

Sumário

Introdução	5
Retificação de onda completa	6
Retificação de onda completa com derivação central	7
Funcionamento	7
Tensão e corrente de saída	10
Retificação de onda completa em ponte	15
Funcionamento	16
Tensão e corrente de saída	20
Fonte de alimentação de onda completa	23
Pontes retificadoras comerciais	26
Apêndice	28
Questionário	28
Bibliografia	28



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

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

Introdução

A retificação de meia onda tem aplicações muito restritas devido à baixa eficiência e a grande variação no tempo da tensão de saída.

Esses efeitos podem ser minimizados pelo uso de um **circuito retificador de onda completa**, que possibilita não só aumentar a eficiência da conversão *ca/cc* como também diminuir a ondulação na tensão de saída do circuito. Por essa razão, essa classe de circuitos retificadores é largamente empregada na maioria dos equipamentos eletrônicos operando no regime de *cc*.

Este fascículo tratará dos circuitos retificadores de onda completa onde será descrito o princípio de funcionamento e a metodologia de cálculo de parâmetros e de pesquisa de defeitos, visando a capacitar o leitor a utilizar e reparar essa categoria de dispositivos.



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

- * Transformadores.
- * Diodo semiconductor.
- * Retificação de meia onda.

Retificação de onda completa

A **retificação de onda completa** é um processo de transformação de *ca* em *cc*, que permite o aproveitamento dos dois semiciclos da tensão de alimentação da carga, conforme ilustrado na **Fig.1**



Fig.1 Diagrama ilustrando o princípio de operação do circuito retificador de onda completa.

O circuito retificador de onda completa é o mais empregado nos equipamentos eletrônicos, pois permite obter um melhor aproveitamento da energia disponível na entrada do circuito.

A retificação de onda completa pode ser realizada com o emprego de um transformador com derivação central e dois diodos semicondutores ou alternativamente, pelo uso de uma ponte de quatro diodos, conforme descrito a seguir.

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA COM DERIVAÇÃO CENTRAL

A retificação de onda completa com derivação central é a denominação técnica que se dá ao circuito retificador de onda completa que emprega dois diodos semicondutores, quando se deriva o terminal negativo de saída do circuito da porção central do secundário do transformador, sendo o terminal positivo considerado no ponto de interconexão dos dois diodos, conforme ilustrado na **Fig.2**.

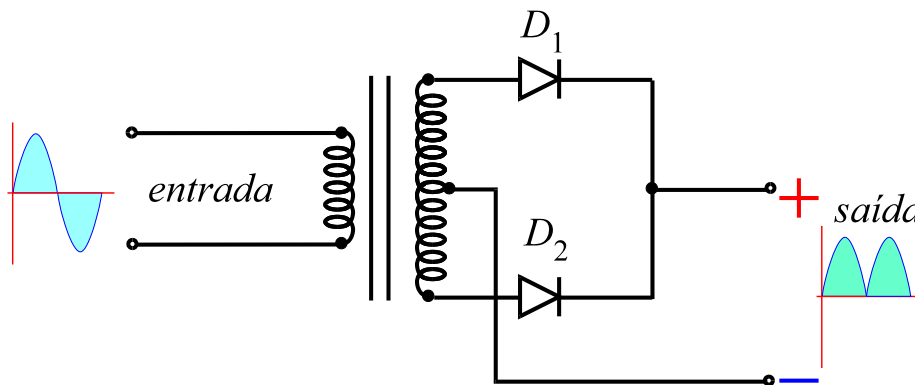


Fig.2 Diagrama de circuito do retificador de onda completa com derivação central.

Esse tipo de configuração também recebe a denominação de *center tap*. A expressão *center tap* é de origem inglesa, sendo traduzida para a língua portuguesa como *derivação central*.

FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do circuito retificador de onda completa com derivação central pode ser compreendido analisando-se a operação do circuito por semiciclo da tensão de entrada, conforme exposto a seguir.

Semiciclo negativo

Estabelecendo-se a referência de potencial no primário e secundário do transformador, conforme indicado na **Fig.3**, verifica-se, que durante o semiciclo negativo da tensão de entrada, o ânodo do diodo D_1 fica submetido a um potencial positivo, ao passo que o ânodo do diodo D_2 fica submetido a um potencial negativo.

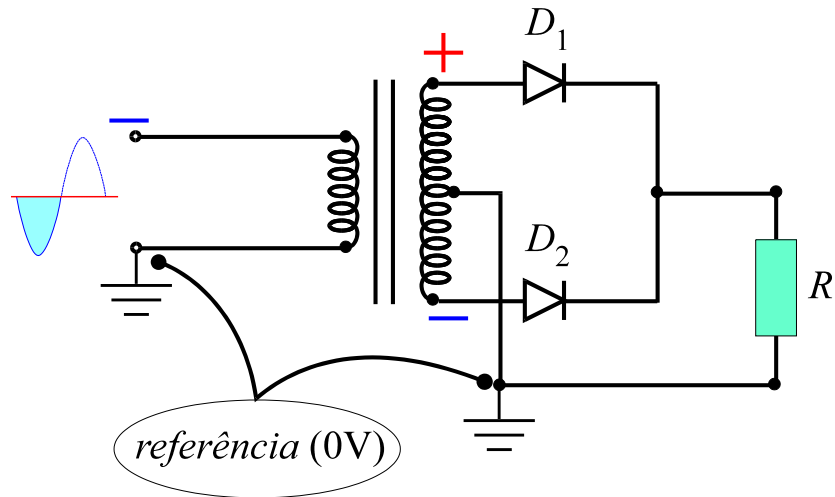


Fig.3 Retificador de onda completa submetido a uma tensão de entrada negativa.

Dessa forma, o diodo D_1 entra no estado de condução enquanto o diodo D_2 entra em bloqueio. Utilizando-se o modelo ideal para o diodo semicondutor, obtém-se o circuito equivalente ilustrado na **Fig.4**. Como pode ser aí observado, a condição de condução de D_1 permite a circulação de corrente através da carga do terminal positivo para o terminal de referência. Nessas condições, a tensão existente no primário é transferida, com uma inversão de sinal, diretamente para a carga.

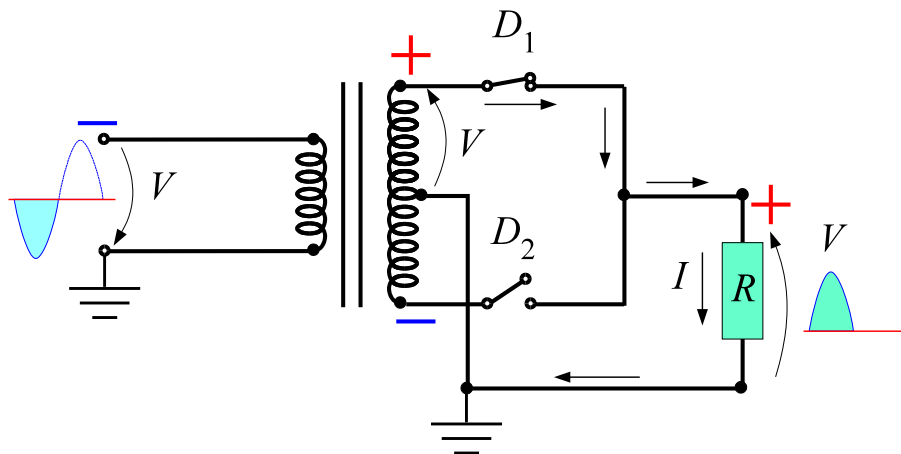


Fig.4 Circuito equivalente para o retificador de onda completa durante o semiciclo negativo.

