

## Capítulo 2 – Diodos e Circuitos Retificadores com Diodo

### 2.1 – Introdução e Características Básicas do Diodo Semicondutor

O diodo é o primeiro componente semicondutor a ser estudado ao longo do nosso curso de Eletrônica Analógica. O seu perfeito entendimento irá auxiliar a compreensão de outras estruturas mais complexas no futuro, pois todos os componentes eletrônicos, incluindo transistores, reguladores de tensão, circuitos integrados, memórias, microcontroladores, amplificadores operacionais, tiveram como sua "origem", o diodo semicondutor.

O funcionamento do diodo semicondutor é exatamente igual ao funcionamento de uma chave, ou de um interruptor de luz residencial, o mesmo que é usado para acender ou apagar uma lâmpada em um cômodo ou ambiente.

A diferença está basicamente, na forma em que essa interrupção de corrente ocorre. No caso do interruptor de luz, é necessário, na maioria das vezes, que a ação do usuário seja necessária, fazendo com que a sua mão realize a função de chaveamento do interruptor. Já no caso do diodo, a interrupção é realizada através da forma de polarização do seu circuito, onde as opções disponíveis são: polarização direta ou polarização reversa.

A polarização é o nome dado ao ponto de operação (valores de tensão e corrente) em que o circuito ou o componente em específico irá funcionar. No caso do diodo, a Figura 2.1 apresenta as formas de polarização do diodo em função do circuito equivalente desejado.

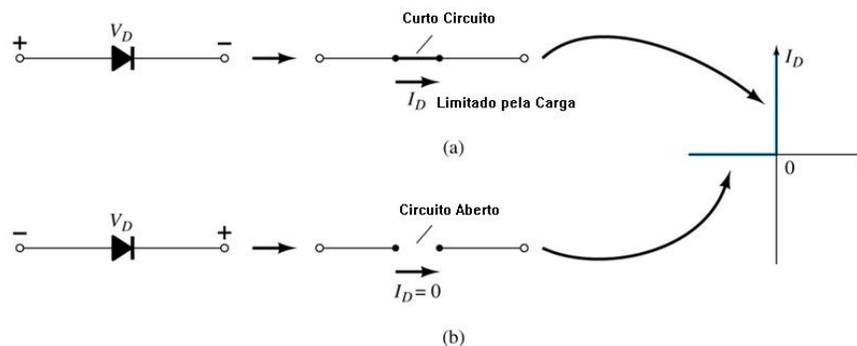


Figura 2.1 – Diodo direta/reversamente polarizado (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

Como já mencionado anteriormente, o diodo é o primeiro e um dos principais semicondutores a ser estudado no curso de eletrônica. Um semicondutor é um tipo de material que apresenta certo nível de condutividade entre os seus terminais.

Para efeito de comparação, observe através da Tabela 2.1, os valores de resistividade (resistência de um determinado material a passagem da corrente) entre um material isolante, um condutor e um semicondutor.

Tabela 2.1 – Comparação entre níveis de resistividade: condutor, isolante e semicondutor

Condutor	Isolante	Semicondutor
$\rho \approx 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (cobre)	$\rho \approx 10^{-12} \Omega \cdot \text{cm}$ (mica)	$\rho \approx 50 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ (silício)

A estrutura interna de um diodo é composta basicamente por um material semicondutor (silício na sua maioria) contendo um determinado nível de impureza. Essa impureza tem como objetivo, modificar as características originais do semicondutor para características desejadas a partir de determinadas especificações. A esses novos tipos de materiais, dá-se o nome de materiais dopados ou extrínsecos do tipo N e do tipo P.

## 2.2 – Materiais do tipo N e do tipo P

### 2.2.1 – Materiais do tipo N

O material do tipo N é criado através da adição de elementos químicos que apresentam 5 elétrons livres em sua última camada de valência, recebendo o nome de átomos doadores. Dessa forma, no material do tipo N, existe uma grande quantidade de elétrons livres, que são chamados de portadores majoritários.

Note que na Figura 2.2(b) a seguir, a combinação do elemento Antimônio com o Silício, 4 elétrons são agrupados a estrutura do Silício, porém um elétron sempre fica livre, caracterizando o portador majoritário negativo.

