimento, devemos garantir que o nível de sinal na entrada do circuito (saída do gerador) seja sempre constante, para qualquer frequência aplicada. Por isso, é importante medir a tensão de saída do gerador sempre que se variar sua frequência, seja com um segundo voltímetro AC, ou com o mesmo utilizado para medir a tensão de saída.

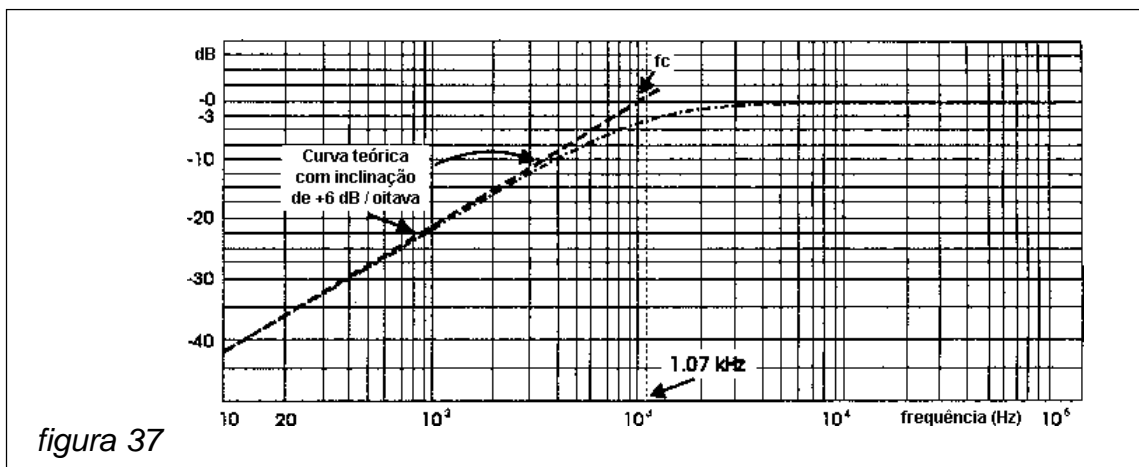
Vamos supor que o gerador seja ajustado em 200 mV. Esse ajuste não deve ser “a frio”, e sim apenas depois de passados cerca de 15 minutos que o instrumento foi ligado. Esse tempo é para o pré-aquecimento, assumindo o regime estável de funcionamento, garantindo-se assim que o valor ajustado não sofra alterações devido a variações de temperatura.

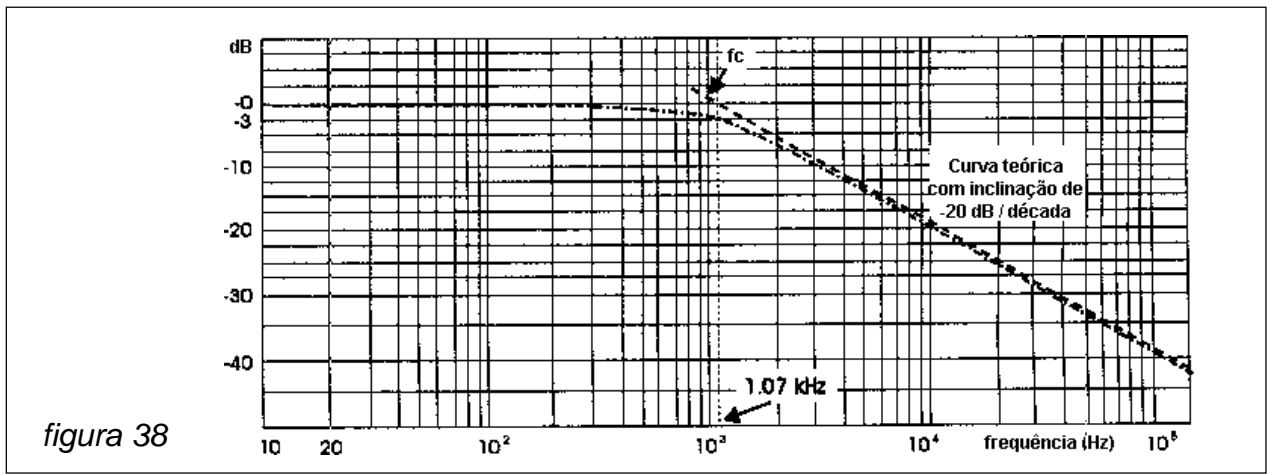
Partindo de uma frequência bem baixa (10 Hz, por exemplo), vamos verificar o nível de sinal (tensão) da saída à medida que aumentamos a frequência do gerador, anotando as leituras correspondentes em uma tabela (**tabela 3**).

Nessa tabela, reservamos uma coluna para a relação $es/esmáx$ e para o logaritmo de base dez correspondente à mesma. Fizemos isso porque, na prática, não traçamos o gráfico com as relações de tensões no eixo vertical (ordenadas) e sim com os valores correspondentes em dB. A última coluna da direita traz o valor em dB correspondente à relação de tensões da terceira coluna, sendo a mesma calculada

ei = 200 mVrms				
f(Hz)	es (mV)	es/esmáx	log	dB
10	2,0	0,01	-2	-40
50	9,8	0,05	-1,3	-26
100	19,5	0,10	-1	-20
200	28	0,19	-0,72	-14,4
300	56	0,28	-0,55	-11
400	73	0,37	-0,43	-8,6
500	88	0,45	-0,35	-7,0
600	101	0,51	-0,29	-5,8
700	112	0,57	-0,24	-4,8
800	123	0,62	-0,21	-4,2
1000	177	0,90	-0,05	-1,0
2000	177	0,90	-0,05	-1,0
4000	192	0,98	-0,009	-0,18
6000	195	0,99	-0,0044	-0,087
8000	196	0,99	0,004	-0,08
10000	197	1,00	0	0

Tabela 3





pela equação (5).

$$G \text{ (dB)} = 20 \log \frac{e_s}{e_{s\text{máx}}} \quad (5)$$

Com os dados da **tabela 3**, traça-se a curva de resposta em uma folha de papel mono-log (**figura 37**). O papel monolog é um papel com uma das escalas calibrada linearmente (eixo das ordenadas - vertical) e a outra calibrada logarithmicamente (eixo das abscissas - horizontal). A escala logarithmica possibilita a representação de uma ampla variação de valores, demandando pouco espaço para isso, o que não seria possível na escala linear (mono)

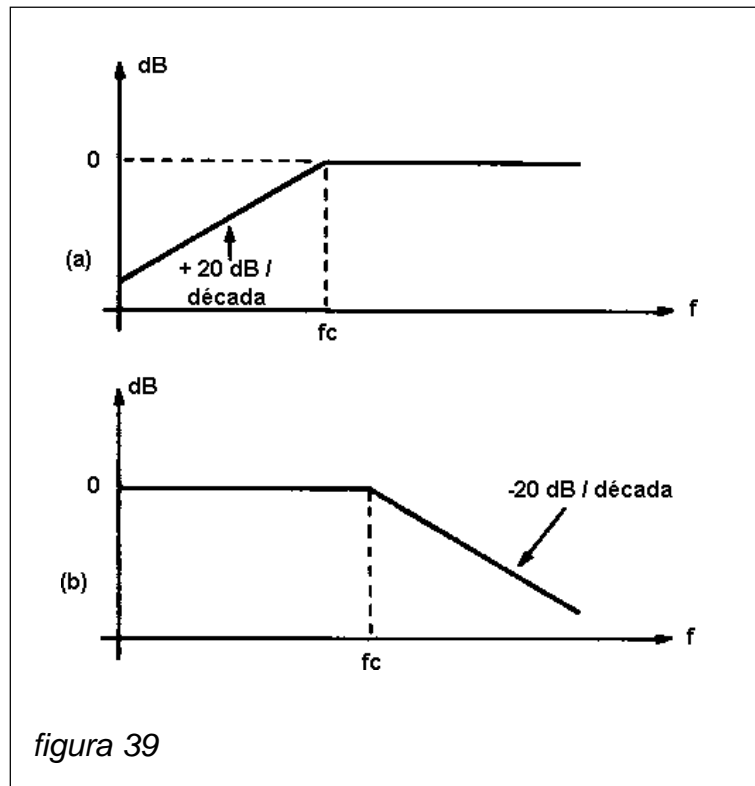
O gráfico obtido é chamado de diagrama de Bode do ganho de tensão. A escala horizontal marcada em décadas resultou em uma linha reta no traçado do comportamento do circuito antes da frequência de corte. Observando essa reta, notamos que ela indica que o ganho de tensão em decibel do circuito aumenta em 20 dB a cada década de aumento da frequência do sinal. Portanto, dizemos que essa reta tem uma inclinação de 20 dB por década.

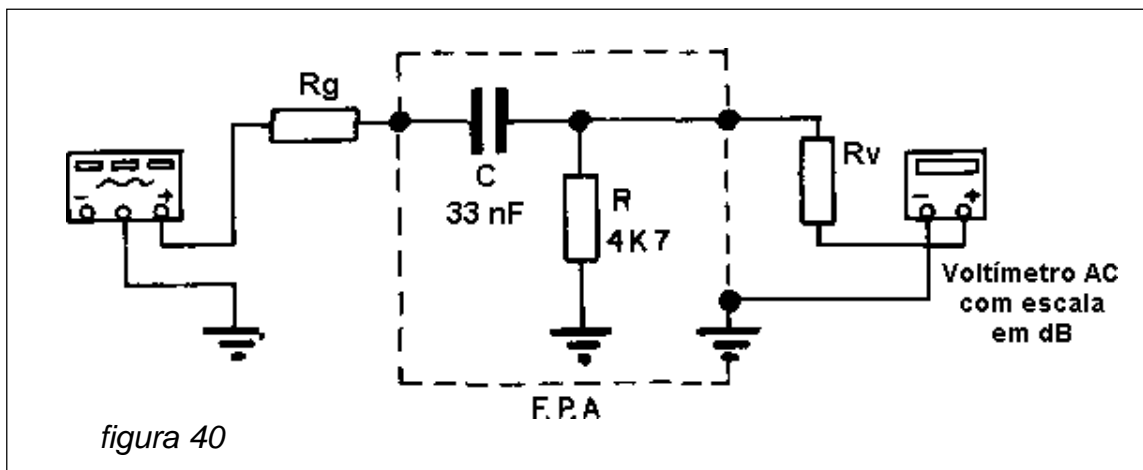
Se o filtro fosse do tipo passa-baixas, o gráfico obtido seria como o demonstrado na **figura 38**, onde acima da frequência de corte teríamos a reta com inclinação de -20 dB por década.

Em um traçado preliminar ideal do diagrama de Bode, em uma primeira aproximação despreziaríamos os -3dB da frequência de corte e desenharíamos uma reta com inclinação de +20 dB por década para um filtro passa-altas e -20 dB por década para um filtro passa-baixas, como demonstramos respectivamente nas **figura 39a e 39b**.

Ainda observando essas retas, notamos que há uma variação de 6dB para cada oitava, lembrando que uma oitava é um fator de 2 na frequência, ou seja, se a frequência variar de 200 para 400 Hz, ela variou de uma oitava. Analogamente, se variar de 200 para 800 Hz, representa duas oitavas, e assim sucessivamente.

Assim, no filtro passa-altas, antes





da frequência de corte a variação do ganho de tensão em decibel é de +6 dB a cada oitava. Já no filtro passa-baixas, o ganho em decibel cai em -6 dB por oitava.

Na indústria, utiliza-se as duas taxas de variação: 20 dB por década e 6 dB por oitava, lembrando que essas taxas são verificadas tanto em filtros passivos RC como em filtros RL.

- Certo, já entendi como faço o levantamento da curva de resposta, mas que trabalhão, hein !? Não tem uma forma mais fácil ?

Isso depende do instrumento que você tem disponível. Com um voltímetro apresentando uma escala já calibrada em dB, podemos economizar alguns passos para o traçado da curva de resposta em frequência: podemos abandonar as colunas 2, 3 e 4 da **tabela 3**. Vejamos como fazer isso no exemplo da **figura 40**.

Para ficar mais cômodo, previamente procuramos a frequência (ou faixa de frequências) onde o nível de saída seja máximo, ajustando nesse ponto o nível do gerador de modo que no milivoltímetro a indicação seja de zero dB (775 mV).

Agora, fazemos a varredura de frequência como antes, partindo de 10 Hz, mas com a facilidade de termos no voltímetro diretamente a indicação em dB, possibilitando a construção da **tabela 4**, que obviamente é idêntica à **tabela 3**, apenas dispensando as colunas intermediárias.

Traçando a curva com esta tabela, obviamente, obteremos o mesmo resultado ilustrado na **figura 37**.

- Ok, vimos os filtros utilizando resistor + capacitor e resistor + indutor, mas não existem também filtros utilizando capacitor+indutor ?

Sim, são os chamados filtros LC, que, em conjunto com a carga, nada mais são do que uma combinação dos filtros RL e RC. Vamos analisar.

FILTRO LC

ei = 200 mVrms		
f(Hz)	es (mV)	dB
10	2,0	-40
50	9,8	-26
100	19,5	-20
200	28	-14,4
300	56	-11
400	73	-8,6
500	88	-7,0
600	101	-5,8
700	112	-4,8
800	123	-4,2
1000	177	-1,0
2000	177	-1,0
4000	192	-0,18
6000	195	-0,087
8000	196	-0,08
10000	197	0

Tabela 4

Segundo suas propriedades, um indutor combinado com um capacitor também pode formar um circuito de filtragem, tanto passa-baixas (**figura 41a**) como passa-altas (**figura 41b**), sendo que o posicionamento dos componentes é que define o tipo de filtro.

Estudamos que os filtros RL e RC apresentam a característica de uma variação linear de 6dB por oitava (= 20 dB por década) no ganho de tensão. Como no filtro LC eles estão combinados, essa variação do ganho de tensão é mais acentuada, sendo de 12 dB por oitava (= 40 dB por década).

A frequência de corte continua respeitando a definição, sendo aquela em que a saída diminui de 3 dB, ou seja, o nível de sinal (tensão) equivale a cerca de 70% do valor máximo inicial.

A frequência de corte de um filtro LC pode ser determinada pela fórmula (6).

$$f_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}) \quad (6)$$

Onde:

f_c = frequência de corte, em hertz
 L = indutância do filtro, em henry
 C = capacitância do filtro, em farad
 π = 3,14 (constante)

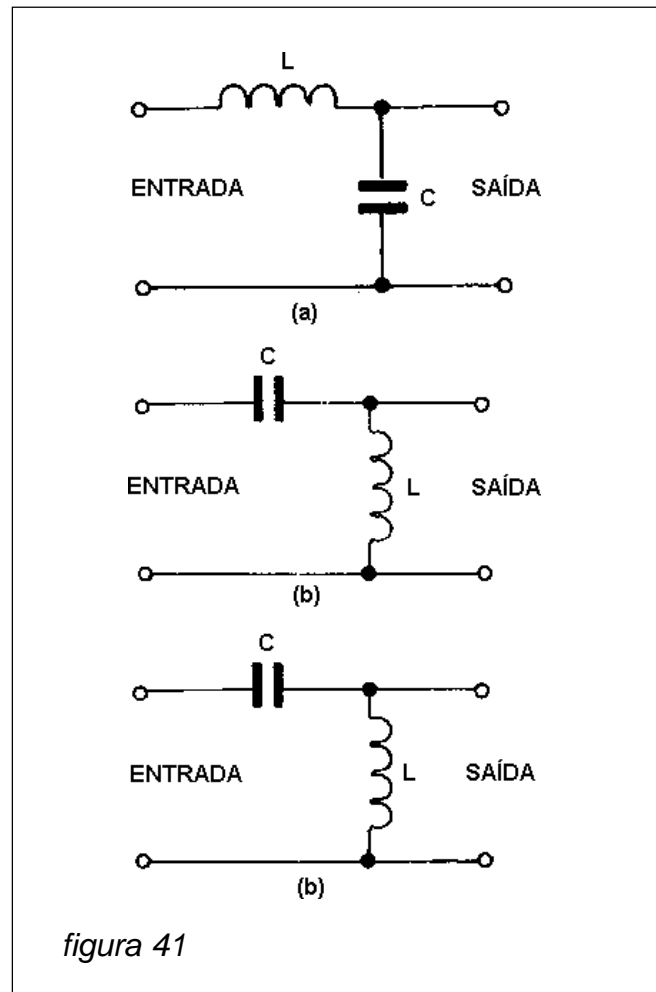


figura 41

Para o melhor desempenho do filtro LC, é conveniente escolher os valores de L e C conforme a resistência de carga que será ligada à saída, utilizando-se das fórmulas (7) e (8).

$$L = R_c / (2 \cdot \pi \cdot f_c) \quad (7)$$

$$C = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot R_c) \quad (8)$$

Onde R_c é a resistência de carga

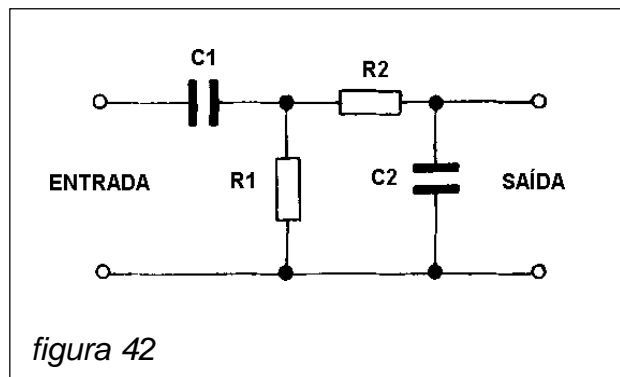


figura 42

- E os outros filtros, passa-faixa e rejeita-faixa, como eu monto ?