Semiciclo positivo

Durante o semiciclo positivo, ocorre a inversão de polaridade no secundário do transformador, conforme ilustrado na **Fig.5**. Conseqüentemente, o diodo D_1 torna-se inversamente polarizado entrando em bloqueio. O estado de polarização direta nesse caso ocorre no diodo D_2 , que entra no regime de condução.

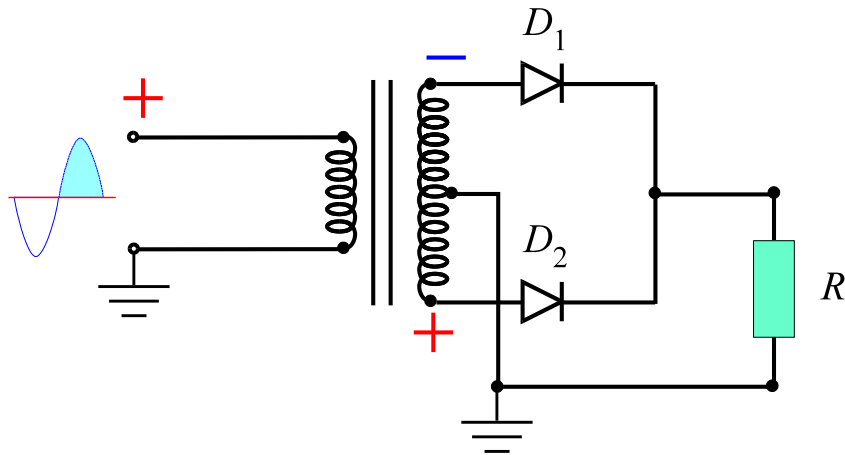


Fig.5 Circuito retificador de onda completa submetido a uma tensão positiva.

O circuito equivalente durante este semiciclo é, portanto, oposto àquele correspondente ao semiciclo negativo, conforme ilustrado na **Fig.6**. A corrente agora circula pela carga, através do diodo D_2 que está em condução. O fluxo de corrente mantém-se no mesmo sentido daquele obtido durante o semiciclo negativo, e a tensão no primário é transferida diretamente para a carga, conforme ilustrado na **Fig.6**.

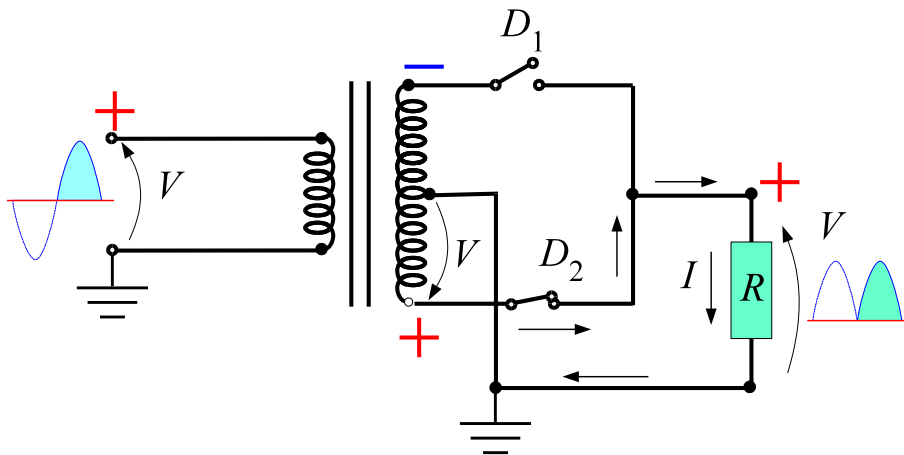


Fig.6 Circuito equivalente para o retificador de onda completa durante o semiciclo positivo.

Analisando-se, portanto, um ciclo completo da tensão de entrada, verifica-se que o circuito retificador transfere para a carga dois semiciclos de tensão positiva com relação à referência de potencial, conforme ilustrado na Fig.7, onde os diodos conduzem isoladamente em cada semiciclo.

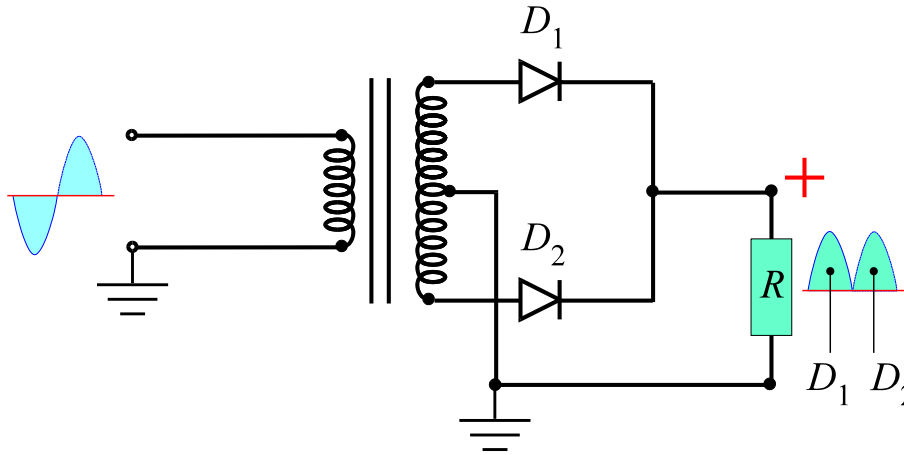


Fig.7 Resposta do retificador durante um ciclo completo na entrada.

TENSÃO E CORRENTE DE SAÍDA

Tensão de saída

A retificação de onda completa com derivação central transfere à carga dois semiciclos positivos de tensão para cada ciclo da tensão de entrada. Como a tensão de saída é formada de pulsos idênticos de tensão, o que é mostrado na Fig.8, a tensão cc que seria medida na carga pode ser obtida determinando-se o valor médio da tensão de saída em apenas um semiciclo da tensão de entrada.

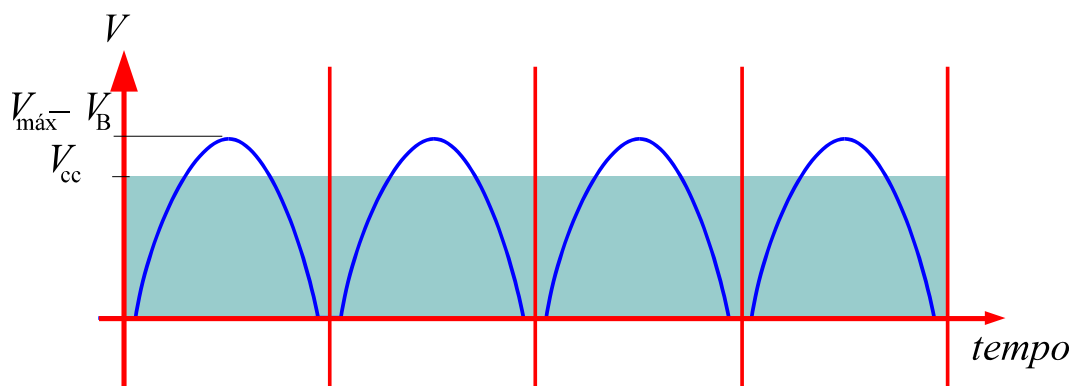


Fig.8 Dependência temporal da tensão na saída do retificador.