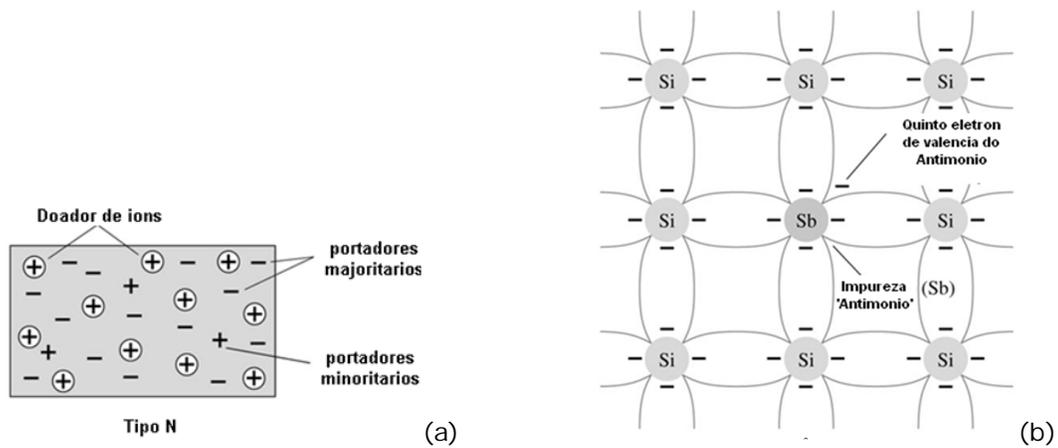


Figura 2.2 – Material do tipo N (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

### 2.2.2 – Materiais do tipo P

Já os materiais do tipo P são criados através da adição de elementos químicos que apresentam 3 elétrons livres em sua última camada de valência. Dessa forma, no material do tipo P, existe uma grande quantidade de prótons livres, não combinados com um elétron que está faltando, graças à ausência de um elemento de valência na última camada da impureza adicionada. No material do tipo P, agora, são as cargas positivas os portadores majoritários.

Note que na Figura 2.3(b) a seguir, a combinação do elemento Bório com o Silício, 3 elétrons são agrupados a estrutura do Silício, porém um elétron fica ausente, caracterizando o portador majoritário positivo.

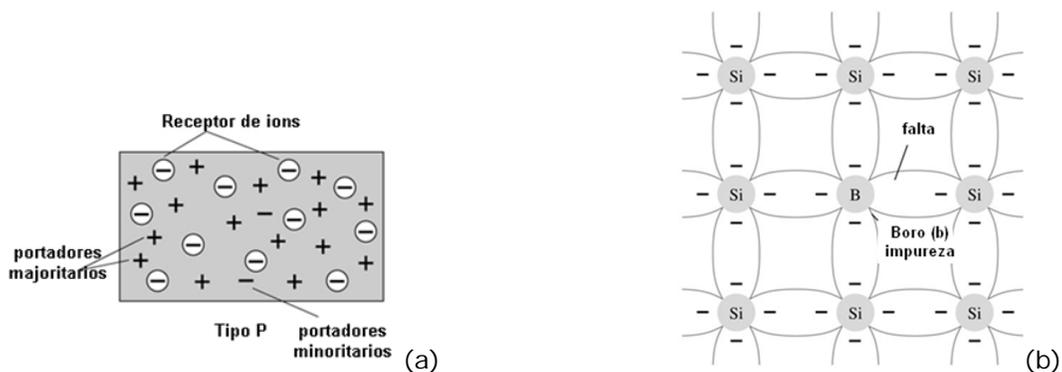


Figura 2.3 – Material do tipo P (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

O diodo é formado basicamente, pela união desses dois materiais, N e P, formando a junção PN, onde essa pode estar diretamente polarizada ou reversamente polarizada. A Figura 2.5 abaixo mostra a associação dos materiais P e N com os terminais do diodo. Esses terminais recebem o nome de anodo e de catodo, respectivamente.