Se pensarmos nos filtros que estudamos como blocos, podemos produzir os filtros passa-faixa e rejeita-faixa combinando-os em cascata (em série), em paralelo, ou em outras configurações especiais.

FILTRO PASSA-FAIXA

Combinando um filtro passa-altas com um passa-baixas formamos um filtro passa-faixa, de modo que na saída teremos apenas uma faixa de frequência selecionada pelo filtro.

Essa combinação pode ser como a demonstrada na **figura 42**, onde C1 e R1 constituem o filtro passa-altas e R2 e C2 o filtro passa-baixas.

Para que não haja muita influência do segundo filtro sobre a frequência de corte do primeiro, devemos ter R2 muito maior do que R1, quando então poderemos utilizar as fórmulas (9) e (10) para determinar as duas frequências de corte, chamadas de fci = frequência de corte inferior, e fcs = frequência de corte superior.

A frequência de corte inferior é imposta pelo filtro passa-altas (fórmula 9) e a frequência de corte superior pelo passa-baixas (fórmula 10).

$$f_{ci} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C1) \quad (9)$$

$$f_{cs} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C2) \quad (10)$$

A curva de resposta em frequência desse filtro seria como a demonstrada na **figura 43**.

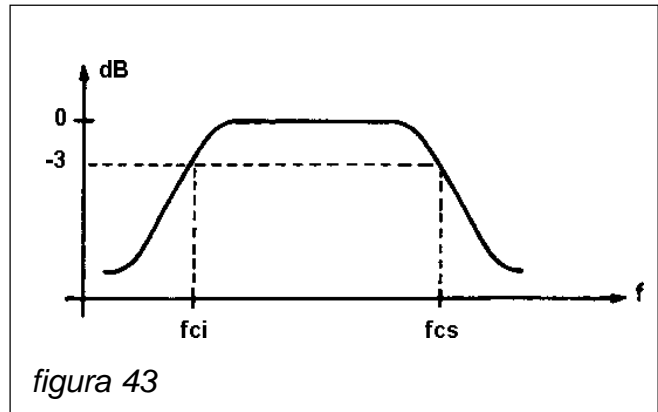


figura 43

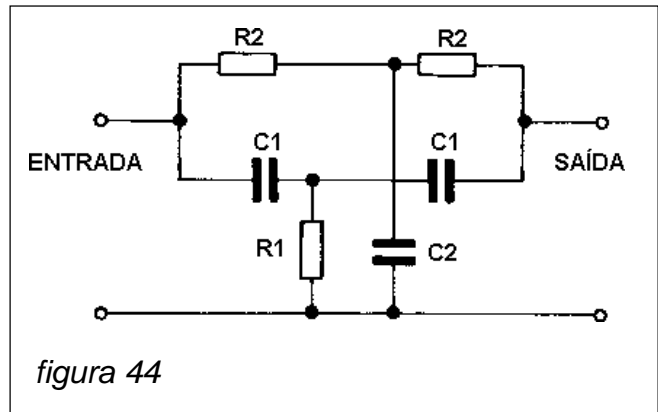


figura 44

FILTRO REJEITA-FAIXA

Enquanto o filtro passa-faixa seleciona apenas uma faixa de frequências que pode chegar à sua saída, o filtro rejeita-faixa faz o inverso, ou seja, ele determina uma faixa de frequências que não pode passar para a saída. As frequências fora dessa faixa, tanto abaixo como acima, não são bloqueadas pelo filtro.

Um arranjo possível para se formar um filtro rejeita-faixa pode ser visto na **figura 44**. Trata-se de uma combinação chamada "duplo T" - devido ao posicionamento dos componentes lembrarem duas letras T.

Seu funcionamento depende, naturalmente, do comportamento dos capacitores C1 e C2.

Nas frequências baixas, os capacitores apresentam uma reatância capacitiva muito elevada, de modo que o circuito pode ser resumido ao mostrado na **figura 45a**, ou seja, apenas os dois resistores R2 no caminho do sinal.

Nas frequências altas, a reatância capacitiva dos capacitores C1 será muito baixa, de modo que o circuito se resume ao da **figura 45b**.

As frequências intermediárias não poderão passar; serão bloqueadas nos capacitores C1 (com reatância capacitiva alta) ou desviadas em C2 (com reatância capacitiva baixa).

Fazendo $R2 = 2R1$ e $C2 = 2C1$, a máxima rejeição ocorrerá na frequência calculada pela fórmula (11).

$$f_0 = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C2) \quad (10)$$

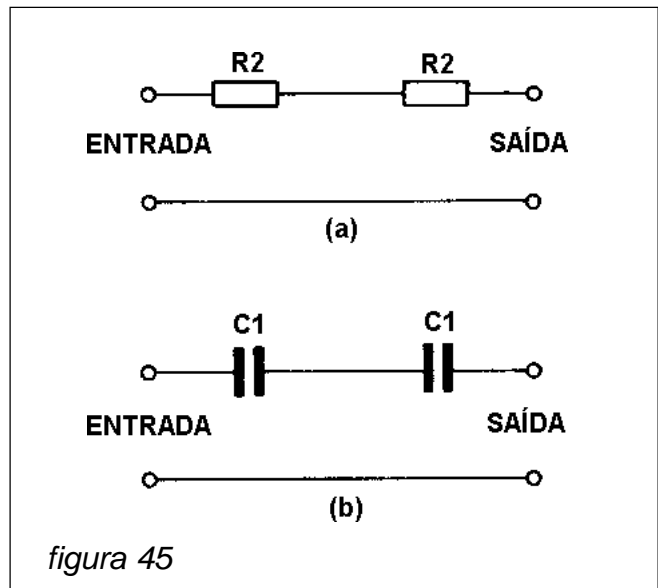


figura 45

Para que o filtro funcione a contento, R_2 também deve ser muito menor do que R_c .

- Também posso levantar a curva de resposta em frequência desses filtros, certo ?

Claro que sim. A curva de resposta pode ser determinada para qualquer circuito, mesmo sem sabermos previamente qual o tipo de comportamento esperado. O conhecimento prévio apenas auxilia na determinação das frequências a serem injetadas na entrada e na previsão dos resultados que obteremos.

CAPÍTULO 3

DIODOS

A JUNÇÃO PN

Sabemos que os condutores possuem elétrons livres em grande quantidade, que são os elétrons fracamente ligados ao núcleo e que se locomovem quando submetidos a uma diferença de potencial.

Já nos isolantes os elétrons estão fortemente presos em suas ligações, evitando assim a circulação de corrente elétrica.

São exemplos de condutores a prata, o ouro e o cobre, entre diversos outros. Como isolantes, temos a borracha, a mica, a porcelana, etc..

Os semicondutores são elementos intermediários, cuja resistência situa-se entre a dos condutores e dos isolantes, sendo o silício (Si) o mais utilizado na construção dos componentes eletrônicos, apresentando-se sob a forma cristalina quando puro.

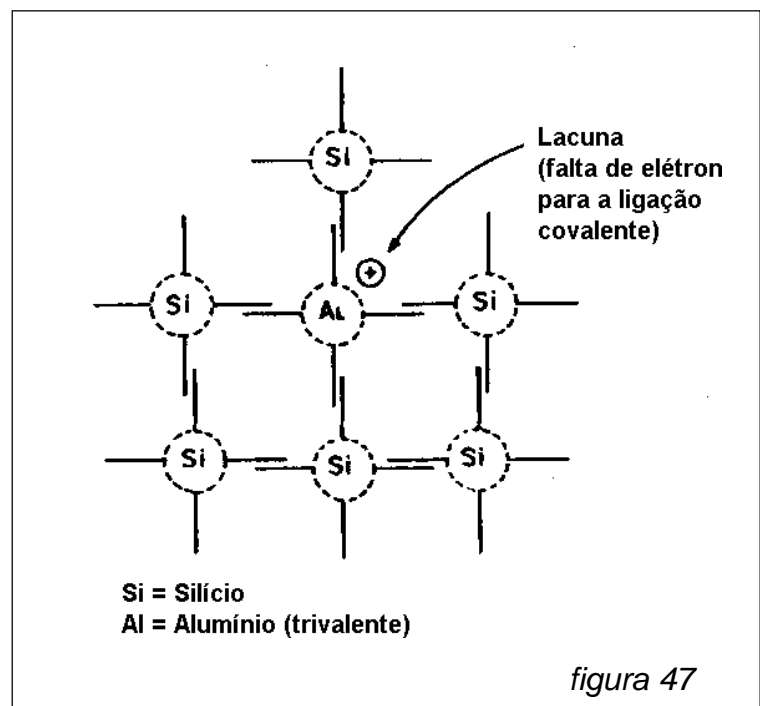
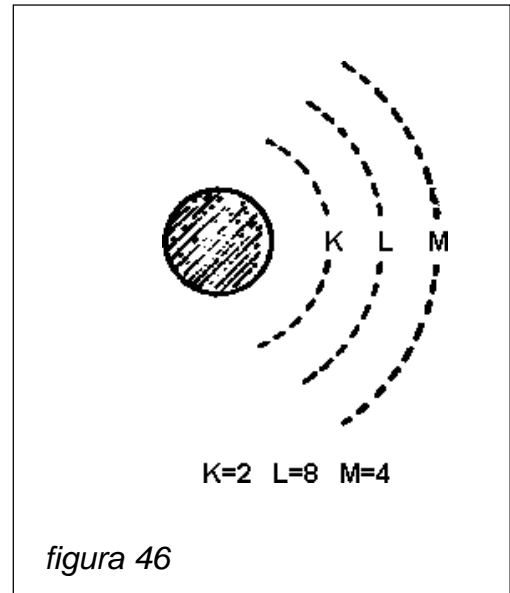
A **figura 46** demonstra a estrutura atômica do silício, onde notamos que ele possui 4 elétrons na última camada (camada de valência), sendo portanto chamado de tetravalente.

Na estrutura cristalina, cada átomo de silício se combina com outros quatro em ligações covalentes para compartilharem os elétrons da última camada entre si, atingindo a estabilidade (8 elétrons na última camada).

Nessa estrutura cristalina não há elétrons livres, portanto, para forçarmos a condução de corrente elétrica teríamos que romper as ligações covalentes mediante a aplicação de energia suficiente para isso.

Essa característica do semiconductor pode ser alterada acrescentando-se pequenas quantidades de substâncias especiais na sua estrutura, que são denominadas substâncias “dopantes” ou “impurezas”, pelo fato do semiconductor deixar de ser puro.

Essa dopagem pode ser feita com um material dopante contendo um elétron a menos na banda de valência (trivalente - 3 elétrons) em relação ao material semiconductor. São exemplos de elementos trivalentes o índio, o boro, o



alumínio e o gálio.

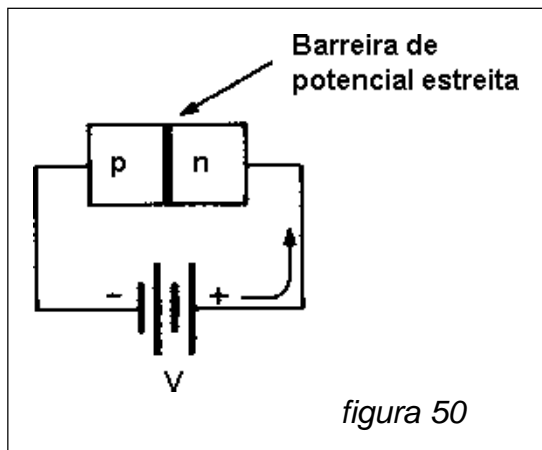
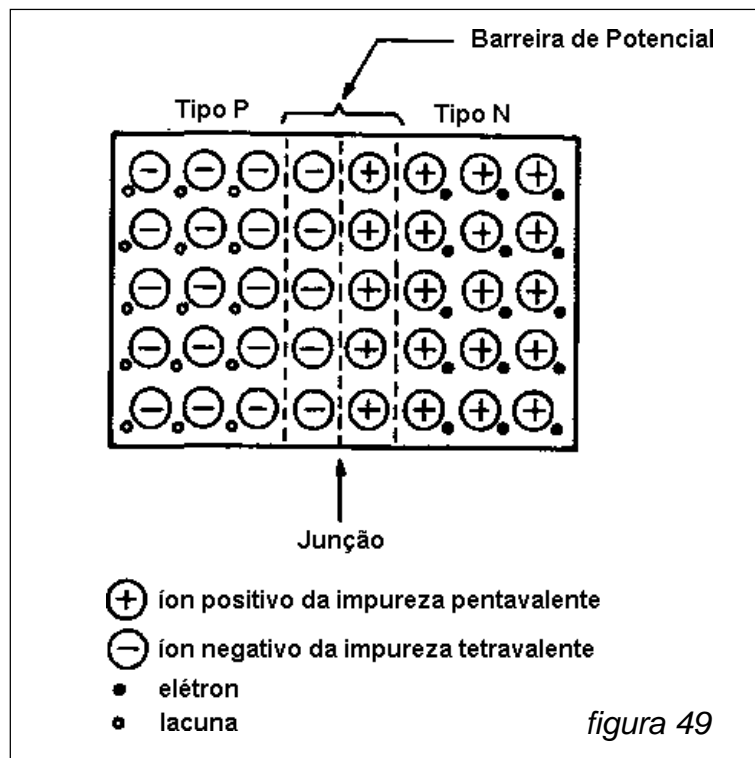
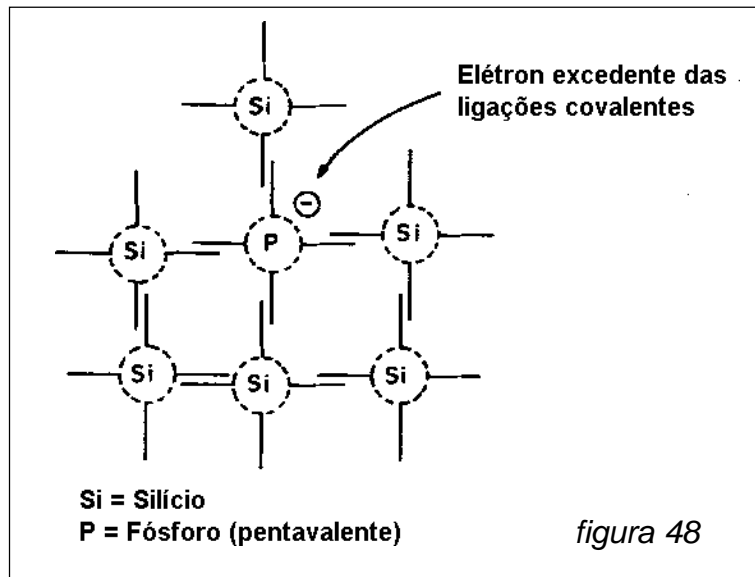
Na ligação, os íons desse material dopante (íons “aceitadores”) removem elétrons de valência do semiconductor, deixando “lacunas”, portanto, o semiconductor torna-se do tipo P - **figura 47**.

Se o material dopante for constituído de átomos com um elétron a mais (pentavalente - 5 elétrons) do que o semiconductor puro em sua faixa de valência, na ligação esse elétron fica disponível sob a forma de elétron livre, formando o semiconductor do tipo N - **figura 48**. Como exemplos de elementos pentavalentes temos o antimônio, o fósforo e o arsênio.

Unindo o material do tipo N com o do tipo P, de maneira a constituirmos um cristal único (junção, ou difusão, onde é mantida a continuidade da estrutura cristalina), formaremos o diodo de junção - **figura 49**.

Na região de contato das duas áreas, elétrons e lacunas se recombinam, criando uma fina camada isenta de portadores de carga, a chamada barreira de potencial ou camada de depleção, onde temos apenas os íons “doadores” da região N e os íons “aceitadores” da região P, que por não apresentarem portadores de carga “isolam” as demais lacunas do material P dos outros elétrons livres do material N.