Uma vez que a média pode ser calculada em um único semiciclo, o valor a ser obtido deve corresponder ao dobro daquele determinado no caso do retificador de meia onda. Dessa forma, e com base nos resultados obtidos para o retificador de meia onda, a tensão V_{cc} medida na carga é dada por

$$V_{cc} = 2 \left(\frac{V_{\text{máx}} - V_B}{\pi} \right) \quad (1)$$

Inserindo a relação $V_{\text{máx}} = \sqrt{2} V_{ca}$ na **Eq.(1)**, resulta

$$V_{cc} = 2 \left(\frac{\sqrt{2} V_{ca} - V_B}{\pi} \right) \quad (2)$$

A tensão V_{ca} é aquela medida no secundário do transformador com respeito ao ponto de derivação central, conforme indicado na **Fig.9**, e corresponde ao valor medido na entrada. Pode-se, portanto, concluir que:

 ***O rendimento da retificação de onda completa com derivação central é o dobro daquele obtido na retificação de meia onda.***

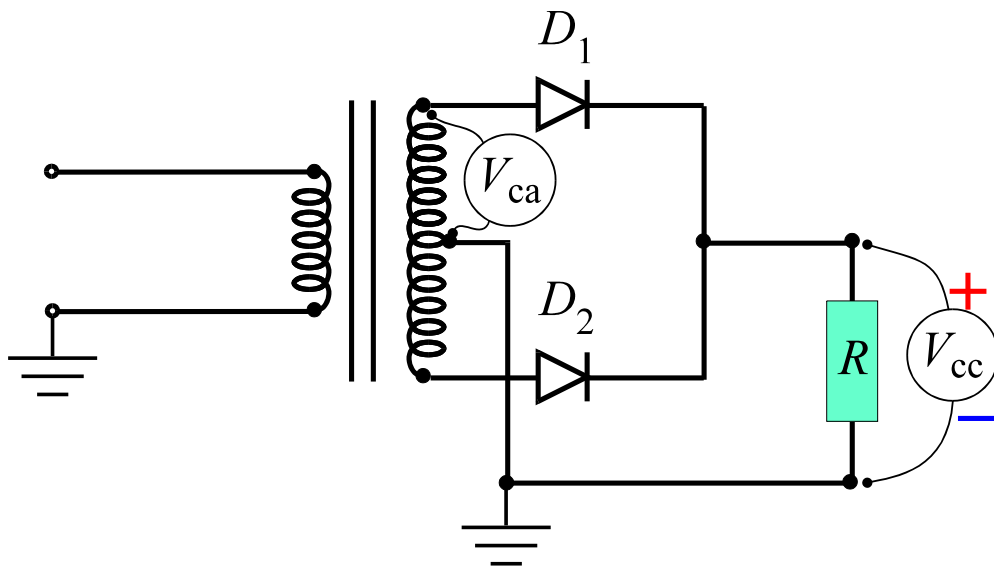


Fig.9 Parâmetros de medição no retificador de onda completa do tipo *center tap*.

Observando atentamente o processo de retificação de onda completa com derivação central, verifica-se que cada metade do circuito corresponde a um retificador de meia onda que opera isoladamente em cada semiciclo da tensão de entrada, conforme ilustrado na seqüência de diagramas da **Fig.10**.

Como neste tipo de retificação um ciclo completo da tensão *ca* de entrada é transformado em dois semiciclos de tensão sobre a carga, conclui-se que a frequência dos picos de tensão na carga é o dobro da frequência da rede.

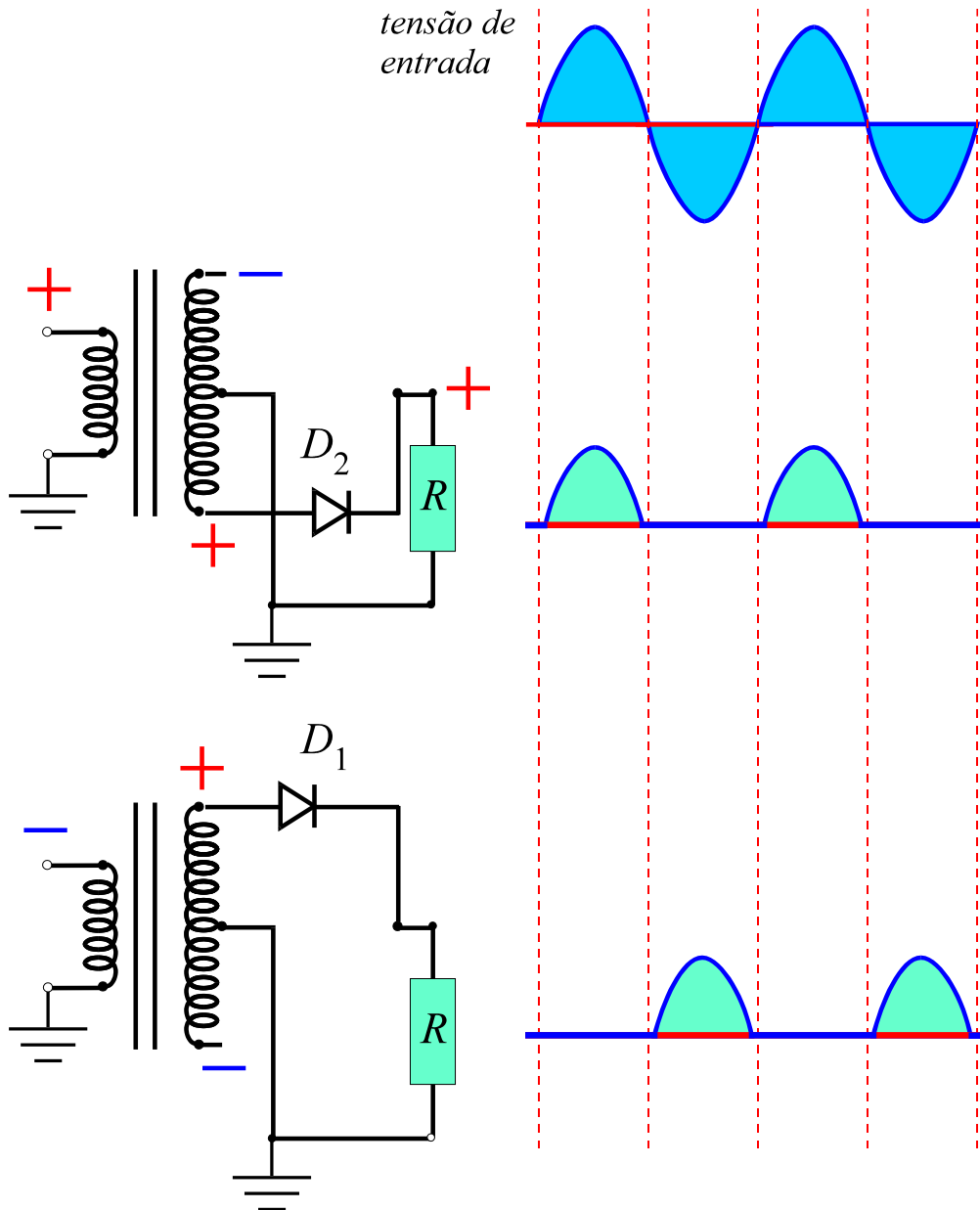


Fig.10 Retificador de onda completa visto como dois retificadores de meia onda que se alternam a cada semiciclo da tensão de entrada.

Quando o valor efetivo da tensão de entrada for muito superior ao valor V_B , este pode ser desprezado na **Eq.(1)** para o cálculo de V_{cc} . Nessa aproximação, a **Eq.(1)** assume a forma simplificada

$$V_{cc} = \frac{2V_{\text{máx}}}{\pi} \quad (3)$$

Inserindo a relação $V_{\text{máx}} = \sqrt{2} V_{ca}$, na **Eq.(3)**, obtém-se

$$V_{cc} = \frac{2\sqrt{2} V_{ca}}{\pi} = 0,9 V_{ca} \quad (4)$$

Com valores típicos de 0,7 e 0,3V para o potencial de barreira do silício e do germânio, respectivamente, a expressão aproximada dada pela **Eq.(4)** pode ser utilizada na prática quando a condição $V_{ca} \geq 10V$ for satisfeita.



No retificador de onda completa, a tensão cc na carga pode atingir 90% do valor ca medido entre um dos terminais extremos do secundário e o ponto de derivação central.