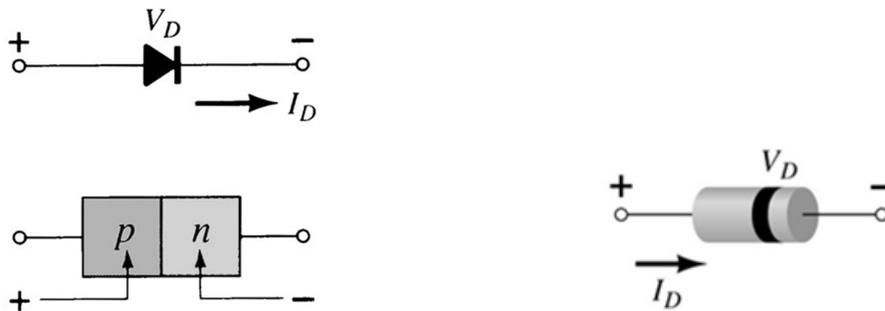


Figura 2.5 – Junção PN e o diodo real (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

### 2.3 – A Curva do Diodo e as suas Características

O estudo nesse momento será focado no funcionamento real do dispositivo, baseado nas características gerais de funcionamento, apresentadas no item 2.1 desse capítulo.

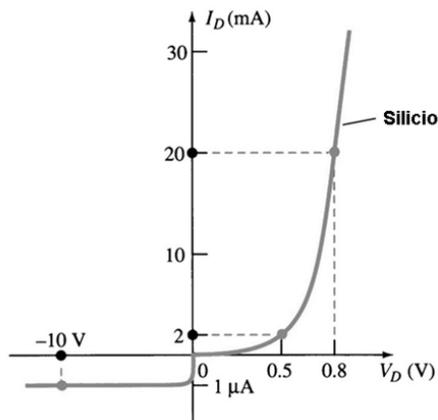


Figura 2.6 – Curva real de funcionamento do diodo (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

Analisando o gráfico apresentado pela Figura 2.6, é possível apresentar algumas importantes relações e conclusões sobre o funcionamento real do dispositivo:

- ✓ A equação característica que determina o funcionamento do diodo, a partir da sua curva real é dada por:

$$I_D = I_s \cdot \left( e^{K \cdot \left( \frac{V_D}{T} \right)} - 1 \right), \text{ onde } T \text{ é a temperatura em Kelvins, } K \text{ é a constante}$$

do material semiconductor utilizado (5800 para o Silício) e  $I_s$  é a corrente de saturação;

- ✓ Existe uma queda de tensão de aproximadamente 0.7 Volts entre os terminais do diodo real, quando o mesmo está em funcionamento;
- ✓ A corrente nunca será igual a zero quando ele for reversamente polarizado ( $I_s$ );
- ✓ Existirão ainda, valores de resistências AC e DC associados ao seu ponto de operação, valores esses que são determinados em função do tipo de polarização utilizada: por corrente alternada ou por corrente contínua;

- o Exemplos Resistência DC:

- $R_{D1} = 0.5 / 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $R_{D1} = 250\Omega$
- $R_{D2} = 0.8 / 20 \cdot 10^{-3}$ ,  $R_{D2} = 40\Omega$
- CONCLUSÃO: quanto maior for a corrente sobre o diodo, mais desprezível será o valor da sua resistência DC

- ✓ Para a análise AC, a relação é análoga, porém utiliza-se o conceito de variação infinitesimal sobre o ponto de operação DC, onde  $r_D = \delta V_D / \delta I_D$ . A Figura 2.7 ilustra essa variação a partir de um ponto real de operação.
- ✓ Se aplicarmos o conceito de reta tangente sobre o ponto de operação, temos na verdade a operação matemática de diferenciação da função associada à curva apresentada. Fazendo essa diferenciação, a partir da equação característica, será obtido como resultado,  $r_D \approx 26\text{mV} / I_D$ .