Os íons estão fixos na estrutura do cristal e não podem se deslocar livremente, portanto, um elétron livre ou uma lacuna só pode atravessar a barreira



de potencial mediante a aplicação de energia externa (polarização direta da junção).

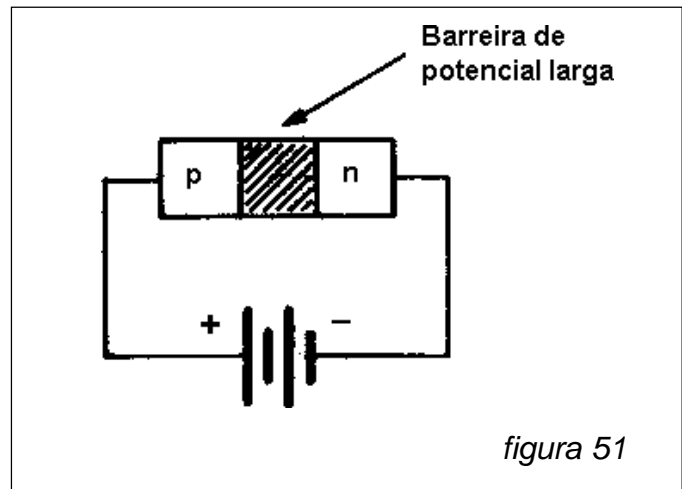
- Bem, está formado o diodo. Mas para que ele serve ?

Para entendermos a necessidade de todo esse processo químico para a formação do diodo, e suas possíveis aplicações, precisamos estudar o seu comportamento quando polarizado.

POLARIZAÇÃO DIRETA

Na **figura 50** temos uma fonte DC aplicada aos terminais de um diodo. O terminal positivo da fonte está ligado ao material tipo P (anodo do diodo) e o terminal negativo ao tipo N (catodo do diodo), sendo essa ligação chamada de polarização direta.

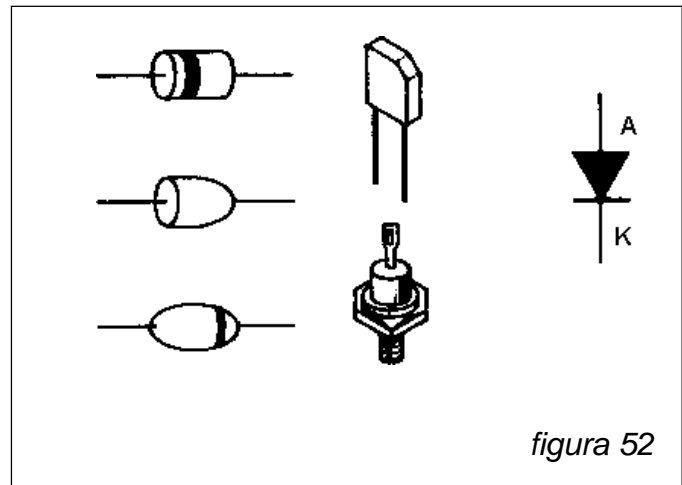
Nessa ligação, os elétrons livres do material N são impulsionados pelo terminal negativo da fonte, vencendo a barreira de potencial da junção e caminhando através das lacunas do material tipo P, até serem recolhidos pelo terminal positivo da fonte no terminal da esquerda.



POLARIZAÇÃO REVERSA

Invertendo a polaridade da fonte DC, aplicando o terminal positivo ao catodo e o terminal negativo ao anodo (**figura 51**), favorecemos a barreira de potencial, estabelecendo na região da junção uma alta resistência ao fluxo da corrente reversa, passando pelo circuito apenas uma pequena corrente desprezível, chamada de corrente reversa.

- Então o diodo conduz a corrente elétrica em um único sentido ?



Sim, essa é a propriedade fundamental do diodo de junção e, a partir dela, esse componente pode ser utilizado como retificador, detector, ceifador, etc..

Vamos estudar essas aplicações, mas antes vamos observar o símbolo de um diodo e os formatos que assumem, conforme a aplicação, corrente e tensão que devem suportar. Veja a **figura 52**.

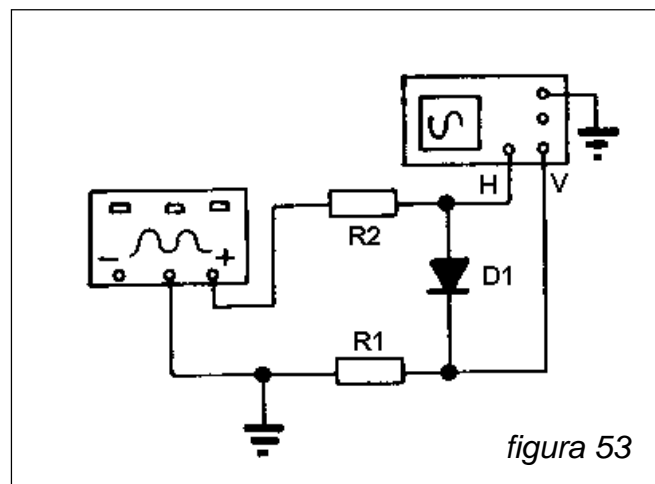
Podemos ainda levantar a curva característica de um diodo montando o arranjo demonstrado na **figura 53**. O gerador de funções pode estar indiferentemente em função triangular ou senoidal, podendo até mesmo ser substituído pelo secundário de um transformador de baixa tensão.

O resistor R1 monitora a corrente no circuito, ou seja, a queda de tensão sobre esse resistor será proporcional à corrente que por ele circula. R2 tem a função de reter a diferença de tensão entre a fonte de sinal e a queda sobre o diodo.

O eixo horizontal do osciloscópio está ligado ao anodo do diodo D1. Portanto, o deslocamento do feixe na horizontal será proporcional à tensão sobre o diodo.

O eixo vertical está ligado ao resistor R1, e dessa forma o deslocamento vertical será proporcional à corrente que passa pelo diodo.

Observando a forma de onda obtida (**figura 54**), notamos que durante o semi-ciclo positivo do sinal injetado temos a polarização direta do diodo, com a corrente crescendo à



medida que aumenta a tensão de entrada e a queda de tensão sobre o diodo assumindo o valor limite em torno de 0,7V.

Durante o semi-ciclo negativo, com a polarização reversa, a corrente deixa de existir (não há deslocamento vertical do feixe), e toda a tensão de entrada fica retida no diodo (deslocamento do feixe no sentido horizontal, do centro para a esquerda).

Osciloscópios com dois canais geralmente não possuem uma entrada específica correspondente ao eixo horizontal, e sim uma tecla para realizar o traçado A versus B, ou seja, o canal A passa a controlar o deslocamento horizontal, enquanto o canal B comanda o deslocamento vertical do feixe, possibilitando o traçado de curvas características (é o caso do osciloscópio representado na **figura 54**).

Agora que estudamos as polarizações direta e reversa, podemos apresentar o uso das propriedades do diodo em circuitos práticos, iniciando pelos retificadores.

RETIFICADOR DE MEIA ONDA

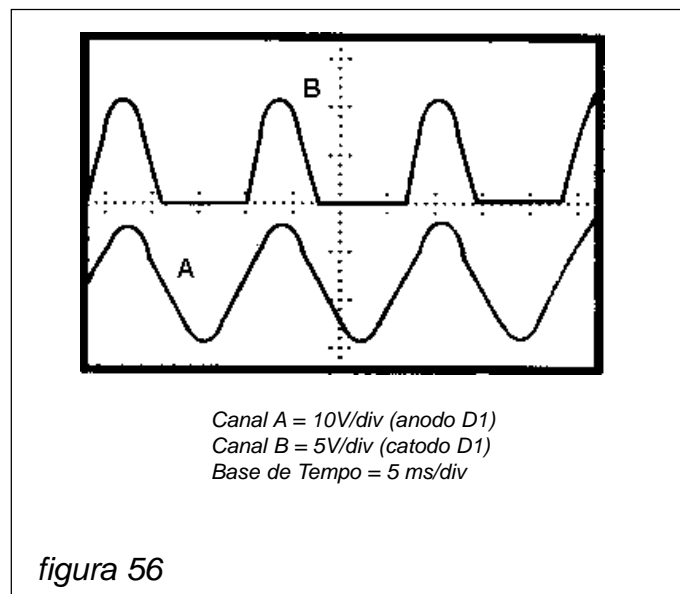
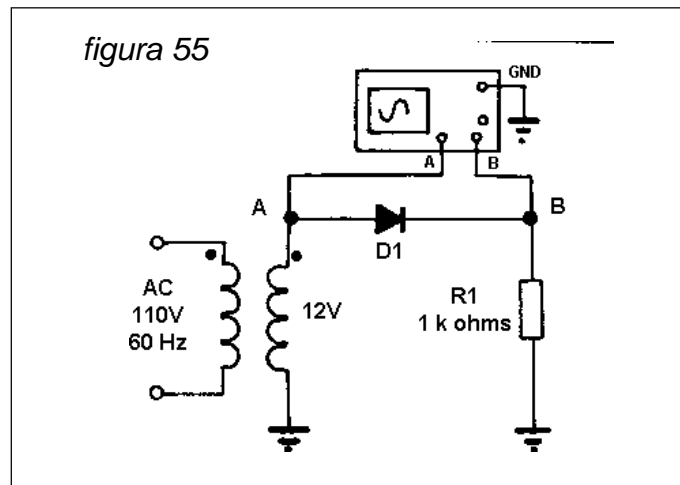
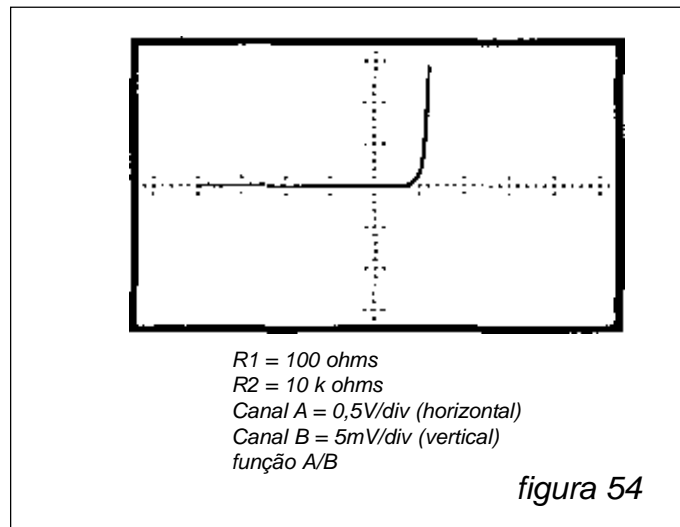
Os circuitos dos aparelhos eletrônicos geralmente não trabalham diretamente com a tensão AC da rede elétrica, que além de ser de valor muito elevado para a maioria dos seus componentes suportarem, tem a característica alternada, que também não é apropriada, visto que esses circuitos costumam operar com tensões DC (contínuas).

Por causa disso, sabemos que praticamente todos os circuitos eletrônicos, salvo raras exceções, possuem uma fonte de alimentação, que inicialmente baixa a tensão da rede elétrica (110 ou 220V) para um valor apropriado (6, 9, 12, 15V, etc.), utilizando para isso um transformador, e depois converte essa tensão alternada do secundário do transformador em uma tensão contínua.

Nessa conversão de alternada para contínua, o diodo é fundamentalmente o componente empregado nos circuitos.

Na **figura 55** temos a ligação do osciloscópio para a verificação das formas de onda antes e depois do diodo no circuito denominado “retificador de meia onda”, que utiliza um único diodo retificador.

Na **figura 56** podemos acompanhar as formas de onda nesse circuito, que auxiliam na compreensão do seu funcionamento. Utilizamos propositalmente escalas diferentes para os dois canais para que as ondas



não ficassem sobrepostas, além de um deslocamento na forma de onda inferior (senóide do transformador) para não tocar na superior.

No semi-ciclo positivo da tensão do secundário (quando o ponto A é positivo em relação ao B), o diodo encontra-se polarizado diretamente, sendo equivalente a uma chave fechada, transferindo todo esse semi-ciclo para a carga, ligada ao catodo.

No outro semi-ciclo (ponto A negativo e ponto B positivo), o diodo fica polarizado reversamente (anodo negativo e catodo positivo), passando a comportar-se como uma chave aberta, impedindo portanto que esse semi-ciclo chegue à carga, zerando a tensão sobre ela.

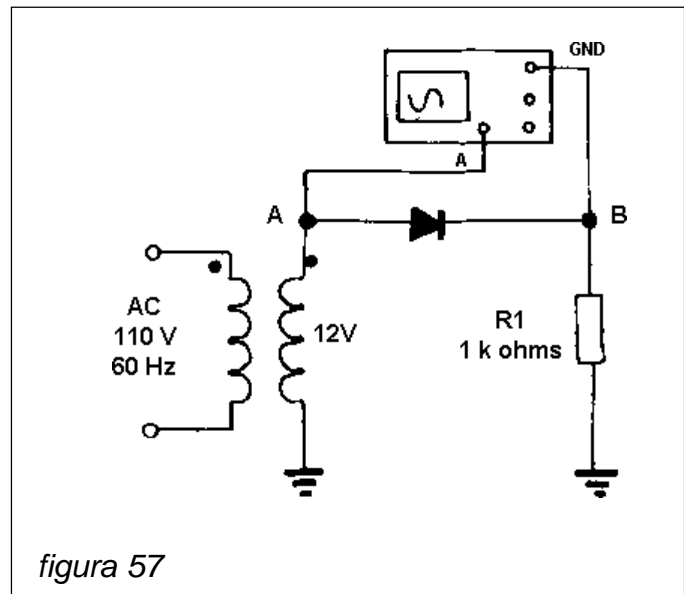


figura 57

- O semi-ciclo bloqueado no diodo também pode ser observado ?

Sim, basta para isso colocar o osciloscópio sobre o diodo, como demonstra a **figura 57**.

Deveremos obter na tela a forma de onda da **figura 58**, onde temos cerca de 0,7V como queda de tensão sobre o diodo na polarização direta (semi-ciclo positivo) e todo o semi-ciclo negativo na polarização reversa.

Como conclusões importantes, devemos observar que o circuito retificador de meia onda converteu a tensão AC do secundário do transformador em tensão DC pulsante, ou seja, a tensão sobre a carga é sempre positiva ou zero, dependendo de qual metade do ciclo está sendo entregue ao retificador. Em outras palavras, a corrente na carga é sempre no mesmo sentido.

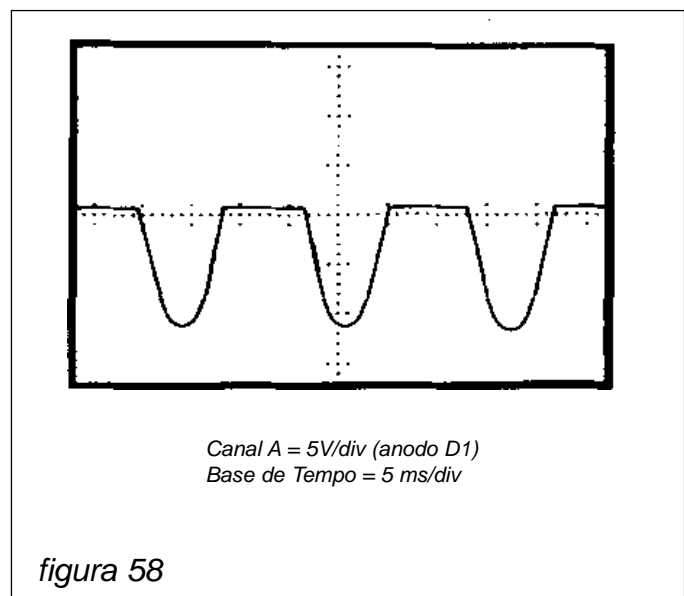


figura 58

Esse processo de conversão de AC para DC é conhecido como “retificação”.

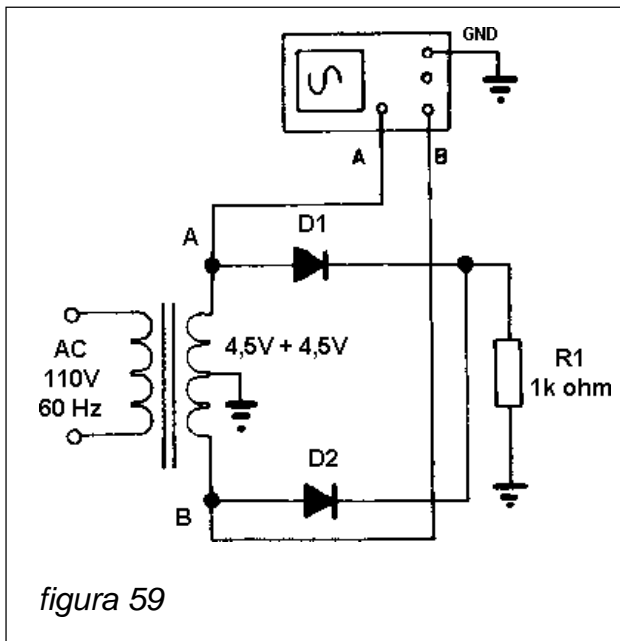
- Além desse retificador de meia onda, existem outros circuitos de retificação ?