Corrente de saída

Como as variações da corrente na carga seguem as mesmas variações da tensão aí presente em cada instante de tempo, conclui-se que a corrente média no resistor R pode ser determinada simplesmente pela expressão

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R} \quad (5)$$

A seguir são apresentados dois exemplos do cálculo da tensão e da corrente cc no retificador de onda completa com derivação central.

Exemplo 1: Para o circuito retificador com diodo de silício ilustrado na **Fig.11**, determinar V_{cc} e I_{cc} para $V_{ca} = 6\text{ V}$.

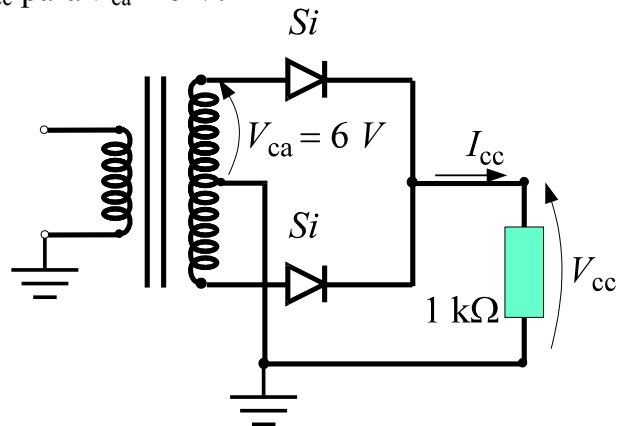


Fig.11 Circuito retificador para o **Exemplo 1**.

Com $V_{ca} < 10\text{ V}$, utiliza-se a **Eq.(2)**, ou seja,

$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{\sqrt{2} \times 6 - 0,7}{\pi} \right) = 2 \times \left(\frac{1,41 \times 6 - 0,7}{3,14} \right) = 2 \times \left(\frac{8,46 - 0,7}{3,14} \right)$$

$$\Rightarrow V_{cc} = 2 \times \left(\frac{7,76}{3,14} \right) = 2 \times 2,47 = 4,94\text{ V}$$

A corrente na carga é obtida com o uso da **Eq.(5)**, fornecendo

$$I_{cc} = \frac{4,94\text{ V}}{1.000\ \Omega} = 4,94\text{ mA}$$

Exemplo 2: Para o circuito retificador com o diodo de silício ilustrado na **Fig.12**, determinar V_{cc} e I_{cc} para $V_{ca} = 20\text{ V}$.

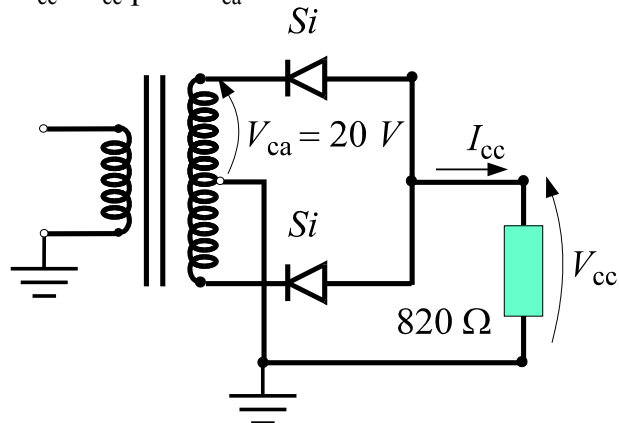


Fig.12 Circuito retificador para o **Exemplo 2**.

Com $V_{ca} > 10 \text{ V}$, utiliza-se a **Eq.(4)**. Note-se, no entanto, que na **Fig.12** a posição dos diodos está invertida com respeito à configuração da **Fig.11**. Uma troca de sinal é, portanto, necessária no primeiro membro da **Eq.(4)**, fornecendo

$$-V_{cc} = 0,9 V_{ca} = 0,9 \times 20 = 18\text{V}$$

$$\Rightarrow V_{cc} = -18\text{V}$$

Utilizando a **Eq.(5)**, a corrente na carga é

$$I_{cc} = \frac{-18\text{V}}{820\Omega} = -21,9 \text{ mA}$$

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA EM PONTE

A retificação de onda completa em ponte utiliza quatro diodos semicondutores e transfere para a carga uma onda retificada, sem a necessidade de uso de um transformador com derivação central, conforme ilustrado na **Fig.13**.

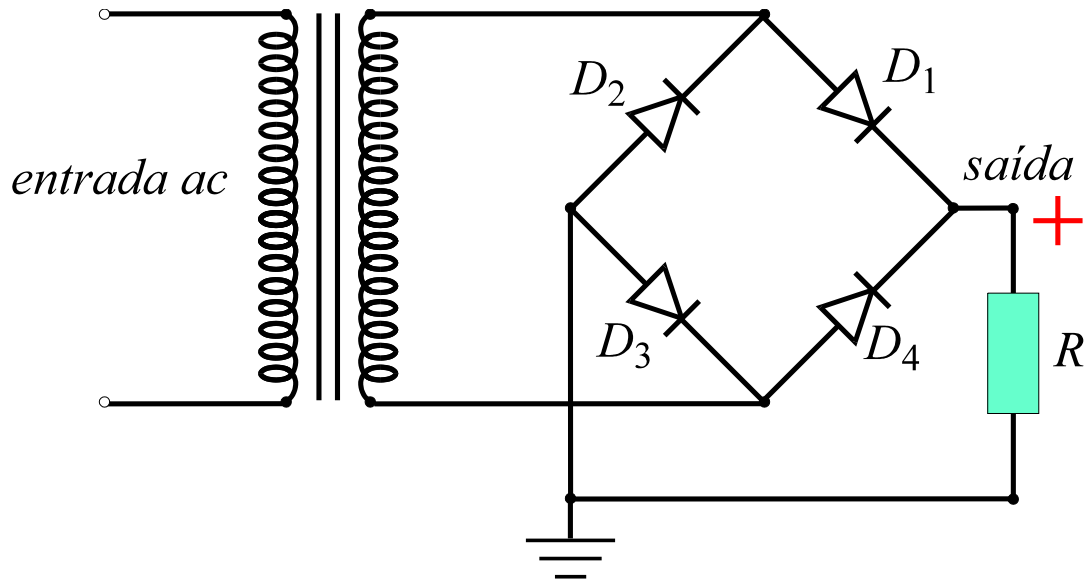


Fig.13 Retificador de onda completa com ponte de quatro diodos.

Esse tipo de configuração, também denominado de *Ponte de Graëtz*, tem o seu princípio de funcionamento descrito a seguir.

FUNCIONAMENTO

Semiciclo positivo

Considerando o semiciclo de tensão positiva na entrada do circuito ilustrado na **Fig.14**, uma inspeção das polarizações dos quatro diodos indica os regimes de operação listados na **Tabela 1**.

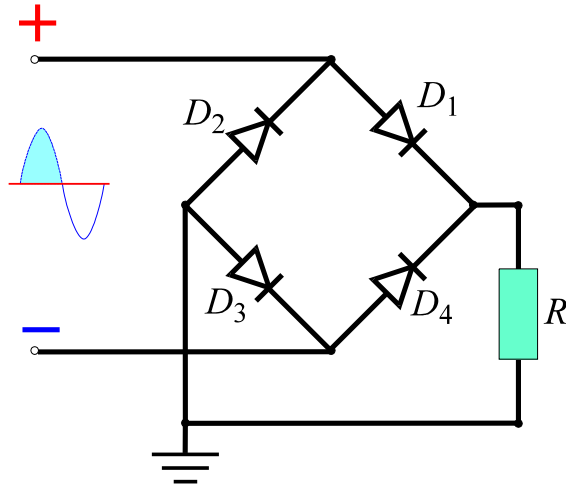


Fig.14 Retificador em ponte durante o semiciclo positivo.