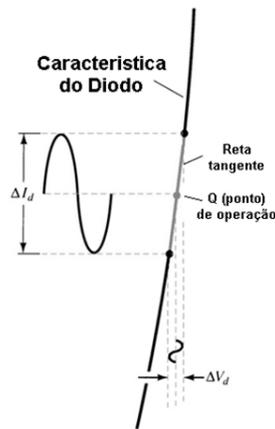


Figura 2.7 – Determinação da resistência AC (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

Sendo assim, a partir do exposto acima, é possível representar um diodo real usando três elementos de circuito: uma fonte  $V$  de valor igual a 0,7 Volts, um resistor  $R$  ( $r_{av}$ ) e o próprio diodo, já previamente demonstrado a sua simbologia de circuito. A Figura 2.8 a seguir, mostra o diodo real.

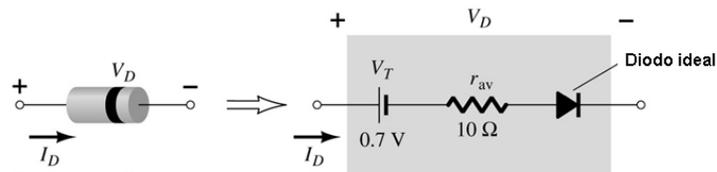


Figura 2.8 – Diodo Real (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

Para algumas aplicações, é possível que esse modelo real possa ser simplificado, eliminando-se o resistor  $R$ , caso a corrente  $I_D$  assuma um valor grande, comparado a tensão de 0,7 Volts.

## 2.4 – O Circuito Retificador

O retificador é o circuito eletrônico responsável pela conversão de um sinal AC (alternado) em um sinal DC (contínuo), através da utilização de um ou mais

diodos. O sinal de saída obtido em um retificador é um sinal composto por uma parcela AC e por uma parcela DC, onde o objetivo final é minimizar a parcela AC e maximizar a parcela DC, através de técnicas que serão estudadas e apresentadas mais adiante.

Os circuitos retificadores que serão estudados são formados por um, dois ou quatro diodos, os quais recebem o nome de 1/2 onda, onda completa e ponte, respectivamente.

### 2.4.1 – O Retificador de 1/2 Onda

O circuito retificador de 1/2 onda utiliza apenas um único diodo, fazendo com que o semi-ciclo negativo do sinal senoidal seja eliminado. Com isso, a simetria existente no sinal original é perdida, e uma parcela de tensão DC surge no sinal retificado, como já era esperado. A Figura 2.9 a seguir, ilustra o circuito retificador básico, excitado por um sinal senoidal  $v_i(t) = V_m \cdot \sin(\omega t)$ .

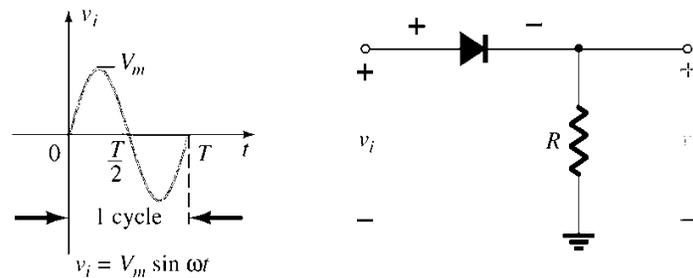


Figura 2.9 – Retificador 1/2 Onda (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

Como já mencionado anteriormente, no primeiro semi-ciclo da senóide (Figura 2.10), o diodo estará diretamente polarizado, assumindo um curto circuito equivalente entre os seus terminais, e provocando uma queda de tensão igual a 0,7 Volts, fazendo com que o valor máximo do sinal de saída  $V_o$  seja igual à  $(V_m - 0,7)$ .

Já no segundo semi-ciclo (Figura 2.11), o diodo estará reversamente polarizado, fazendo com que a tensão de saída passe ser igual a zero volts, devido ao diodo se comportar como um circuito aberto nessa condição.