Sim, e o próximo que vamos analisar é o retificador de onda completa, que pode ser formado a partir de um transformador de secundário com derivação central ou não.

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

SECUNDÁRIO COM DERIVAÇÃO CENTRAL

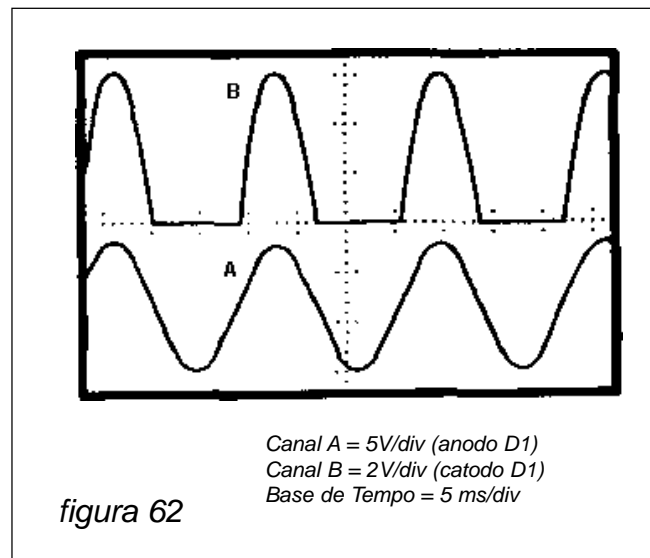
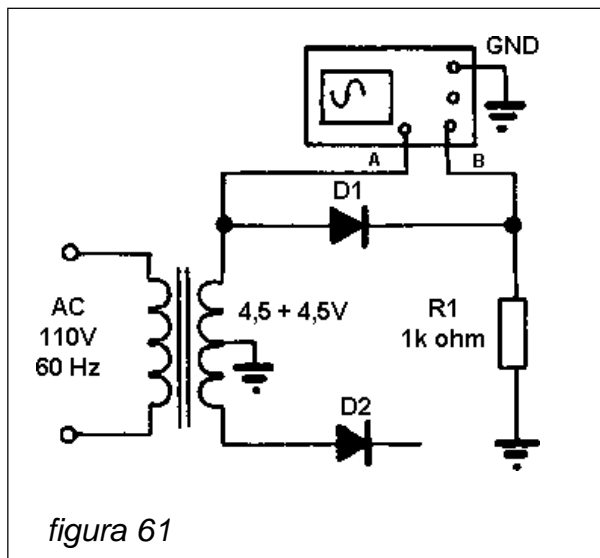
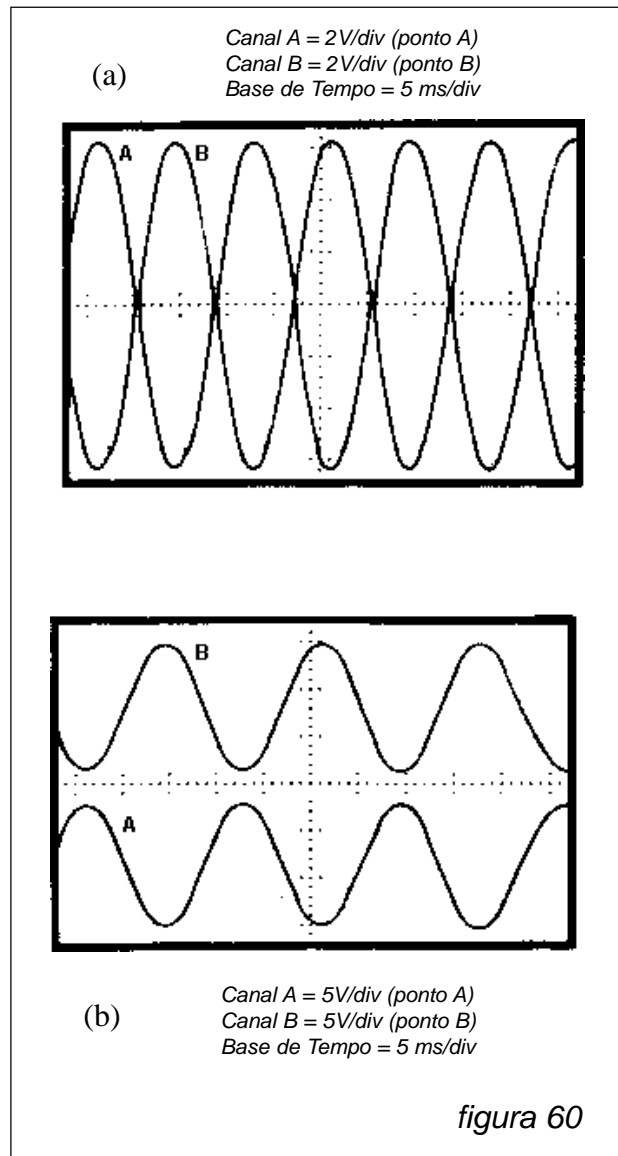
O retificador de onda completa associado a um transformador com uma derivação central no enrolamento secundário, conhecida também por “center tap”, basicamente consiste de dois retificadores de meia onda, com um deles conduzindo um dos semi-ciclos e o outro conduzindo o outro semi-ciclo. Veja a **figura 59**.



Antes de verificarmos a forma de onda da saída (sobre a carga), vamos colocar o osciloscópio duplo traço com um canal em cada derivação secundária, com o terra ligado no ponto central, como mostrado na **figura 59**.

As formas de onda encontradas (**figura 60**) nos mostram que enquanto em uma das derivações o semi-ciclo é positivo, na outra ele é negativo, e vice-versa, lembrando que tomamos como referência o ponto central (tap) do enrolamento, que a propósito é o terra do circuito, ligado também à carga na saída. Na **figura 60b**, deslocamos as duas ondas para facilitar a visualização e interpretação.

Para facilitar a compreensão de como é formada a forma de onda na saída, vamos analisar cada metade do retificador de onda completa separadamente. Inicialmente, vamos desligar o diodo D2 (**figura 61**) e observar no osciloscópio a forma de



onda da saída, comparada com a aplicada ao diodo D1 pelo enrolamento superior - **figura 62**. Deixamos propositalmente o osciloscópio em escalas diferentes, além de deslocarmos a onda inferior, para não haver a sobreposição das curvas, e assim podermos concluir facilmente que o comportamento é idêntico ao do retificador de meia onda que estudamos anteriormente.

Analogamente, desligamos D1 e observamos no osciloscópio a forma de onda na saída, comparada com a aplicada ao diodo D2 pelo enrolamento inferior - **figura 63**. Novamente, o comportamento é idêntico ao do retificador de meia onda, no entanto, em comparação ao diodo D1, D2 conduz no exato instante em que D1 ficou polarizado reversamente. Isso não podemos observar pelo osciloscópio (**figura 64**), já que o gatilhamento (trigger) fixa o início da forma de onda com o ciclo positivo, ficando ambas idênticas (figura 62 = figura 64).

A **figura 65** mostra o efeito resultante dos dois diodos ligados no circuito (diagrama da **figura 59**). Quando D1 recebe o semi-ciclo positivo do enrolamento superior, conduzindo-o para a carga, D2 está recebendo o semi-ciclo negativo do enrolamento inferior, ficando com polarização reversa. Em seguida, D2 é que passa a receber o semi-ciclo positivo do enrolamento inferior, levando-o à carga, e D1 fica reversamente polarizado, por receber o semi-ciclo negativo do enrolamento superior.

Nesse ponto, é importante observarmos que a frequência de saída do retificador de meia onda é a mesma que a frequência de entrada, ou seja, para cada ciclo na saída corresponde um ciclo na entrada. Assim, a frequência do sinal pulsante de um retificador de meia onda é 60 Hz, a mesma frequência da rede.

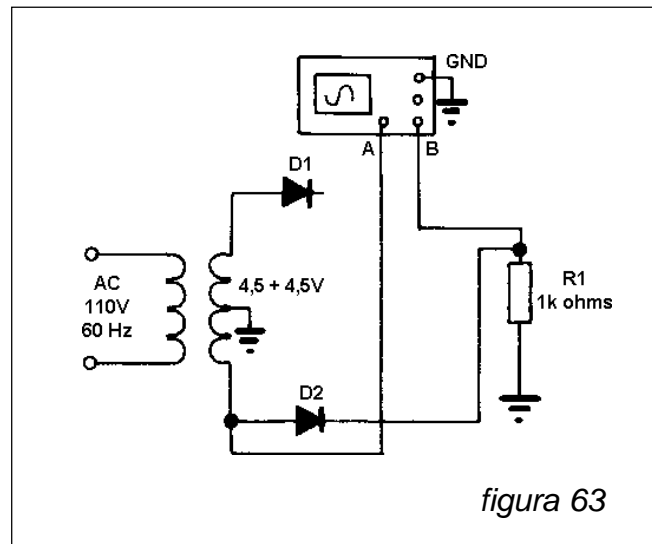


figura 63

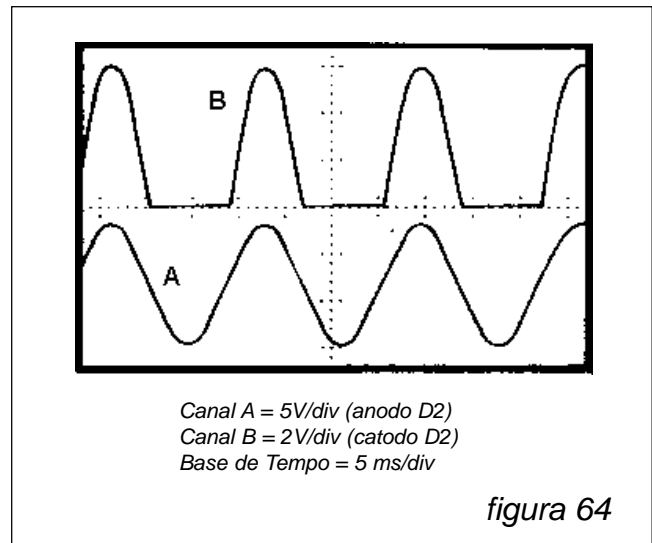


figura 64

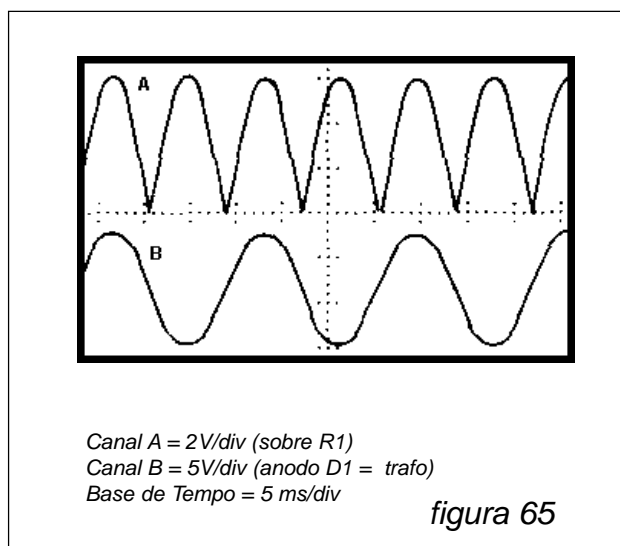


figura 65

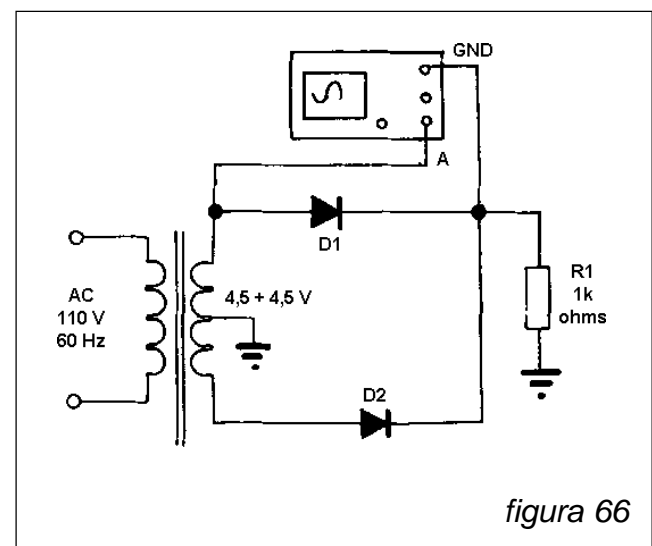
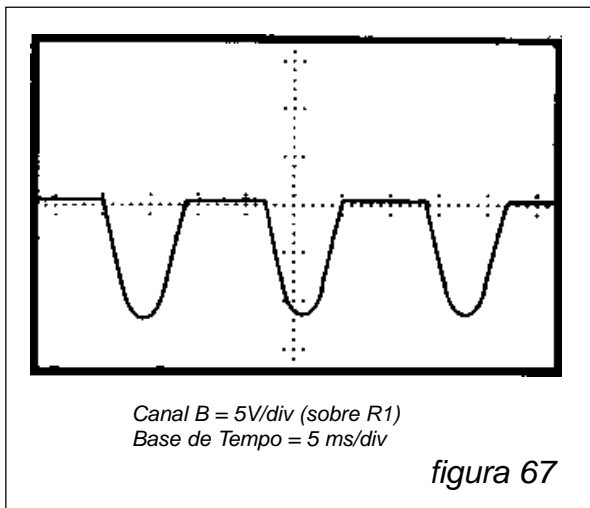


figura 66



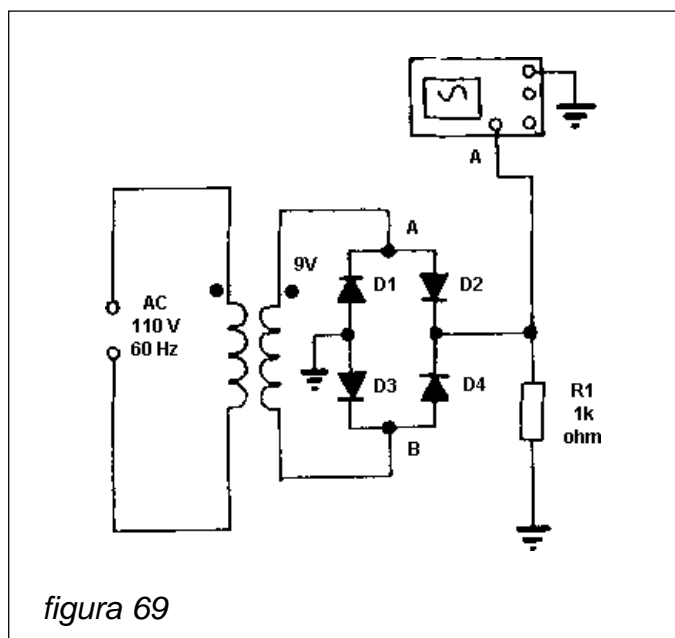
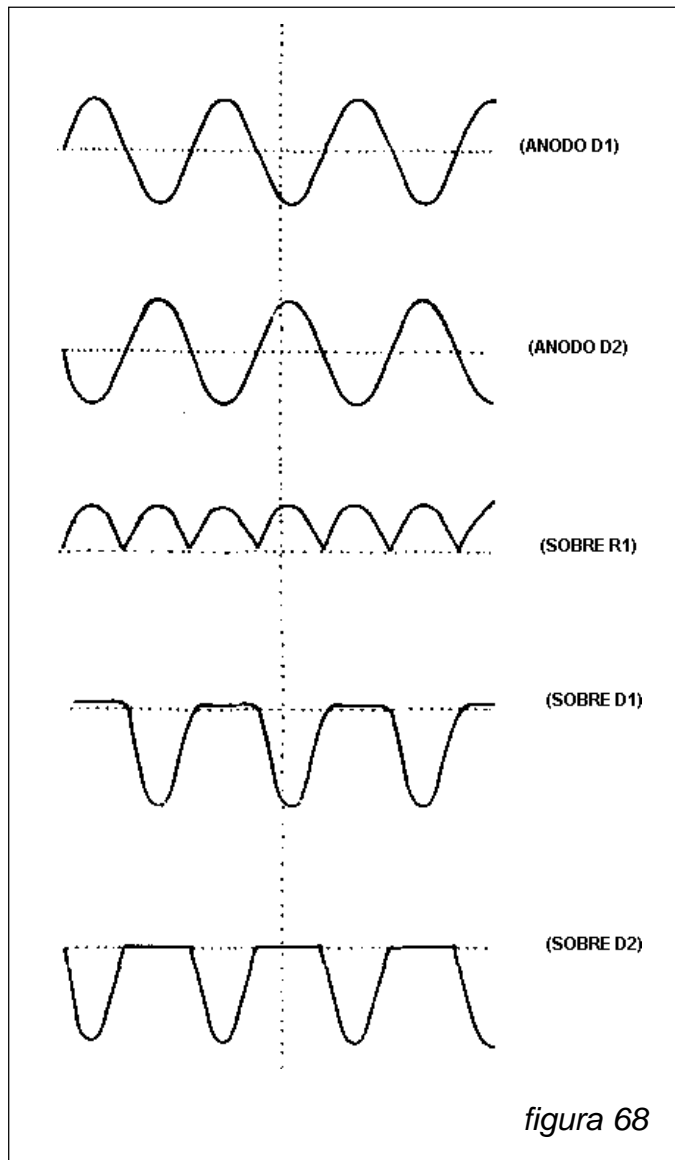
Já no retificador de onda completa, a frequência de saída é o dobro da frequência de entrada, ou seja, ocorrem dois ciclos na saída para cada ciclo completo na entrada. Isto acontece porque o retificador de onda completa também tem um diodo conduzindo mesmo durante o semi-ciclo negativo da tensão de entrada, mas sempre mantendo a corrente da carga no mesmo sentido. Portanto, o retificador de onda completa tem uma frequência de saída de 120 Hz, exatamente o dobro da frequência da rede.