Tabela 1 Polarizações e regimes de operação dos diodos durante o semiciclo positivo da tensão de entrada.

Diodo	Polarização	Regime de operação
D_1	ânodo positivo em relação ao cátodo	condução
D_2	cátodo positivo em relação ao ânodo	bloqueio
D_3	cátodo negativo em relação ao ânodo	condução
D_4	ânodo negativo em relação ao cátodo	bloqueio

Utilizando o modelo da chave ideal para o diodo, e as condições estabelecidas na **Tabela 1**, obtém-se o circuito equivalente apresentado na **Fig.15**.

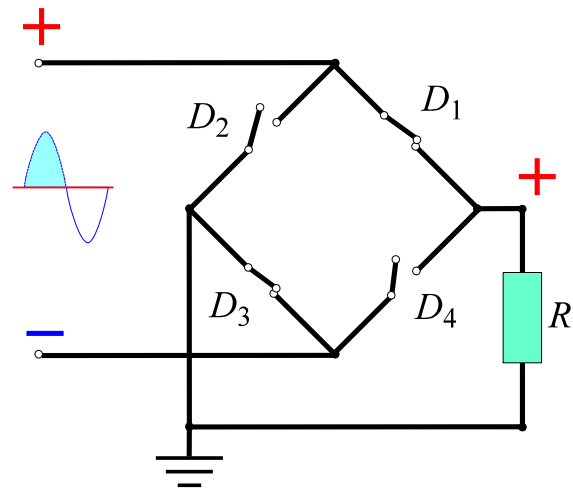


Fig.15 Circuito equivalente do retificador em ponte durante o semiciclo positivo.

Como as chaves em aberto não interferem no funcionamento do circuito, verifica-se que D_1 e D_3 em condução fecham o circuito elétrico, tornando os pontos A e B da **Fig.16** equivalentes. Dessa forma, a tensão de entrada é transferida para a carga.

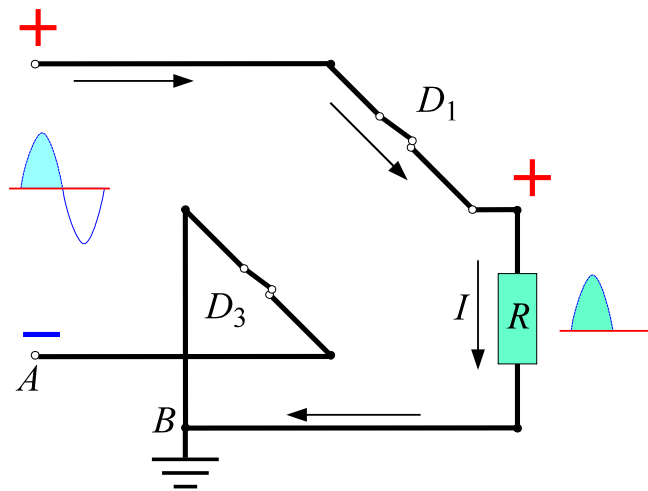


Fig.16 Simplificação do circuito da **Fig.15**.

Semiciclo negativo

Durante o semiciclo negativo, ocorre a inversão de polaridade nos terminais de entrada do circuito, conforme mostrado na Fig.17 e os regimes de operação dos diodos são modificados conforme listado na Tabela 2.

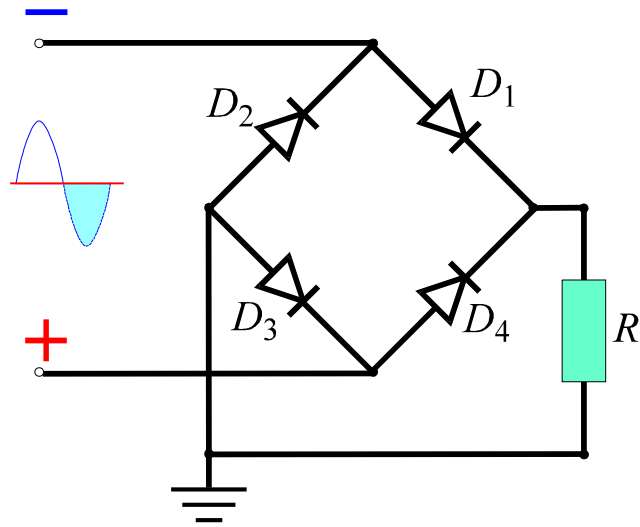


Fig.17 Retificador em ponte durante o semiciclo negativo.

Tabela 2 Polarizações e regimes de operação dos diodos durante o semiciclo negativo da tensão de entrada.

Diodo	Polarização	Regime de operação
D_1	ânodo negativo em relação ao cátodo	bloqueio
D_2	cátodo negativo em relação ao ânodo	condução
D_3	cátodo positivo em relação ao ânodo	bloqueio
D_4	ânodo positivo em relação ao cátodo	condução

Com base na Tabela 2, e utilizando-se novamente o modelo da chave ideal para o diodo, obtém-se o circuito equivalente mostrado na Fig.18.

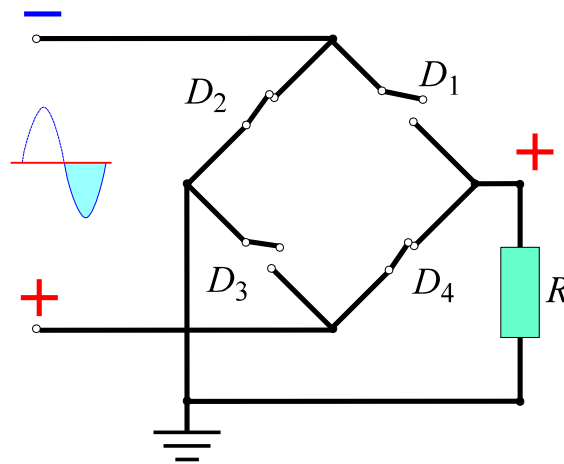


Fig.18 Circuito equivalente para a ponte retificadora durante o semiciclo negativo.

O circuito equivalente com as chaves em aberto removidas é mostrado na **Fig.19**. Um exame do circuito indica que a tensão de entrada é transferida, com uma inversão de sinal, para a carga. Como a tensão de entrada é negativa, aquela na carga permanece positiva, completando, assim, o processo de retificação.

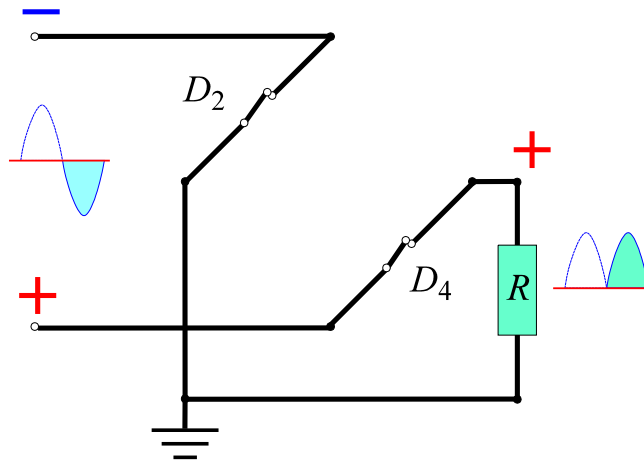


Fig.19 Circuito equivalente resultante do retificador em ponte durante o semiciclo negativo.

A **Fig.20** ilustra como a corrente flui no circuito durante o semiciclo negativo da tensão de entrada, onde se pode verificar que o fluxo de corrente se dá no mesmo sentido daquele obtido durante o semiciclo positivo.