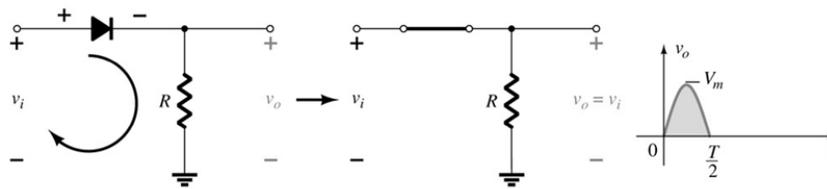


Figura 2.10 – 1º Semi-ciclo de funcionamento (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

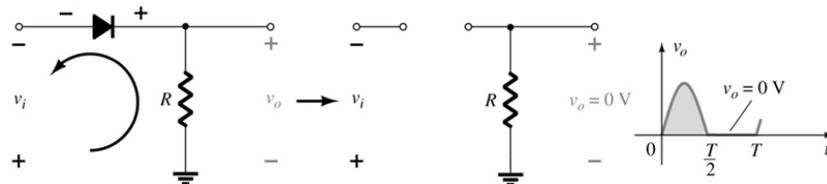


Figura 2.11 – 2º semi-ciclo de funcionamento (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

O valor da tensão média ( $V_{MÉDIO}$ ) e eficaz ( $V_{EFICAZ}$ ) em um retificador de meia onda pode ser obtido a partir das definições apresentadas no capítulo 1, usando um cálculo integral a partir do sinal de saída apresentado pela Figura 2.10 e pela Figura 2.11 anteriormente.

$$V_{MÉDIO} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot dt \cong 0,318 \cdot (V_{MÁX.} - 0,7) \quad [V_{DC}]$$

$$V_{EFICAZ} = \sqrt{\left( \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t)^2 \cdot dt \right)} \cong 0,5 \cdot (V_{MÁX.} - 0,7) \quad [V_{EF}]$$

- ✓ **OBSERVAÇÃO:** quando o diodo está “cortado”, toda a tensão da fonte, do seu semiciclo negativo, recai sobre os terminais do diodo. A essa tensão, da-se o nome de PIV – *Peak Inverse Voltage*, ou tensão de pico reverso. Dessa forma, é importante que o seu valor não ultrapasse o valor máximo de polaridade reversa informado no *datasheet* do componente  $V_{PIV} \geq V_{MÁX.}$

✓ **Parte Prática**

No circuito retificador a ser montado no kit da BIT9, considere a tensão a ser aplicada no circuito igual a  $15 V_{RMS}$ . Considere a queda de tensão sobre o diodo como sendo de 0,7V. Calcule a tensão de pico reversa sobre o diodo, a tensão média ( $V_{MÉDIO}$ ) e a tensão eficaz ( $V_{EFICAZ}$ ) sobre a resistência  $R_L$ , a corrente média e a frequência da ondulação. Registre os valores calculados na Tabela 2.2 a seguir.

Tabela 2.2 – Parte Prática Retificador de ½ Onda

Grandezas	Calculado/Teórico	Medido
Tensão Eficaz Entrada		
Tensão de Pico Entrada		
Tensão Média Saída		
Tensão Eficaz Saída		
Corrente Média Diodo		
Corrente Eficaz Diodo		
Frequência Saída		

## 2.4.2 – O Retificador de Onda Completa

### a) Circuito em ponte

O circuito em ponte emprega 4 diodos devidamente posicionados e interligados, conforme é apresentado pela Figura 2.12 a seguir. Esse circuito recebe o nome também, de retificador de onda completa, pois aproveita toda a excursão do sinal senoidal, tanto o semiciclo positivo como o semiciclo negativo (que era “desprezado” no retificador de ½ onda). Por esse motivo, existe uma melhoria significativa no valor do nível DC de tensão de saída, além de apresentar um sinal retificado com o dobro da frequência do sinal de entrada do circuito.

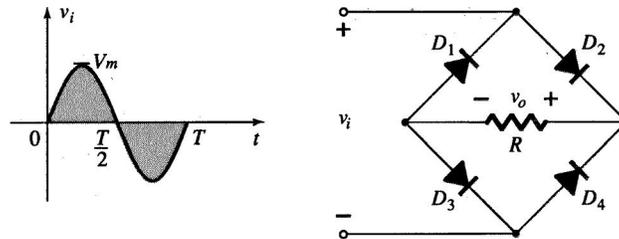


Figura 2.12 – Circuito retificador em ponte (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

O princípio de funcionamento é bastante simples, sendo que somente existirão dois diodos conduzindo por cada semiciclo. As Figuras 2.13 e 2.14 mostram quais diodos estão conduzindo e quais diodos estão “cortados” em cada semiciclo do sinal senoidal.