- E o semi-ciclo bloqueado em cada diodo, também é diferente ?

Sim, mas apenas na amplitude. Vamos observar a forma de onda colocando o osciloscópio entre os terminais de um dos diodos (D1) - **figura 66**. Mesmo quando esse diodo está recebendo o semi-ciclo negativo, a carga está recebendo o semi-ciclo positivo do outro diodo. Portanto, a diferença de potencial entre anodo e catodo de D1 (reversamente polarizado) é o dobro se compararmos a que teríamos no retificador de meia onda, como mostra a forma de onda da **figura 67**. Note que o pico dessa forma de onda atinge cerca de 13V, enquanto o pico no anodo de cada diodo está por volta de 6,5V (tensão de pico de cada secundário do transformador).

Podemos verificar isso melhor, reunindo em uma única figura todas as formas de onda que observamos, utilizando para todas elas a mesma escala vertical (5V/div). Veja a **figura 68**.

A tensão reversa sobre cada diodo é



exatamente a diferença entre a tensão do secundário a ele correspondente e a tensão da carga. Como uma é positiva (carga) e a outra negativa (anodo do diodo), o resultado é o dobro quando comparado ao verificado no retificador de meia onda.

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE

Chamar o retificador em ponte de retificador de onda completa é um tanto redundante, já que o retificador em ponte sempre produz uma saída de onda completa. Portanto, daqui para frente vamos nos referir a esse retificador apenas como retificador em ponte.

Esse retificador tem um transformador de um único secundário (sem derivação), e utiliza quatro diodos (**figura 69**).

Durante o semi-ciclo positivo do secundário (ponto A positivo em relação ao ponto B), os diodos D2 e D3 estão polarizados diretamente (anodo positivo e catodo negativo), comportando-se como chaves fechadas. Já D1 e D4 ficam com polarização reversa, equivalendo a chaves abertas. A **figura 70** representa o caminho da corrente elétrica pelo retificador e pela carga.

No semi-ciclo negativo do secundário (ponto A negativo em relação ao ponto B), D1 e D4 é que ficam diretamente polarizados, enquanto D2 e D3 ficam com polarização reversa. Agora, a corrente elétrica segue o caminho mostrado na **figura 71**.

Note que na carga, o fluxo de corrente é sempre no mesmo sentido.

A **figura 72** mostra a forma de onda sobre a carga - a mesma obtida no retificador de onda completa com center tap.

- Se o resultado é o mesmo, qual a vantagem da retificação em ponte ?

Uma das vantagens é o uso de transformador sem center tap, mais prático e econômico de se fabricar. A outra fica por conta da tensão reversa sobre os diodos retificadores, que é metade da que verificamos no retificador de onda completa com derivação central.

Podemos concluir isso observando a forma de onda da **figura 73**, onde o canal A do

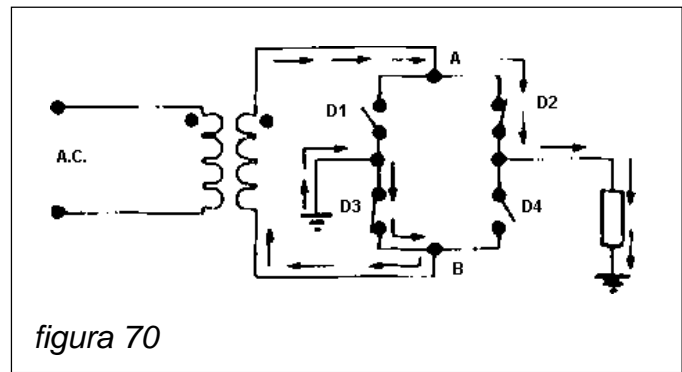


figura 70

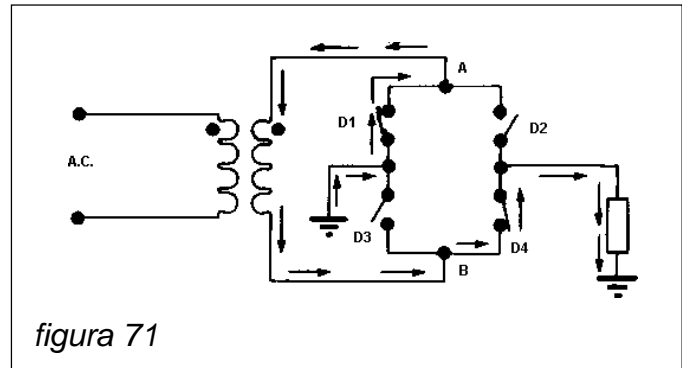


figura 71

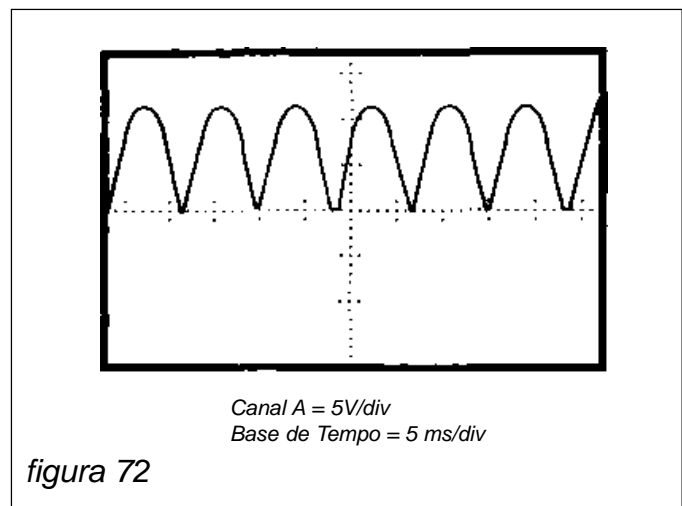


figura 72

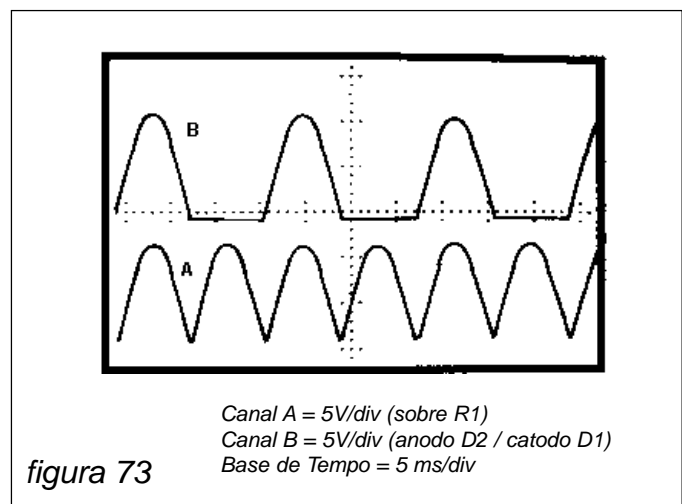


figura 73

osciloscópio está ligado à carga, enquanto o canal B está no anodo do diodo D2 / catodo do diodo D1. Como o terra do osciloscópio está no terra do circuito, o canal A tem exatamente a forma de onda sobre a carga e o canal B a forma de onda antes de D2. A diferença entre ambas corresponde à queda de tensão sobre o diodo, e notamos que agora não acontece como no retificador com derivação central, onde o anodo estava submetido a uma tensão em sentido oposto ao da carga, ou seja, uma tensão negativa era aplicada ao anodo enquanto a carga tinha uma tensão positiva.

Para resumir a análise do circuito retificador em ponte, reunimos todas as formas de onda do circuito na **figura 74**.

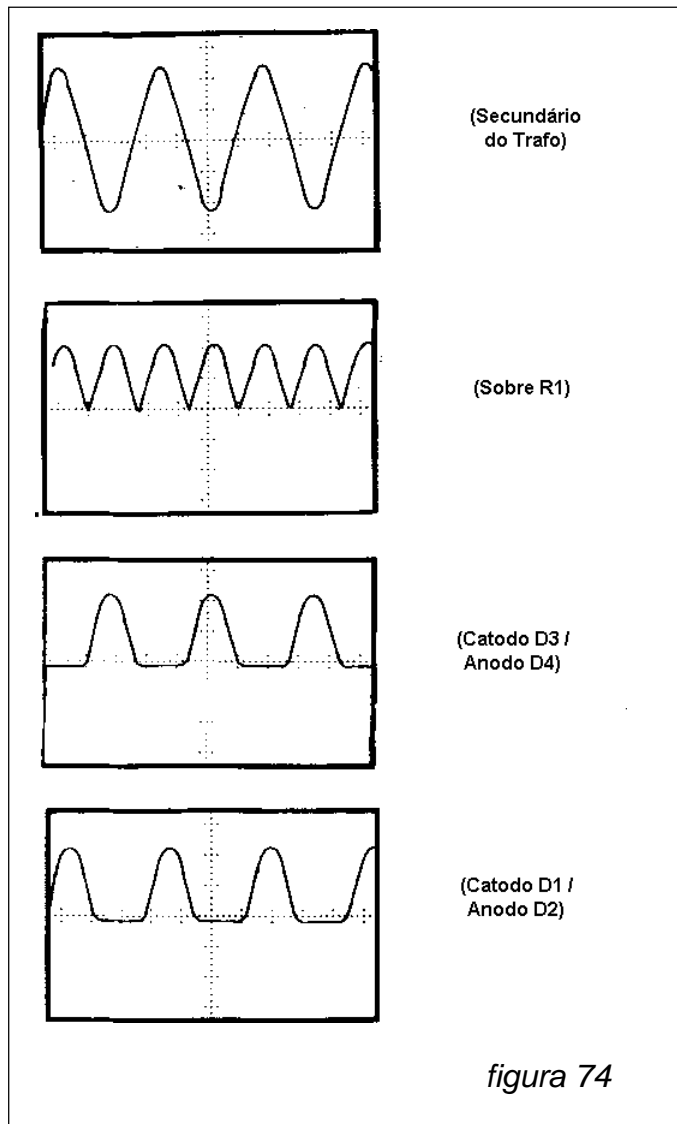
Os retificadores em ponte são tão comumente empregados na indústria, que também estão disponíveis em um único encapsulamento, formando um módulo com 4 terminais - dois de entrada para a tensão AC do secundário e dois de saída para a carga (**figura 75**).

- Mas eu posso alimentar um rádio ou um amplificador diretamente com a saída do retificador ?

A saída do retificador, como vimos, é uma tensão DC pulsante. A utilização desse tipo de saída limita-se à carga de baterias, alimentação de motores DC, e mais algumas poucas aplicações.

A maioria dos circuitos eletrônicos requer uma tensão DC constante, do mesmo tipo obtido com pilhas e baterias, e não pulsada. A tensão pulsada provoca variações nas polarizações dos componentes, causando roncos e distorções nos sinais.

Para conseguir essa tensão constante, ligamos um circuito de filtragem na saída do retificador. Vamos conhecer e analisar esses circuitos de filtragem.



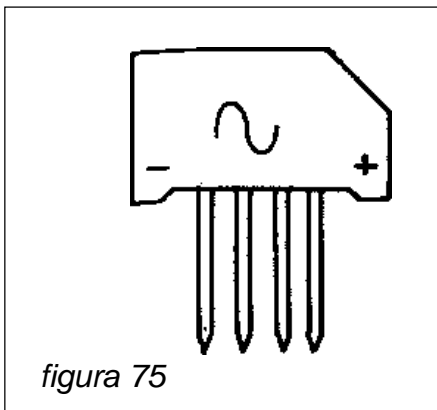
FILTRO CAPACITIVO

O circuito de filtragem mais comum consiste em um capacitor ligado em paralelo com a carga, como por exemplo o incluído na saída de um retificador de meia onda - **figura 76**.

Vamos analisar a influência desse capacitor no circuito.

Durante o primeiro quarto do semi-ciclo do secundário do transformador, o diodo fica diretamente polarizado, se comportando como uma chave fechada, ligando o transformador diretamente ao capacitor, que se carrega até a tensão de pico.

Assim que passa o pico positivo, o diodo pára de conduzir, comportando-se como chave aberta.



- Mas por que ele pára de conduzir, o diodo ainda não está recebendo o semi-ciclo positivo ?

Sim, o semi-ciclo aplicado ao anodo do diodo ainda é o positivo, no entanto, a tensão de pico carregada no capacitor deixa o catodo mais positivo do que o anodo, já que a tensão instantânea do secundário do transformador está ligeiramente menor do que a tensão de pico, ou seja, o diodo fica com polarização reversa.

Com o diodo aberto, o capacitor deixa de receber corrente do transformador, e passa a se descarregar através da resistência de carga. Utilizando um capacitor de capacitância elevada, a constante de tempo de descarga (produto R_c por C) é muito maior do que o período T da senóide do secundário do transformador. Assim, o capacitor perde apenas uma parcela da sua carga durante o tempo em que o diodo fica desligado.

Quando a tensão do secundário supera novamente a tensão do capacitor, positivamente, o diodo volta a conduzir, repondo a carga perdida, voltando a tensão do capacitor praticamente à tensão de pico do secundário do transformador.

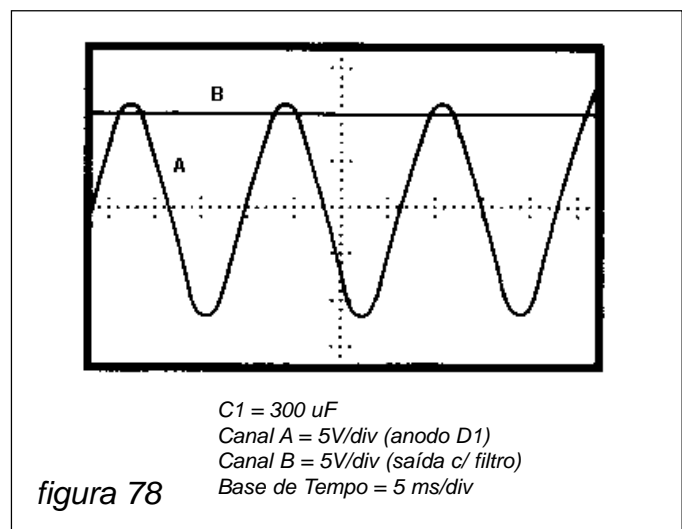
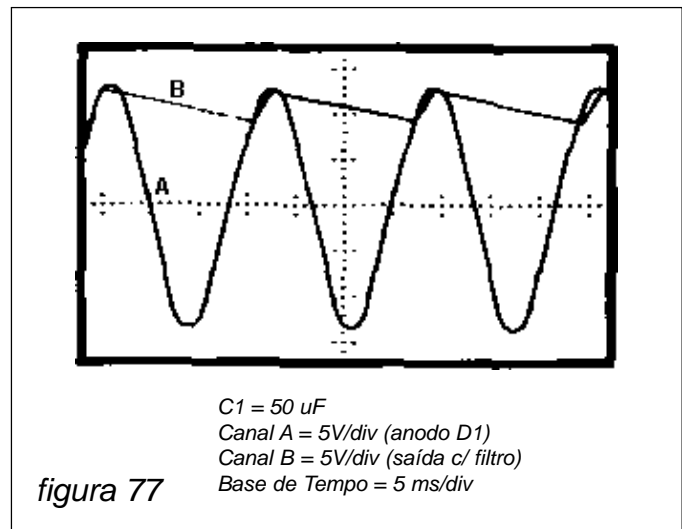
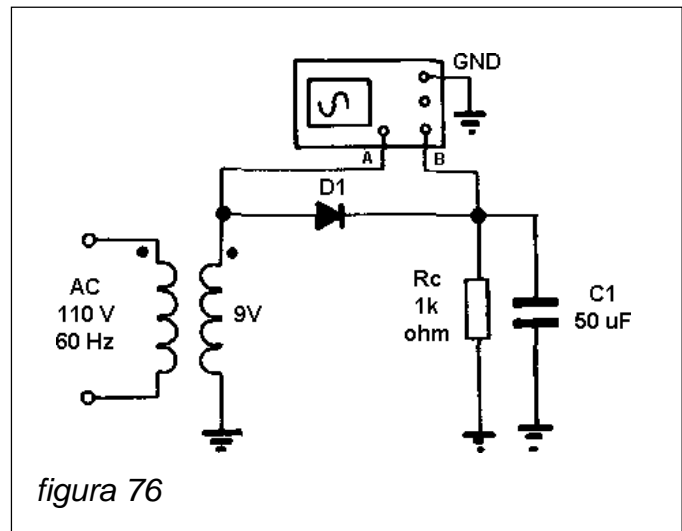
Depois dessa análise preliminar, vamos observar as formas de onda no circuito - **figura 77**.