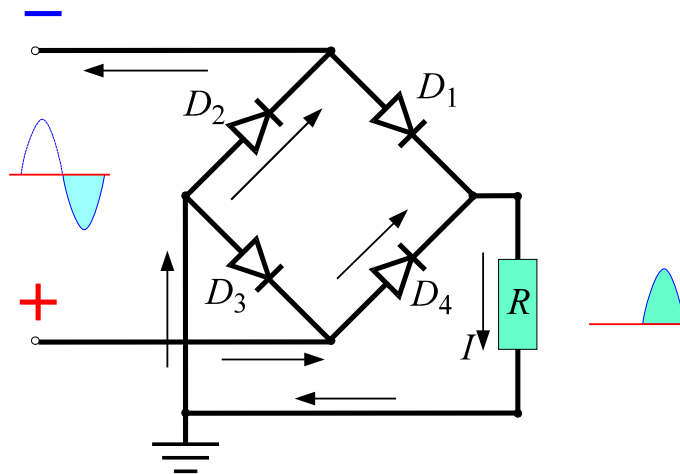


Fig.20 Fluxo de corrente na ponte retificadora durante o semiciclo negativo da tensão de entrada.

A ponte retificadora é muitas vezes representada nos esquemas elétricos pelo diagrama mostrado na **Fig.21**, com a barra e a seta do símbolo do diodo indicando os terminais positivo e negativo, respectivamente. Os outros dois terminais representam os pontos de conexão da tensão de entrada.

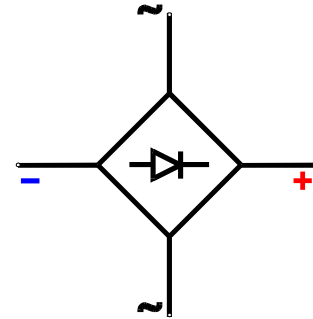


Fig.21 Representação da ponte retificadora.

TENSÃO E CORRENTE DE SAÍDA

Tensão de saída

A ponte de Graëtz fornece na saída o mesmo tipo de forma de onda que aquela obtida no processo de retificação com derivação central. Na retificação em ponte, no entanto, há uma alteração no valor de pico da tensão na carga, devido à existência de dois diodos em regime de condução durante cada semiciclo da tensão de entrada. Conseqüentemente, a tensão de pico na carga é diminuída de uma quantidade correspondente ao dobro da queda de tensão V_B através de cada diodo, conforme ilustrado na **Fig.22**.

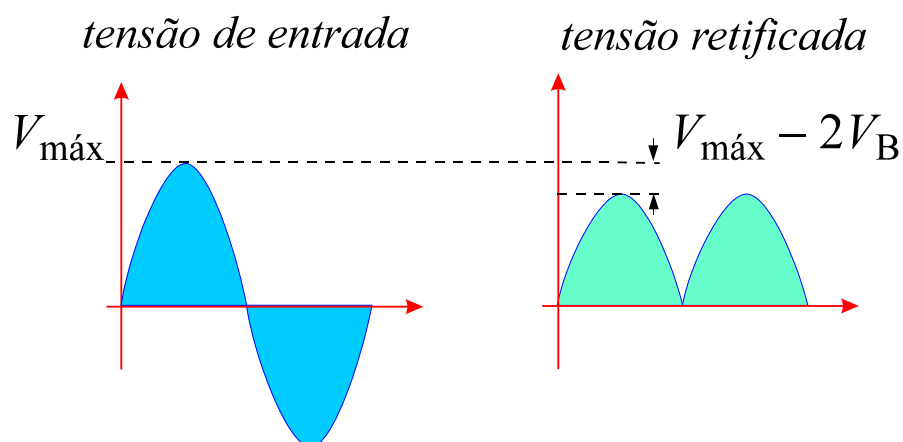


Fig.22 Parâmetros definindo as tensões de entrada e saída no retificador em ponte.

A partir dessas considerações, pode-se concluir que a tensão *cc* medida na carga é dada pela expressão

$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{V_{\text{máx}} - 2V_B}{\pi} \right) \quad (6)$$

ou alternativamente

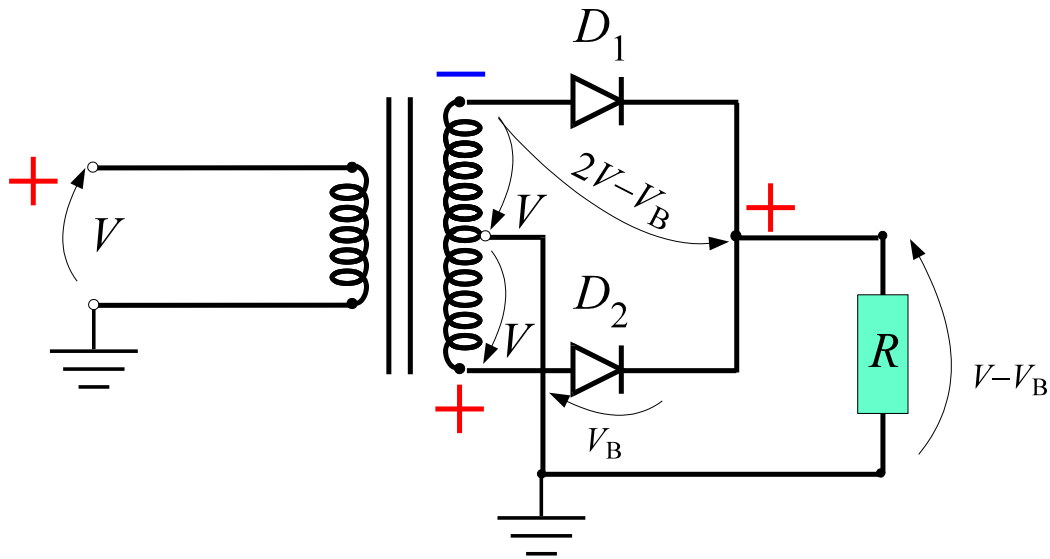
$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{\sqrt{2} V_{ca} - 2V_B}{\pi} \right) \quad (7)$$

Na prática, para o caso de diodos de silício, a queda de tensão $2V_B$ na **Eq.(7)** poderá ser desprezada se a tensão de entrada satisfizer a condição $V_{ca} > 20 \text{ V}$. Nessa aproximação, a tensão V_{cc} poderá ser obtida por intermédio da **Eq.(4)**.

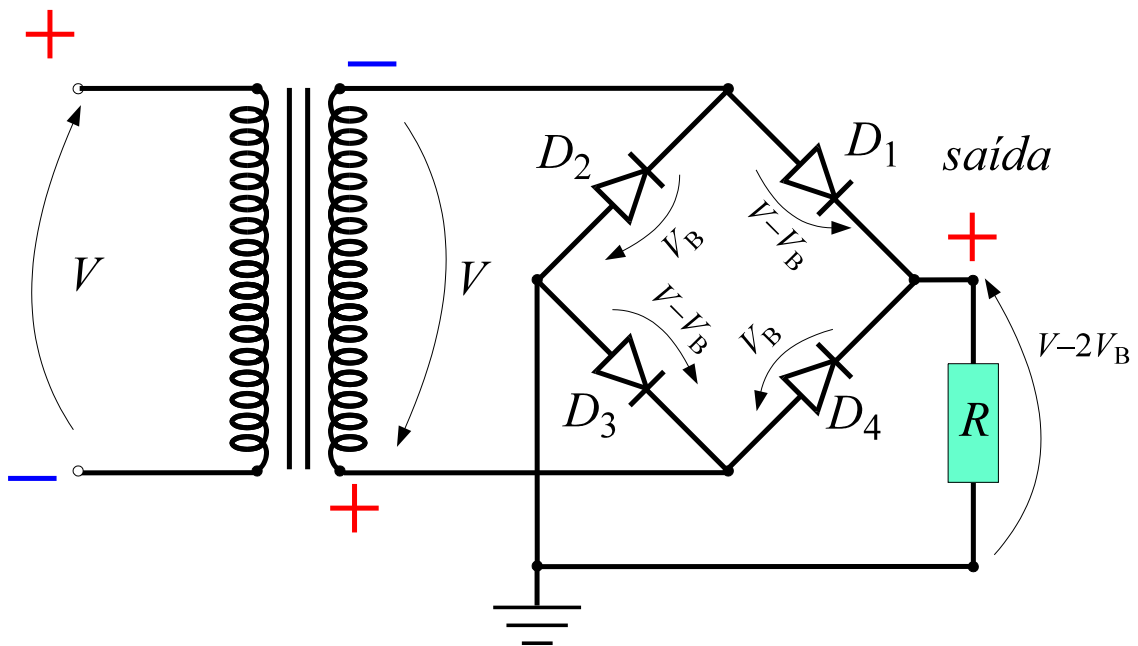
Uma característica presente na configuração em ponte é a existência de uma tensão inversa V_{ca} sobre cada diodo operando em bloqueio, como mostrado na **Fig.23a**. Por outro lado, como se pode observar na **Fig.23b**, a tensão inversa aplicada sobre o diodo em bloqueio na configuração *center tap* é praticamente duas vezes superior.