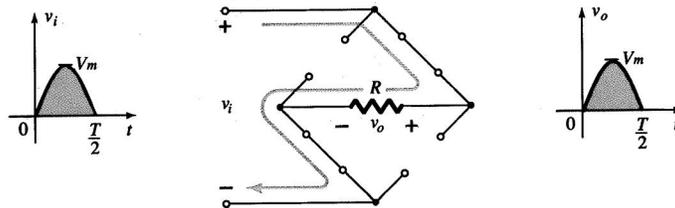


Figura 2.13 – 1º Semi-ciclo de funcionamento (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

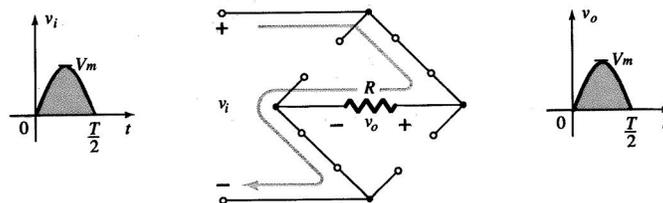


Figura 2.14 – 2º Semi-ciclo de funcionamento (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

O valor da tensão média ( $V_{MÉDIO}$ ) e eficaz ( $V_{EFICAZ}$ ) em um retificador de onda completa em ponte pode ser obtido a partir das definições apresentadas no Capítulo 1, usando um cálculo integral a partir do sinal de saída apresentado pelas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14 anteriormente.

$$V_{MÉDIO} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot dt \cong 0,636 \cdot (V_{MAX.} - 1,4) \quad [V_{DC}]$$

$$V_{EFICAZ} = \sqrt{\left( \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t)^2 \cdot dt \right)} \cong \frac{(V_{MAX.} - 1,4)}{\sqrt{2}} \quad [V_{EF}]$$

- ✓ **OBSERVAÇÃO:** quando o diodo está “cortado”, toda a tensão da fonte, recai sobre os terminais do diodo. Dessa forma, é importante que o seu valor não ultrapasse o valor máximo de polaridade reversa informado no *datasheet* do componente  $V_{PIV} \geq V_{MAX.}$

✓ **Parte Prática**

No circuito retificador a ser montado no kit da BIT9, considere a tensão a ser aplicada no circuito igual a 15  $V_{RMS}$ . Considere a queda de tensão sobre o diodo como sendo de 1,4V. Calcule a tensão de pico reversa sobre o diodo, a tensão média ( $V_{MÉDIO}$ ) e a tensão eficaz ( $V_{EFICAZ}$ ) sobre a resistência  $R_L$ , a corrente média e a frequência da ondulação. Registre os valores calculados na Tabela 2.3 a seguir.

Tabela 2.3 – Parte Prática Retificador de Onda Completa – Circuito em Ponte

Grandezas	Calculado/Teórico	Medido
Tensão Eficaz Entrada		
Tensão de Pico Entrada		
Tensão Média Saída		
Tensão Eficaz Saída		
Corrente Média Diodo		
Corrente Eficaz Diodo		
Frequência Saída		

**b) Circuito com tap central**

O circuito com tap central emprega o mesmo conceito do retificador de onda completa, apresentado no item a, porém agora usando apenas dois diodos, ao invés de 4 diodos, como no retificador em ponte.

Basicamente, o circuito com tap central nada mais é do que a soma de dois circuitos retificadores de meia onda, formando um retificador de onda completa. A Figura 2.15 a seguir, mostra o circuito retificador com tap central.