Vemos que a forma de onda da saída (sobre a carga) é quase uma tensão constante, apresentando apenas as pequenas ondulações causadas pelas cargas e descargas do capacitor de filtragem. Uma forma de melhorar essa forma de onda, reduzindo as ondulações, é aumentar a constante de tempo de descarga, que depende de R_c e C .

- Quer dizer que se eu aumentar o capacitor eu melhora a filtragem ?

Isso mesmo, e melhor filtragem significa tensão DC mais constante, com menor ondulação. Veja o que acontece passando o capacitor do circuito da **figura 76** de $50 \mu\text{F}$ para $300 \mu\text{F}$. Observe a nova forma de onda - **figura 78**.

Outra forma de se melhorar a filtragem é usar o retificador de onda completa ou em ponte. Como nesse retificador a frequência da ondulação é de 120 Hz, ou seja, o dobro, a carga do capacitor é reposta com uma frequência duas vezes maior. Assim, o capacitor tem apenas metade do tempo para se



descarregar, perdendo portanto menos carga, e como consequência temos uma menor ondulação na saída.

No circuito da **figura 79**, obtemos a forma de onda vista na **figura 80**. Note que no canal A do osciloscópio temos a senóide aplicada ao diodo D1 (ponto A), enquanto no canal B temos a forma de onda da saída (carga+capacitor de filtragem).

A carga do capacitor é repostada no semi-ciclo positivo da senóide mostrada na tela e também no instante em que ela está no pico negativo (segundo semi-ciclo). Nesse instante, o diodo D2 é quem começa a conduzir o semi-ciclo positivo do enrolamento inferior do transformador, completando a carga do capacitor. Assim, comprovamos que a frequência da ondulação da saída é de 120 Hz, e o capacitor tem um período de descarga menor.

- Além do filtro capacitivo, existem outros tipos ?

Para reduzir ainda mais a ondulação, quando a carga é leve, ou seja, exige pouca corrente do circuito de filtragem, pode-se reforçar essa filtragem através de circuitos RC entre o retificador e a carga

FILTRO RC

A **figura 81** mostra a disposição dos componentes que formam um filtro RC na saída de um retificador.

O resistor R tipicamente é 10 vezes maior do que XC na frequência da ondulação.

A principal desvantagem do filtro RC complementar é a perda de tensão DC através da queda de tensão no resistor R. Portanto, o filtro só é adequado para uma resistência de carga alta (corrente de carga pequena).

A título comparativo, vamos acrescentar dois filtros RC no circuito da **figura 76**, ficando o circuito como mostra a **figura 82**, e comparar as formas de onda das ondulações no primeiro capacitor de filtragem (original) e na saída (após os dois filtros RC) - **figura 83**.

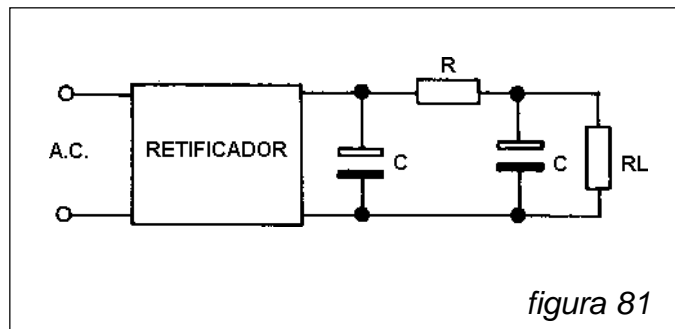


figura 81

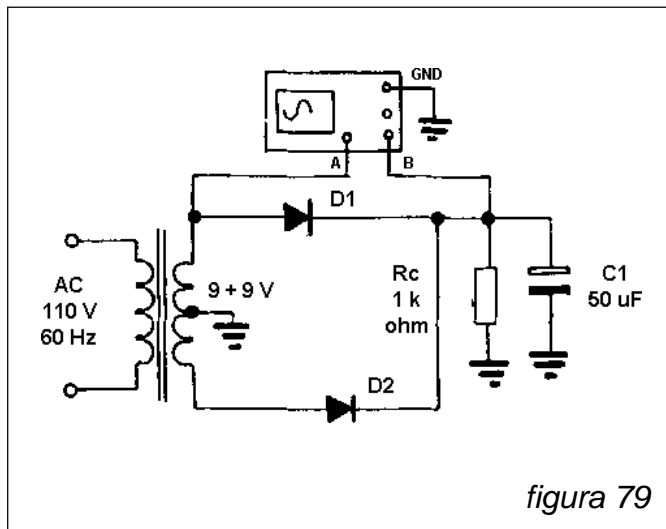


figura 79

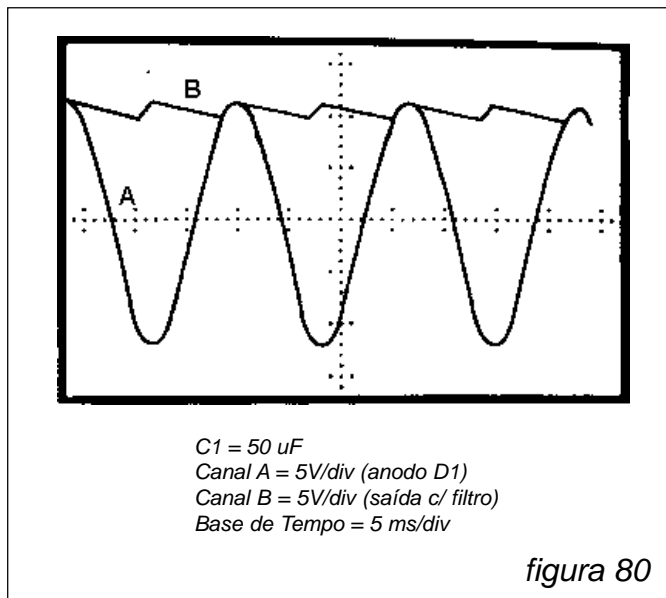


figura 80

Percebemos que a ondulação é significativamente menor, no entanto, a tensão DC sofre uma pequena queda, que será mais significativa se a resistência de carga for menor.

FILTRO LC

Quando a corrente de carga for grande, é mais conveniente o uso de um filtro LC no lugar do RC - **figura 84**.

Novamente, reduz-se a ondulação através dos indutores em série, fazendo X_L muito maior do que X_C na frequência da ondulação. Nos indutores, a queda de tensão DC é muito menor, dependendo apenas da resistência ôhmica do enrolamento.

Embora tenham sido muito utilizados no passado, esse tipo de filtro praticamente já se tornou obsoleto nos retificadores que trabalham com baixa frequência (tipicamente 60 Hz), em função do volume e custo dos indutores.

Atualmente, na necessidade de melhor filtragem do que a obtida com filtro capacitivo, emprega-se circuitos reguladores com transistores e diodos zener, ou mesmo circuitos integrados.

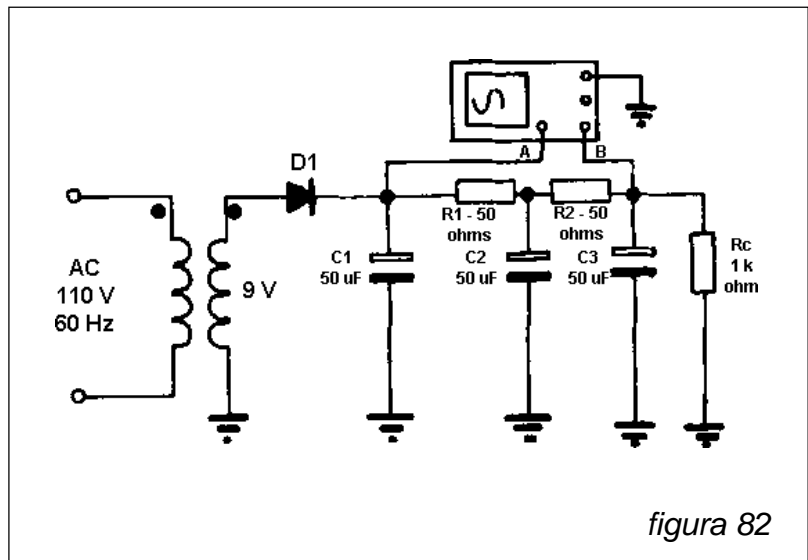


figura 82

LIMITADOR OU GRAMPO DE DIODO

O circuito limitador a diodo é mais uma aplicação desse componente, sendo muito utilizado, não só para variar a forma do sinal, mas principalmente na proteção de circuitos contra surtos, sobre-tensões e sinais indesejados.

Na **figura 85** temos um limitador negativo (também chamado ceifador), que corta os semi-ciclos negativos do sinal na saída, protegendo o led para que não receba a tensão reversa, a qual poderia não suportar, principalmente se no lugar do gerador tivéssemos um AC de alta tensão. Acompanhando as formas de onda envolvidas (**figura 86**), verificamos que o diodo conduz durante o semi-ciclo negativo e fica reversamente polarizado durante os semi-ciclos positivos, possibilitando que apenas os semi-ciclos positivos cheguem ao resistor limitador de corrente do led.

Propositalmente, deslocamos para cima a forma de onda do ponto A (canal A) para não haver a sobreposição dos traçados na tela.

Esse circuito é bastante didático, porém, na prática, utiliza-se o diodo limitador diretamente em paralelo com o led, dispensando assim um resistor do circuito (**figura 87**).

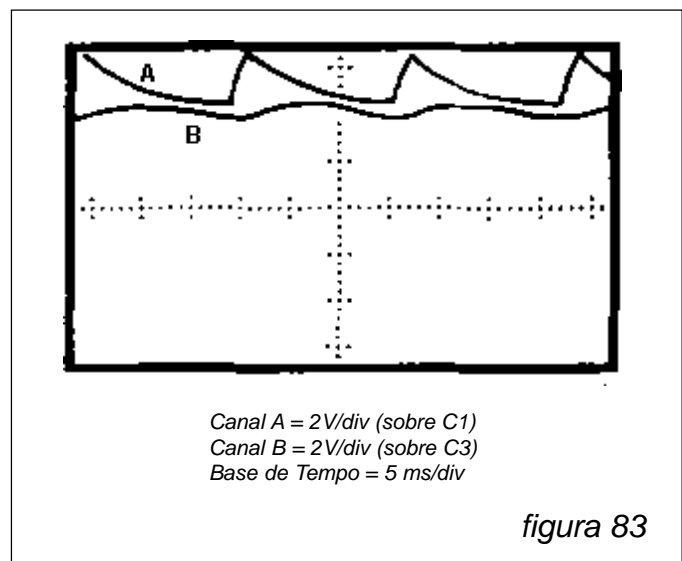


figura 83

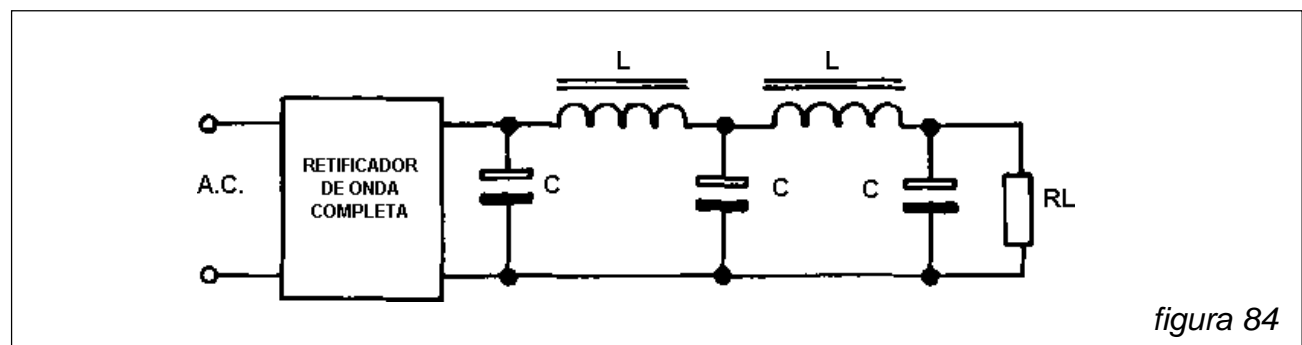
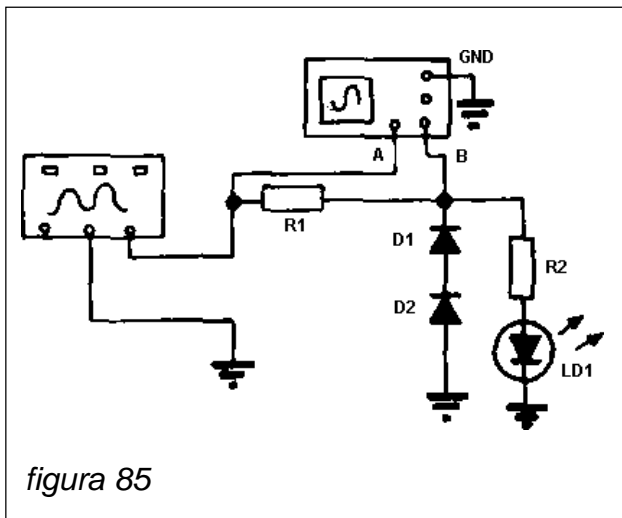


figura 84



O circuito da **figura 88** é um exemplo de limitador positivo, onde os semi-ciclos cortados são os positivos, durante os quais o diodo fica diretamente polarizado, passando para R2 apenas os semi-ciclos negativos (**figura 89**).

- Então o circuito limitador sempre corta toda a tensão positiva ou toda a tensão negativa, dependendo do seu tipo ?

Nem sempre. O limitador pode ser polarizado para cortar apenas acima de um determinado valor escolhido, e dessa forma não teríamos o ceifamento de toda a tensão positiva ou de toda a tensão negativa, e sim dos picos acima desse limite escolhido. Vamos analisar essa variação do circuito.