Essa diferença representa uma vantagem do retificador em ponte em comparação com o retificador do tipo *center tap*, pelas seguintes razões:

- Uma menor voltagem inversa em cada diodo permite que o retificador em ponte possa operar a níveis mais elevados de potência do que o retificador *center tap*.
- A tensão no secundário do transformador é utilizada quase que integralmente para alimentação da carga em cada semiciclo. Para o retificador com derivação central, metade do secundário do transformador fica energizada apenas para manter um dos diodos em bloqueio; o que implica em uma menor eficiência.



a) D_1 em bloqueio, D_2 em condução.



b) D_1 e D_3 em bloqueio, D_2 e D_4 em condução.

Fig.23 Tensões nos diodos dos retificadores: (a) *center tap*, (b) ponte de quatro diodos.

Corrente de saída

Como no caso do retificador de onda completa com derivação central, a corrente média na carga do retificador em ponte é dada pela Eq.(5).

Exemplo 3: Para o circuito mostrado na **Fig.24**, que consiste de uma ponte retificadora com diodos de germânio, determine a tensão e corrente *cc* na carga.

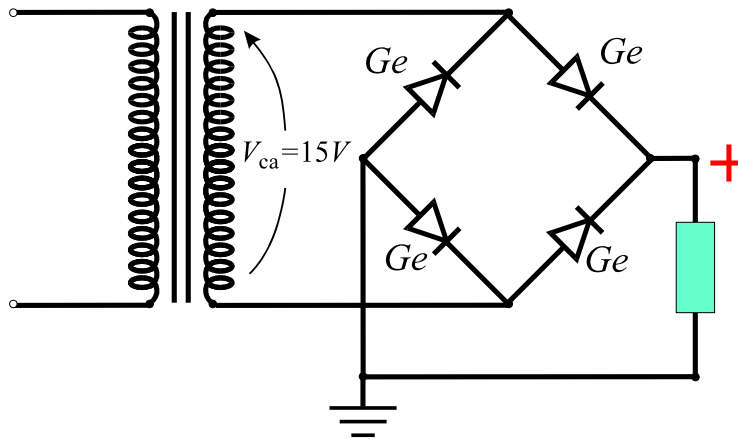


Fig.24 Circuito retificador para o **Exemplo 3**.

Utilizando a **Eq.(7)** com $V_B = 0,3 \text{ V}$, obtém-se

$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{1,41 \times 15 - 2 \times 0,3}{3,14} \right) = \frac{2 \times 20,55}{3,14} = \frac{41,10}{3,14} = 13,10 \text{ V}$$

A corrente *cc* na carga é obtida da **Eq.(5)** com $R = 2,2 \text{ k}\Omega$, resultando em

$$V_{cc} = \frac{13,10}{2.200\Omega} = 5,95 \text{ mA.}$$

FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE ONDA COMPLETA

O circuito retificador de onda completa é utilizado como fonte de alimentação para circuitos de freio eletromagnético, alimentação de eletroímãs, brinquedos eletrônicos etc. Nas **Figs. 25 e 26** são ilustrados os circuitos de alimentação de onda completa divididos em 4 **partes** ou **etapas** discriminadas a seguir:

- ETAPA 1: entrada
- ETAPA 2: controle e proteção
- ETAPA 3: transformação da tensão
- ETAPA 4: retificação

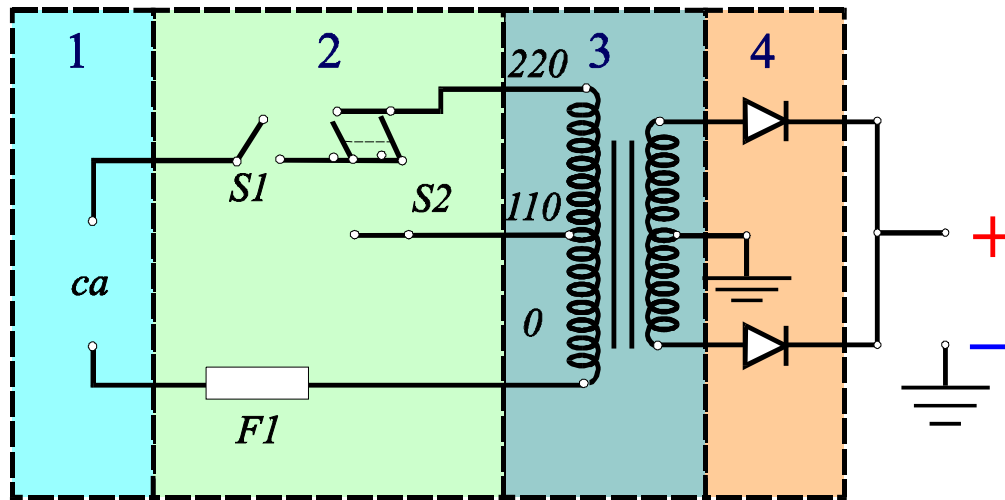


Fig.25 Divisão do circuito retificador *center tap* para o diagnóstico de defeitos.

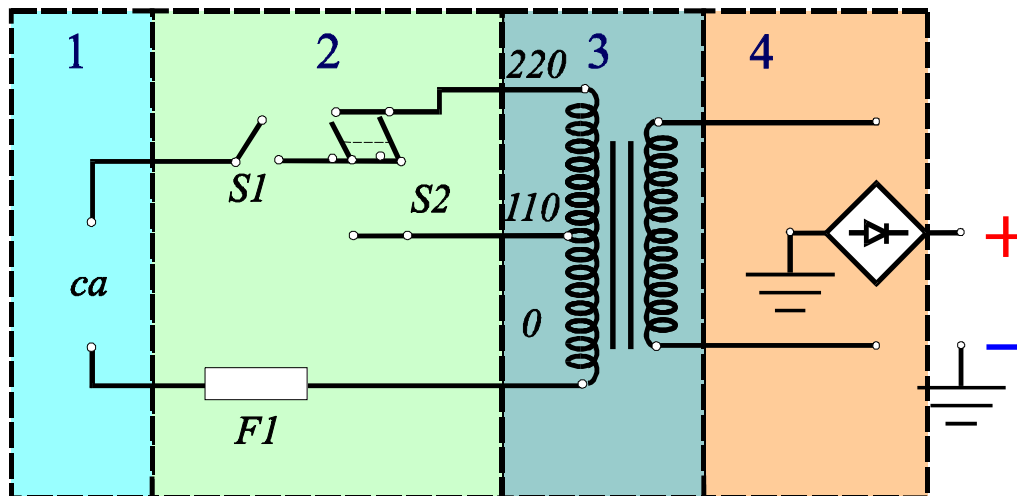


Fig.26 Divisão do circuito retificador em ponte para o diagnóstico de defeitos.