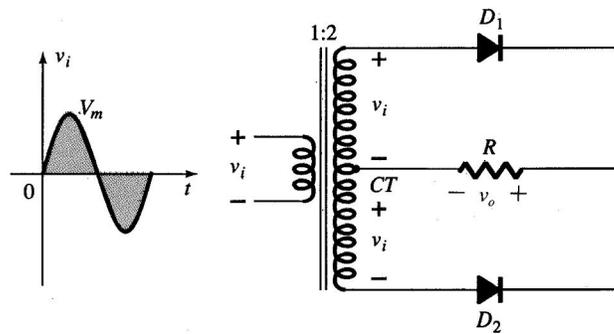


Figura 2.15 – Circuito retificador com tap central (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

O valor da tensão média ( $V_{MÉDIO}$ ) e eficaz ( $V_{EFICAZ}$ ) em um retificador de onda completa com tap central pode ser obtido a partir das definições apresentadas no capítulo 1, usando um cálculo integral a partir do sinal de saída apresentado pelas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14 anteriormente.

$$V_{MÉDIO} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot dt \cong 0,636 \cdot (V_{MÁX.} - 0,7) \quad [V_{DC}]$$

$$V_{EFICAZ} = \sqrt{\left( \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t)^2 \cdot dt \right)} \cong \frac{(V_{MÁX.} - 0,7)}{\sqrt{2}} \quad [V_{EF}]$$

- ✓ **OBSERVAÇÃO:** quando o diodo está “cortado”, toda a tensão da fonte, somado com a tensão existente sobre a carga, recai sobre os terminais do diodo. Dessa forma, é importante que o seu valor não ultrapasse o valor máximo de polaridade reversa informado no *datasheet* do componente  $V_{PIV} \geq 2V_{MAX}$ .

#### ✓ Parte Prática

No circuito retificador a ser montado no kit da BIT9, considere a tensão a ser aplicada no circuito igual a 15  $V_{RMS}$ . Considere a queda de tensão sobre o diodo como sendo de 0,7V. Calcule a tensão de pico reversa sobre o diodo, a tensão média ( $V_{MÉDIO}$ ) e a tensão eficaz ( $V_{EFICAZ}$ ) sobre a resistência  $R_L$ , a corrente média e a frequência da ondulação. Registre os valores calculados na Tabela 2.4 a seguir.

Tabela 2.4 – Parte Prática Retificador de Onda Completa – Circuito em Ponte

Grandezas	Calculado/Teórico	Medido
Tensão Eficaz Entrada		
Tensão de Pico Entrada		
Tensão Média Saída		
Tensão Eficaz Saída		
Corrente Média Diodo		
Corrente Eficaz Diodo		
Frequência Saída		

## 2.5 – Fator de *Ripple* (ondulação) em retificadores

O fator *ripple* é a ondulação AC presente no sinal de saída do circuito retificador, seja em ½ onda ou em onda completa, através da seguinte relação matemática:

$$Ripple = \frac{V_R}{V_{DC}}, \text{ onde } V_R \text{ é a componente AC do sinal retificado e } V_{DC} \text{ é o valor médio}$$

O valor da componente AC do sinal retificado pode ser obtido através das relações de potência:

$$P_{EF} = P_{DC} + P_{AC} \rightarrow \frac{V_{EF}^2}{R} = \frac{V_{DC}^2}{R} + \frac{V_{AC}^2}{R} \therefore V_{AC} = \sqrt{V_{EF}^2 - V_{DC}^2}$$

Para um retificador de onda completa, desprezando os efeitos das quedas de tensão sobre os diodos, temos:

$$V_R = 0,3077 * V_{MÁX} \quad [Volts]$$

Substituindo o valor obtido acima na equação que define o valor do *ripple*, temos:

$$Ripple = \frac{V_R}{V_{DC}} \rightarrow \frac{0,3077 * V_{MÁX}}{0,636 * V_{MÁX}} \therefore Ripple_{o.c.} \cong 0,483$$

Aplicando as mesmas relações apresentadas acima, porém agora para o retificador de meia onda, temos:

$$Ripple = \frac{V_R}{V_{DC}} \rightarrow \frac{0,3856 * V_{MÁX}}{0,318 * V_{MÁX}} \therefore Ripple_{1/2 ONDA} \cong 1,21$$

## 2.6 – Capacitor de filtragem

Com o objetivo de elevar o nível de tensão DC da saída do circuito retificador, diminuindo a parcela AC presente na retificação (diminuir o *ripple* do circuito), um capacitor eletrolítico (polarizado) será adicionado ao circuito retificador, em paralelo com a resistência  $R_L$  de saída.