LIMITADOR POLARIZADO

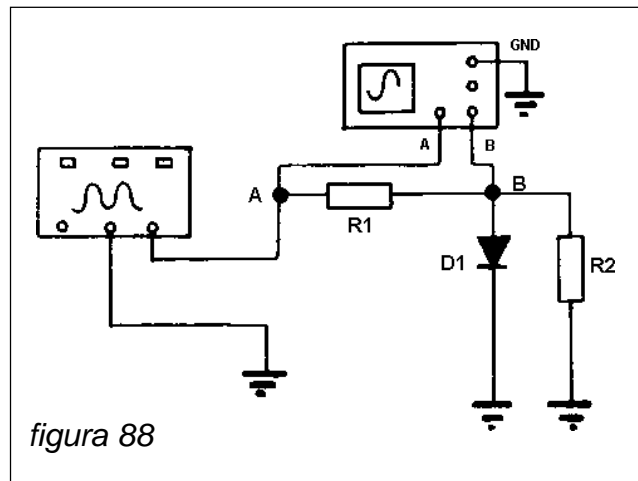
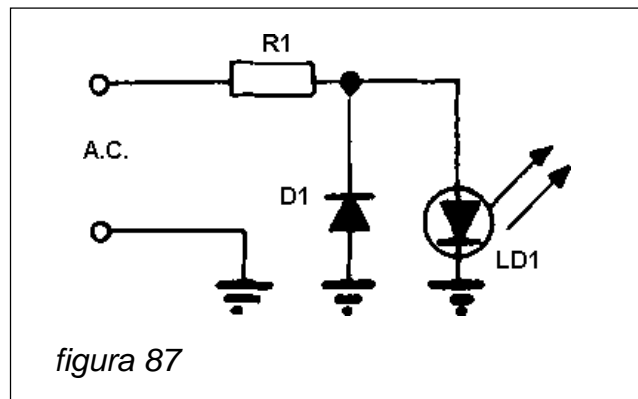
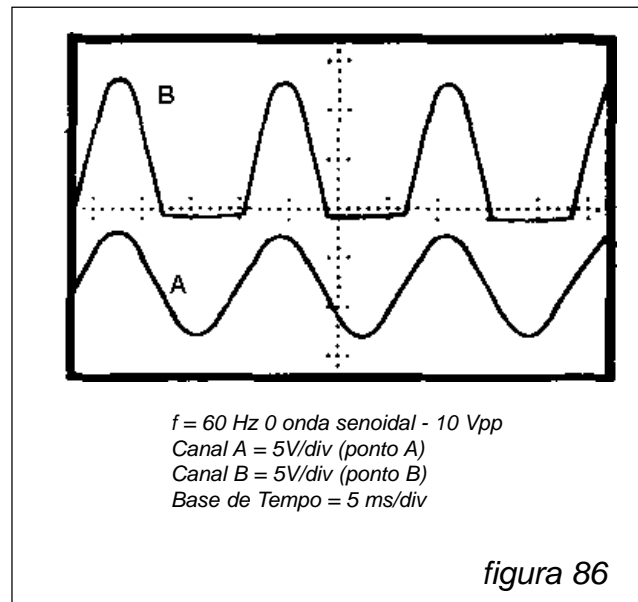
O nível de corte pode ser deslocado utilizando-se uma fonte de tensão em série com o diodo. Por exemplo, se no circuito da **figura 88** acrescentarmos em série com o diodo uma fonte de V volts (**figura 90**), quando a tensão de entrada for maior do que $V+0,7$, o diodo conduzirá, mantendo a tensão de saída limitada ao valor $V+0,7$ volts. Abaixo desse valor, o diodo fica aberto e o circuito passará a ser um divisor de tensão resistivo.

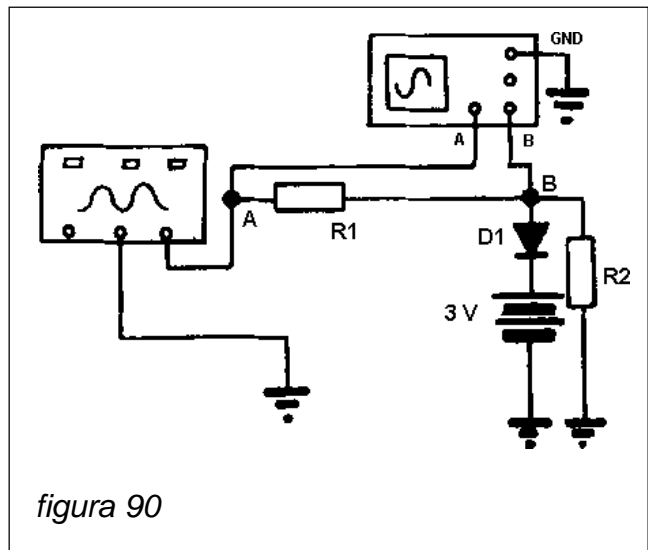
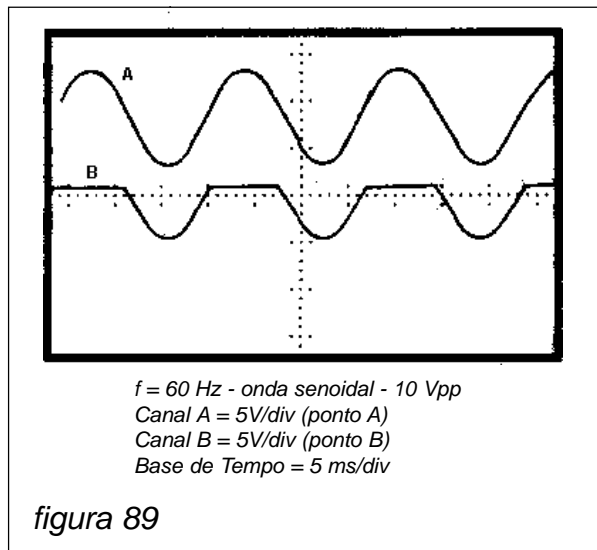
Nesse tipo de circuito, normalmente utiliza-se uma resistência de carga muito maior do que a resistência em série, para que praticamente toda a tensão de entrada chegue na saída quando o diodo estiver aberto.

Por exemplo, ligando em série com o diodo da **figura 88** uma fonte de 3V, a tensão positiva de saída será limitada em $3+0,7 = 3,7V$ - **figura 91**.

Podemos ainda associar limitadores positivos e negativos em paralelo para ceifar tanto positivamente como negativamente, a exemplo do circuito da **figura 92**.

Se o sinal de entrada tiver uma tensão de pico muito maior do que a tensão do limitador, a forma de



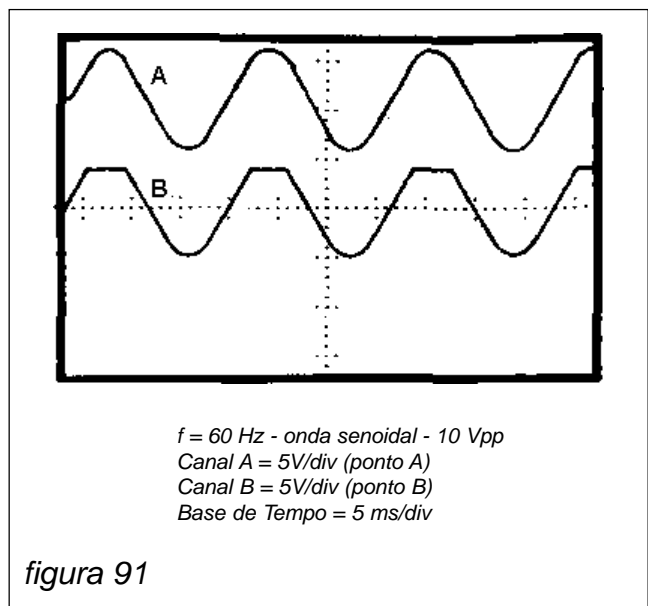


onda da saída será muito próxima de uma onda quadrada 91.

Em algumas aplicações, como por exemplo em televisores ou circuitos amplificadores sensíveis e de alto ganho, como os de RF, utiliza-se o diodo como limitador na função de proteger o circuito contra tensões de entrada excessivamente grandes.

A figura 94 traz dois exemplos de diodos nessa função.

Na figura 94a, o diodo ceifa qualquer sinal de entrada que ultrapasse +9V na base do transistor. Esse transistor corresponde ao casador de impedância que leva o sinal de luminância aos transistores de matrizagem na placa de cinescópio de um TV. Na base desse transistor são aplicados pulsos de apagamento horizontal, vindos do fly-back. Daí a necessidade da limitação, para evitar que pulsos excessivos danifiquem o transistor.

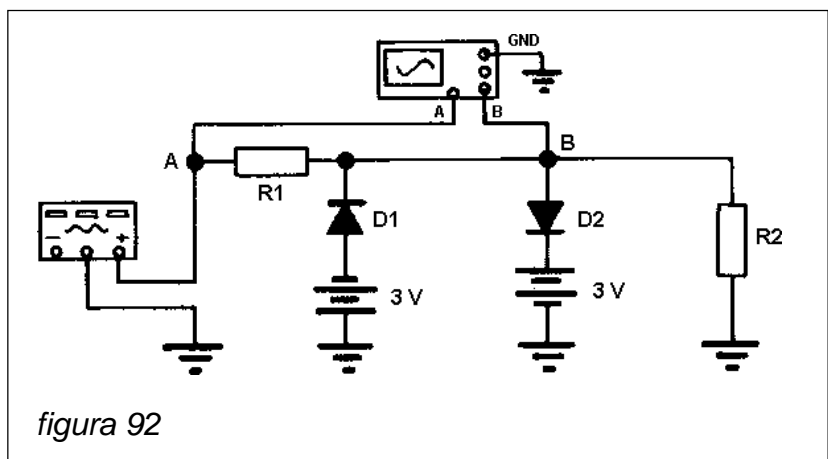


Na figura 94b temos dois diodos em anti-paralelo formando dois limitadores de 0,7V (tensão de condução dos diodos), sendo um positivo e outro negativo, na entrada de antena de um sintonizador de FM, garantindo que o nível de sinal nessa entrada não ultrapasse +0,7V ou -0,7V, protegendo o amplificador sensível de RF.

Utilizamos esses exemplos para confirmar a aplicação desse tipo de circuito na indústria.

Muitas variações são possíveis para o ceifamento, sendo que a figura 95 reúne uma série de circuitos ceifadores, todos recebendo a mesma forma de onda na entrada, cada qual apresentando uma saída diferenciada.

É importante ressaltarmos também que, embora os exemplos



utilizem formas de onda senoidal na análise, os limitadores podem ceifar qualquer tipo de forma de onda.

GRAMPEADOR DC

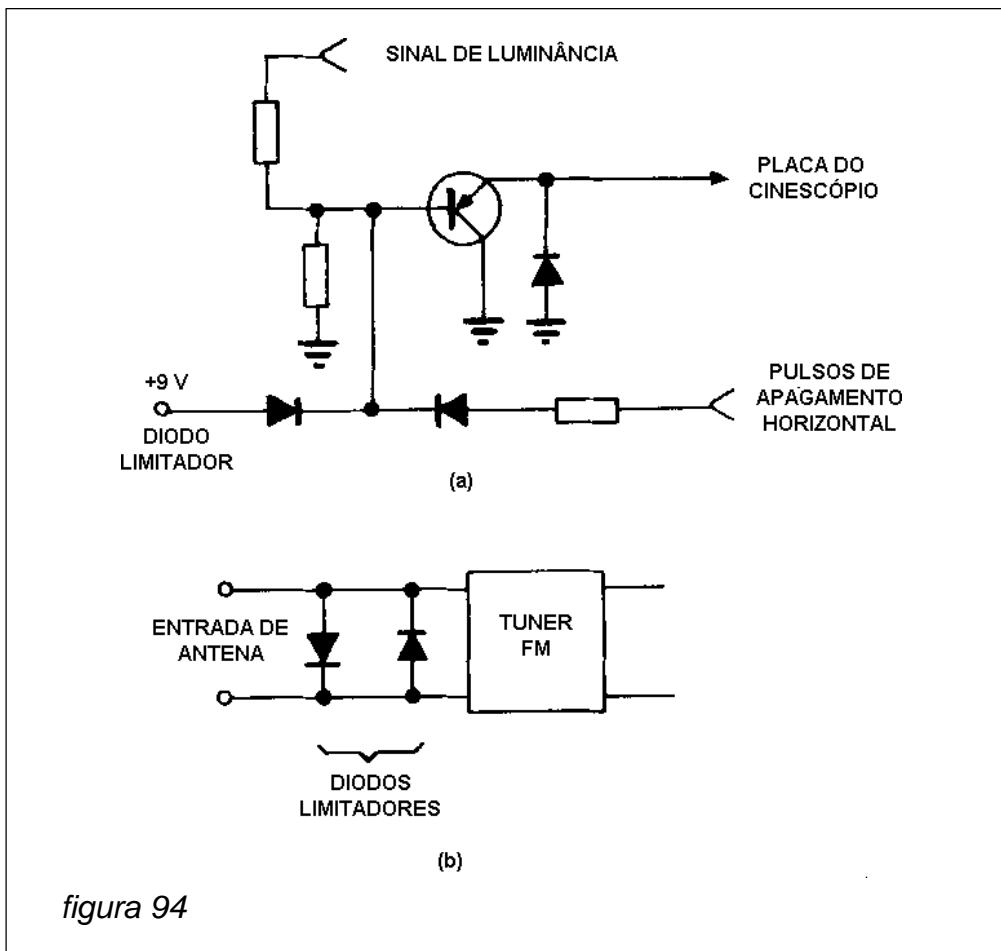
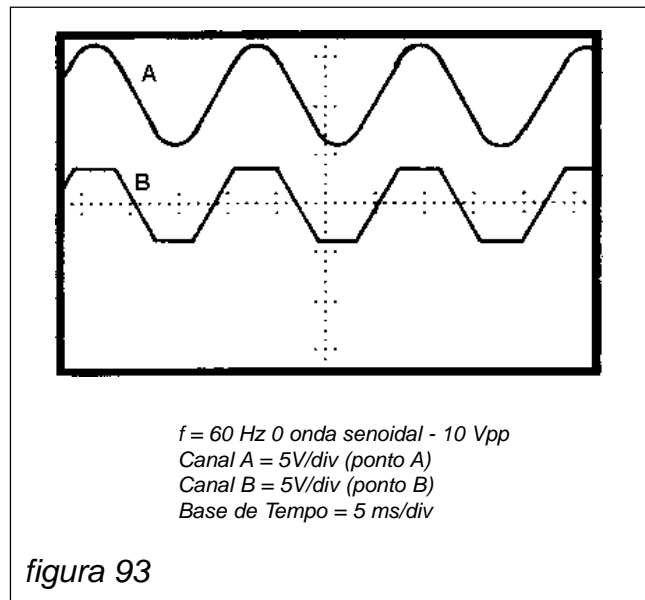
Uma outra aplicação para o diodo, em conjunto com um capacitor, é na formação de um circuito denominado “grampeador DC”, que é uma variação do circuito limitador que acabamos de ver.

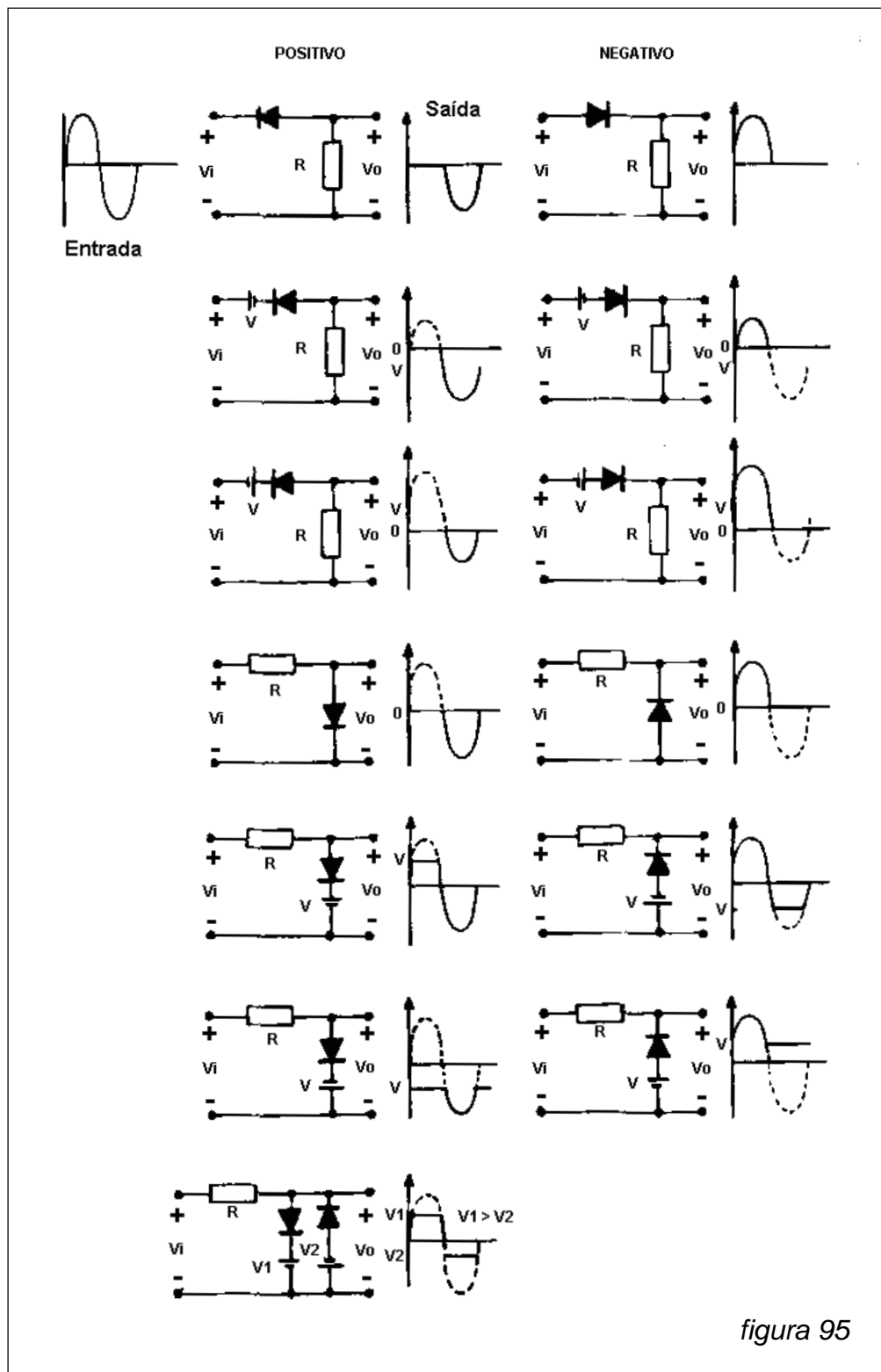
O grampeador DC não é como um grampo de diodo, portanto não devemos confundir os dois circuitos. O grampeador DC soma a tensão DC de pico ao sinal.