O circuito retificador passará a operar com a carga e descarga do capacitor, permitindo com isso, o uso da sua energia armazenada para auxiliar a manter o nível de tensão DC na saída do retificador.

A Figura 2.16 mostra a forma de onda de um circuito retificador de onda completa, e uma forma de onda triangular aproximada, que á forma de onda que representa a relação de carga e descarga capacitiva. A Figura 2.17 mostra essa forma de onda triangular em destaque.

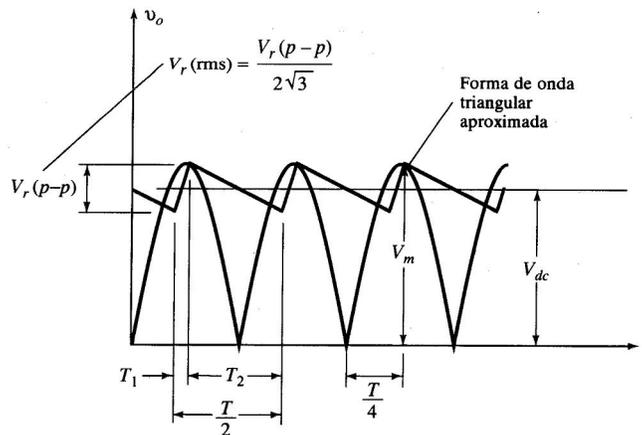


Figura 2.16 – Circuito retificador com filtro capacitivo (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

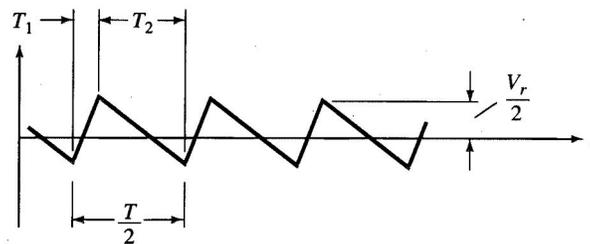


Figura 2.17 – Forma de onda triangular (Robert L. Boylestad, *Disp. e Circ. Eletrônicos*)

A partir da observação das Figuras 2.16 e 2.17, o equacionamento abaixo é apresentado com o objetivo de encontrar a relação do capacitor desejado, em função da corrente de carga e do valor de *ripple* desejado.

$$\frac{V_{RPP}}{T} = \frac{V_{MÁX}}{T} \rightarrow T_1 = \frac{V_{RPP} * T}{4 * V_{MÁX}} \quad \text{Equação 1}$$

$$T_2 = \frac{T}{2} - T_1 \rightarrow T_2 = \frac{2 * V_{MÁX} - V_{RPP} * T}{V_{MÁX}}$$

Equação 2

$$V_{DC} = V_{MÁX} - \frac{V_{RPP}}{2}$$

Equação 3

$$V_{RPP} = \frac{I_{DC} * T_2}{C}$$

Equação 4

Substituindo a equação 4 na equação 3, temos:

$$T_2 = \frac{V_{DC} * T}{V_{MÁX}}$$

Equação 5

Substituindo a equação 5 na equação 4, temos:

$$V_{RPP} = \frac{V_{DC} * I_{DC}}{2 * V_{MÁX} * C * f}$$

Equação 6

Caso a tensão  $V_R$  seja especificada em valores eficazes, temos:

$$V_{R_{EF}} = \frac{V_{DC} * I_{DC}}{4\sqrt{3} * V_{MÁX} * C * f}$$

Equação 6

✓ Considerações Importantes:

- Aumentando o valor do capacitor  $C$ , o valor da tensão de *ripple*  $V_R$  diminui, proporcionando um aumento do valor da tensão de saída  $V_{DC}$ ;
- Aumentando a corrente de carga  $I_{DC}$ , mantendo todos os demais itens constantes, o valor da tensão  $V_R$  aumenta;
- O cálculo acima fornece uma idéia inicial do valor do capacitor, sendo passível de ajustes na prática.