Por exemplo, se o sinal que chega ao grampeador DC varia entre -5V e +5V, o grampeador DC positivo o desloca para variar entre 0 e +10V, enquanto um grampeador negativo o leva a uma oscilação entre 0 e -10V.

A **figura 96** mostra um grampeador DC positivo, com o osciloscópio sendo ligado ao circuito para monitorar a forma de onda da entrada e da saída.

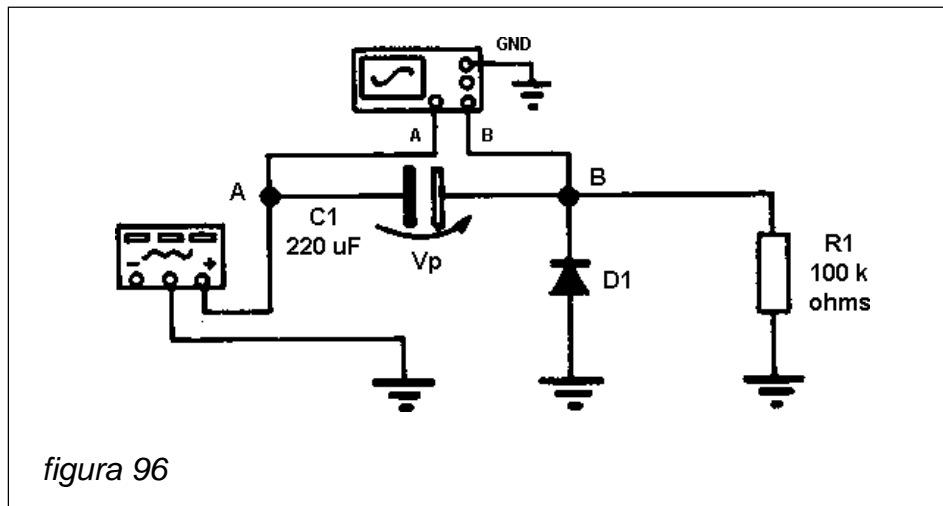
No primeiro semi-ciclo negativo da tensão de entrada, o diodo conduz, carregando o capacitor com a tensão de pico V_p , no sentido indicado na **figura 96**. Logo depois do pico, o diodo fica polarizado reversamente, no entanto, como a constante de tempo RC é propositalmente muito maior do que o período





T do sinal de entrada, o capacitor permanece praticamente com a mesma tensão de pico durante o intervalo em que o diodo fica desligado. É como se o capacitor passasse a ser uma bateria de V_p volts, sendo essa tensão somada ao sinal de entrada para formar o sinal de saída.

Notamos pelas formas de onda da **figura 97** que o sinal foi praticamente todo deslocado acima do eixo. O resíduo negativo se deve à queda direta do diodo de $0,7V$, que faz com que o capacitor não se carregue exatamente com a tensão de pico, sendo descontado esse valor de $0,7V$, e dessa forma o grameador não é totalmente perfeito.



Apenas para comprovação, ligamos o osciloscópio entre os terminais do capacitor para verificar a forma de onda sobre o mesmo - **figura 98**.

Para nos lembrarmos do sentido de deslocamento DC, utilizamos o próprio posicionamento do diodo: a seta formada pelo seu símbolo, sempre aponta o sentido em que o sinal se desloca.

O grampeador DC é utilizado em televisão para somar uma tensão DC ao sinal de vídeo antes dele ser aplicado ao estágio amplificador de vídeo, de modo a recuperar o nível DC perdido com os acoplamentos capacitivos existentes nos diversos circuitos pelos quais o sinal de vídeo passou. Nessa aplicação, o grampeador é chamado "restaurador DC".

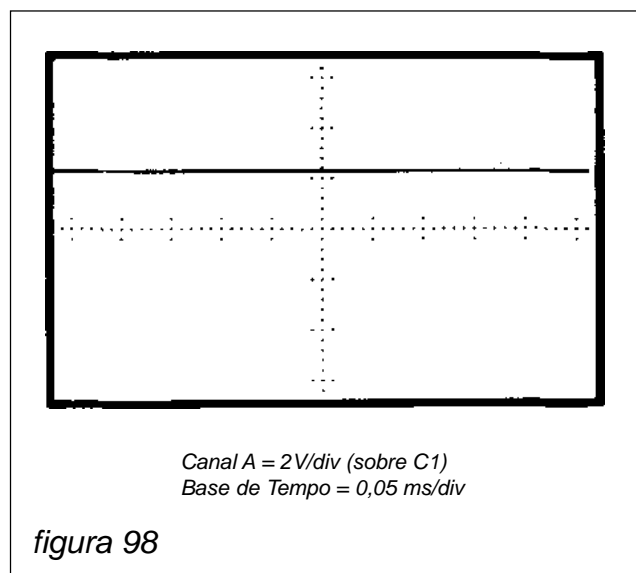
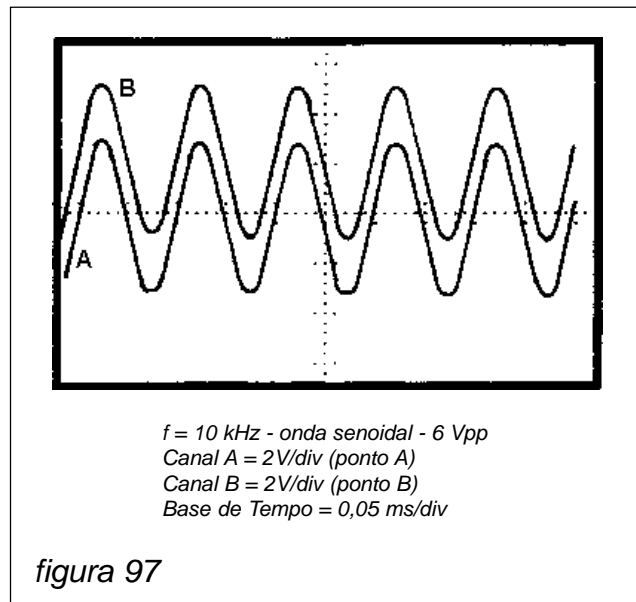
Existe ainda outros circuito que utilizam diodos e capacitores, que vamos estudar a seguir: o retificador de pico a pico e os multiplicadores de tensão.

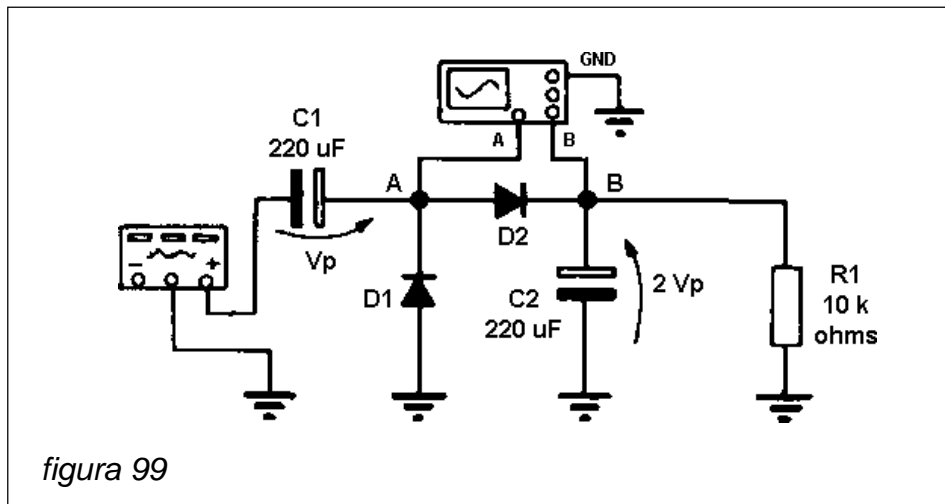
RETIFICADOR DE PICO A PICO

O grampeador de pico a pico, basicamente, é formado pela associação série de um grampeador DC e um retificador de pico - **figura 99**.

No primeiro circuito, a senóide de entrada é grampeada positivamente, de modo que teremos na entrada do segundo circuito uma senóide com o valor de pico de $2V_p$. Pronto, está explicado porque a saída do segundo circuito, o retificador de pico, é uma tensão DC igual a $2V_p$. Acompanhe as formas de onda da **figura 100**, onde o canal A mostra a saída do grampeador DC e o canal B a saída do retificador de pico.

Novamente, para que o circuito funcione a





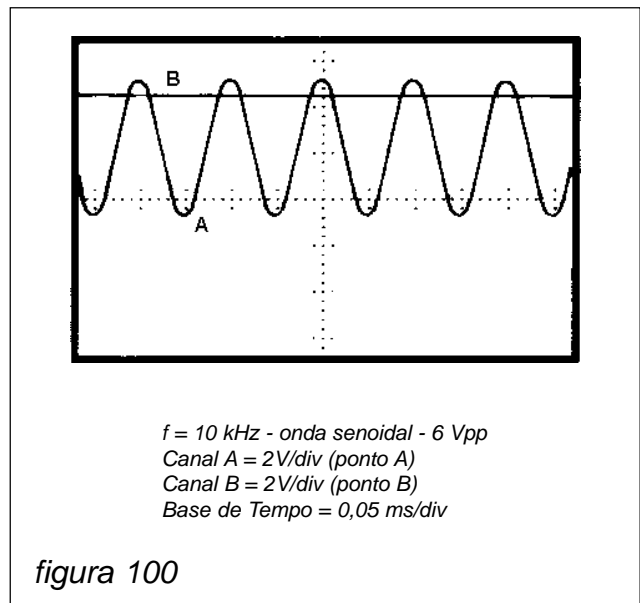
contendo, precisamos garantir que a constante de tempo de descarga RC seja muito maior do que o período do sinal de entrada, garantindo assim uma mínima ondulação na tensão de saída.

O retificador de pico a pico pode ser utilizado como um circuito de entrada em um voltímetro DC, sendo útil na medição de tensões incomuns. Por exemplo, se tentamos medir um sinal que varie entre -10V e +30V com um voltímetro AC comum, teremos uma leitura incorreta. Usando o detector de pico a pico associado na entrada de um voltímetro DC, teremos a leitura de 40V, igual ao valor de pico a pico do sinal.

MULTIPLICADORES DE TENSÃO

Basicamente, um multiplicador de tensão é formado pela associação de dois ou mais retificadores de pico, produzindo na saída uma tensão DC igual a um múltiplo da tensão de pico de entrada (2Vp, 3Vp, 4Vp, etc.).

Geralmente, os multiplicadores de tensão formam fontes de alta tensão / baixa corrente para alimentar dispositivos como os tubos de imagem dos televisores, tubos de osciloscópios e monitores de vídeo dos computadores.



DOBRADOR DE TENSÃO DE MEIA ONDA

O dobrador de tensão de meia onda é o próprio circuito retificador de pico a pico que já estudamos, dispensando maiores comentários. Apenas ressaltamos que o circuito é chamado de dobrador de meia onda por que o capacitor de saída se carrega somente uma vez durante cada ciclo, e portanto a frequência da ondulação é de 60 Hz.

DOBRADOR DE TENSÃO DE ONDA COMPLETA

Na **figura 101** temos o arranjo dos componentes (diodos e capacitores) formando o dobrador de onda completa. No semi-ciclo positivo da senóide de entrada, D1 conduz e o capacitor C1 se carrega até a tensão de pico, no sentido indicado. No semi-ciclo negativo, D2 é quem conduz, carregando C2 também com a

tensão de pico.

Como a tensão da saída é a soma das tensões dos capacitores, ela será equivalente a $2V_p$.

Como nos dois semi-ciclos ocorre a carga de um dos capacitores, a ondulação da saída é de 120 Hz, daí ser chamado de dobrador de onda completa.

A desvantagem do dobrador de onda completa é a falta de um terra comum entre saída e entrada.

Para uma simetria na descarga dos dois capacitores, devemos ter $C_1 = C_2$, mantendo a constante de tempo de descarga RC muito maior do que o período da fonte de entrada.

TRIPLICADOR DE TENSÃO

O triplicador de tensão consiste na associação de três retificadores de pico (**figura 102**), onde o capacitor C_1 se carrega com a tensão V_p , no primeiro semi-ciclo negativo.

No próximo semi-ciclo, positivo, a tensão da fonte se soma com a tensão de C_1 , carregando C_2 com $2V_p$, através do diodo D_2 .

Com C_1 e C_2 carregados, o próximo semi-ciclo negativo, além de repor a carga de C_1 , se soma com a carga de C_2 para carregar C_3 com $2V_p$.

Tomando a saída entre o terminal positivo de C_3 e o terminal negativo de C_1 temos a tensão de $3V_p$.

QUADRUPLICADOR DE TENSÃO

Acrescentando mais um retificador de pico ao triplicador, passamos a ter um circuito quadruplicador de tensão - **figura 103**.

O primeiro capacitor carrega-se até V_p , enquanto os demais atingem a tensão de $2V_p$. A saída é tomada entre o terminal positivo de C_4 e o terminal negativo de C_2 , ambos com $2V_p$, formando portanto a tensão de $4V_p$.

Podemos associar indefinidas seções para obtermos outros múltiplos da tensão de pico de entrada, no entanto, a ondulação vai aumentando a cada seção adicional. Por isso, os multiplicadores de tensão geralmente não são usados em fontes de baixa tensão, sendo aplicados para a produção de altas tensões, de centenas ou milhares de volts, mas para alimentar uma grande resistência de carga.

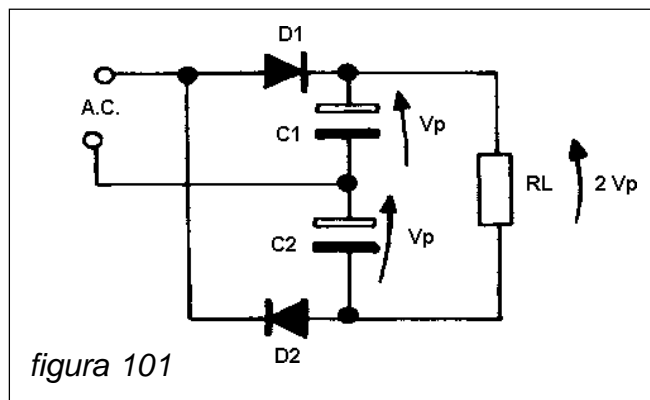


figura 101

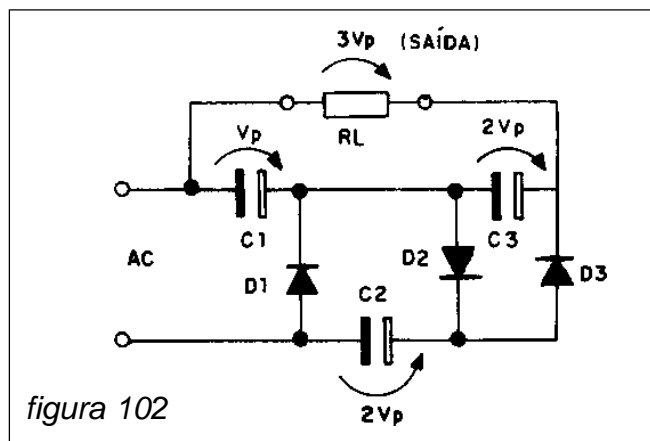


figura 102

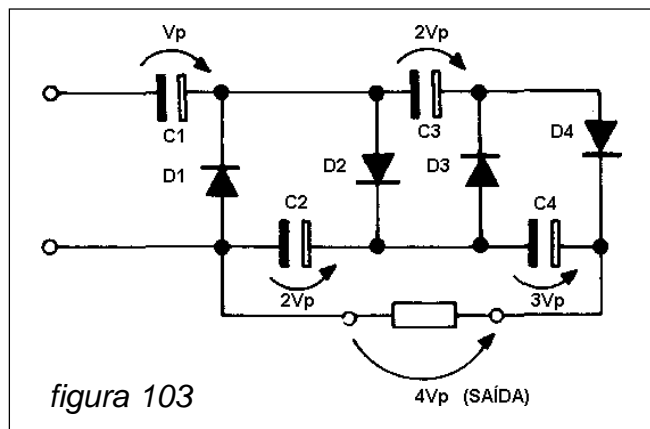


figura 103



**COPYRIGHT BY
ALDOBERTO LOPES
ECCEL ELETRÔNICA
www.eccel.com.br
©1996-2008**