Para testar as condições de operação e realizar a inspeção de defeitos no circuito, o procedimento descrito no fluxograma da Fig.27 é geralmente efetuado.

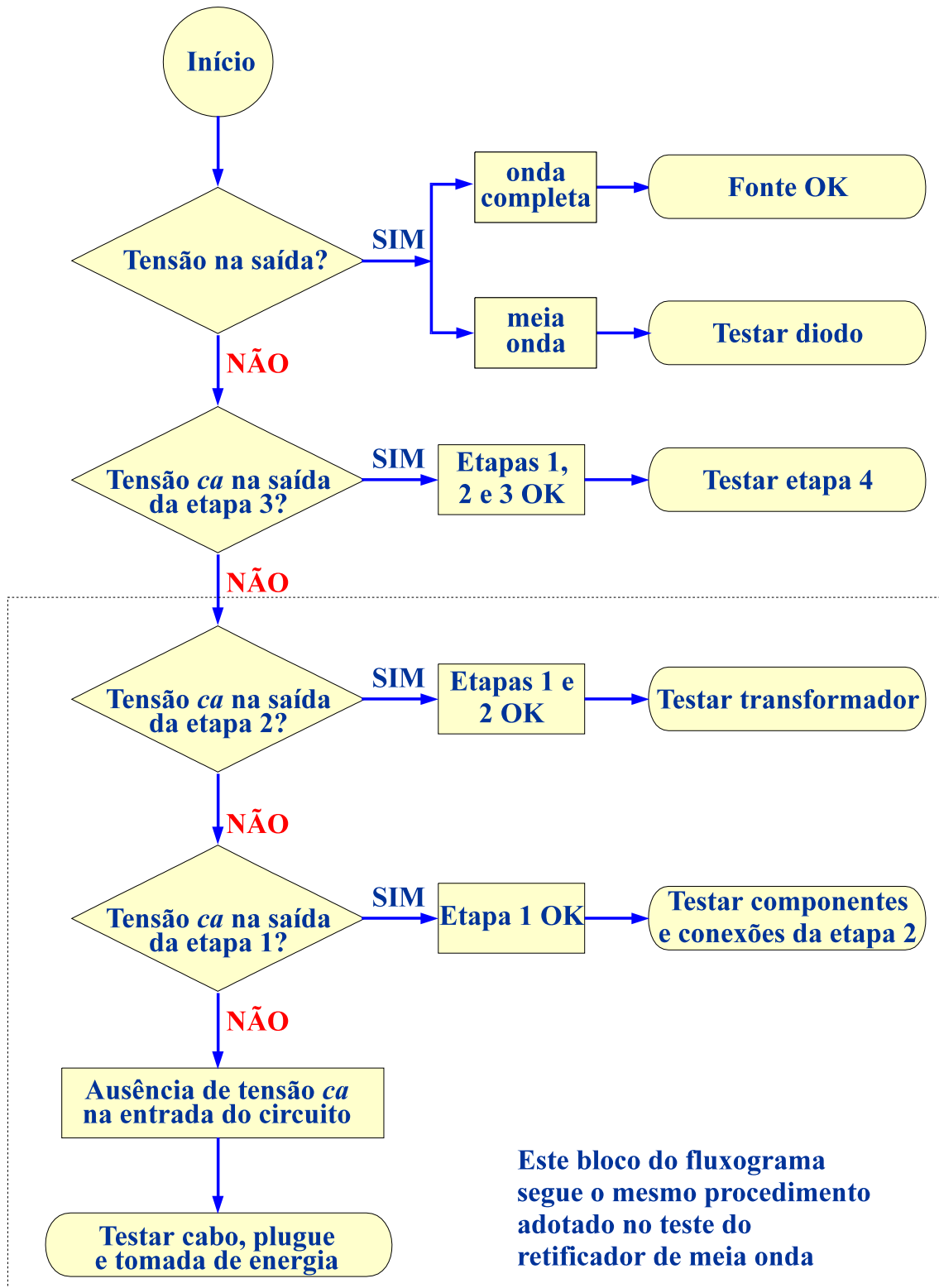


Fig.27 Fluxograma para execução de testes em um retificador de onda completa.

Na execução dos testes, as seguintes considerações devem ser observadas:

- É possível determinar se a saída está retificada em meia onda através da medida de tensão, uma vez que

$$\text{Retificação de onda completa: } \Rightarrow V_{cc} = 0,9 V_{ca}$$

$$\text{Retificação de meia onda: } \Rightarrow V_{cc} = 0,45 V_{ca}$$

Uma possibilidade de a saída se encontrar retificada em meia onda é a permanência de um dos diodos retificadores em aberto.

- Se o defeito na etapa 2 for fusível rompido, devem-se verificar as causas antes de se realizar a substituição. Possíveis causas podem ser : diodos em curto, curto entre ligações ou um curto na saída da fonte. O rompimento do fusível também pode ser provocado pelo funcionamento anormal do circuito alimentado pela fonte.
- **IMPORTANTE:** Em ambos os tipos de retificadores, um diodo em curto normalmente produz curtos nos diodos restantes. Verificada a possibilidade de existência de um diodo em curto, é prática comum fazer-se a troca de todos os diodos restantes, mesmo que estes não acusam defeito quando testados com um ohmímetro.

PONTES RETIFICADORAS COMERCIAIS

A configuração da ponte retificadora é muito empregada em equipamentos eletrônicos. Isso levou os fabricantes de diodos a produzir pontes retificadoras pré-fabricadas. Essas pontes nada mais são do que os 4 diodos já ligados entre si, encapsulados em um só componente. Na **Fig.28** é mostrado o aspecto de duas pontes retificadoras disponíveis comercialmente.

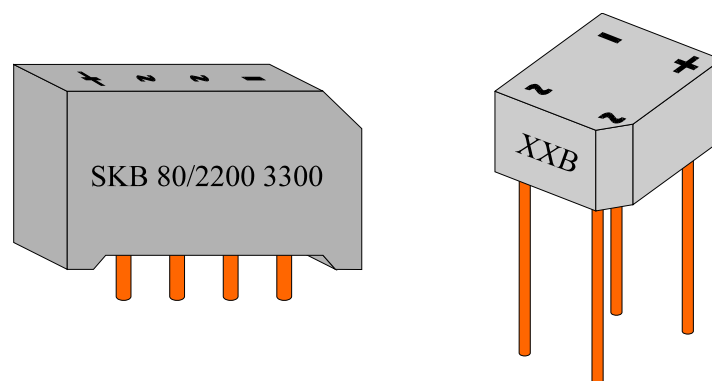


Fig.28 Aspecto de dois *chips* retificadores disponíveis comercialmente.

O componente disponível comercialmente tem quatro terminais, dois dos quais utilizados para a entrada da tensão *ca* com os dois restantes servindo para a saída da tensão *cc*. Os terminais de entrada em *ca* são normalmente identificados pelo símbolo (\sim) sendo os de saída em *cc* identificados pelos símbolos (+) e (-), conforme indicado na **Fig.28**.

As designações inscritas nos encapsulamentos mostrados na **Fig.28** referem-se às características da ponte, de acordo com a seguinte convenção:

XX	—	duas letras que indicam o fabricante.
B	—	do alemão <i>Brücken</i> (ponte).
40	—	valor limite de tensão <i>ca</i> em Volts que pode ser aplicada à entrada da ponte.
1000/1800	—	corrente média em mA que pode ser obtida na saída do componente, onde: 1.000 – com carga puramente resistiva na saída. 1.800 – com carga puramente capacitiva na saída.

A **Fig.29** mostra o aspecto de uma fonte de alimentação montada com uma ponte retificadora comercial.

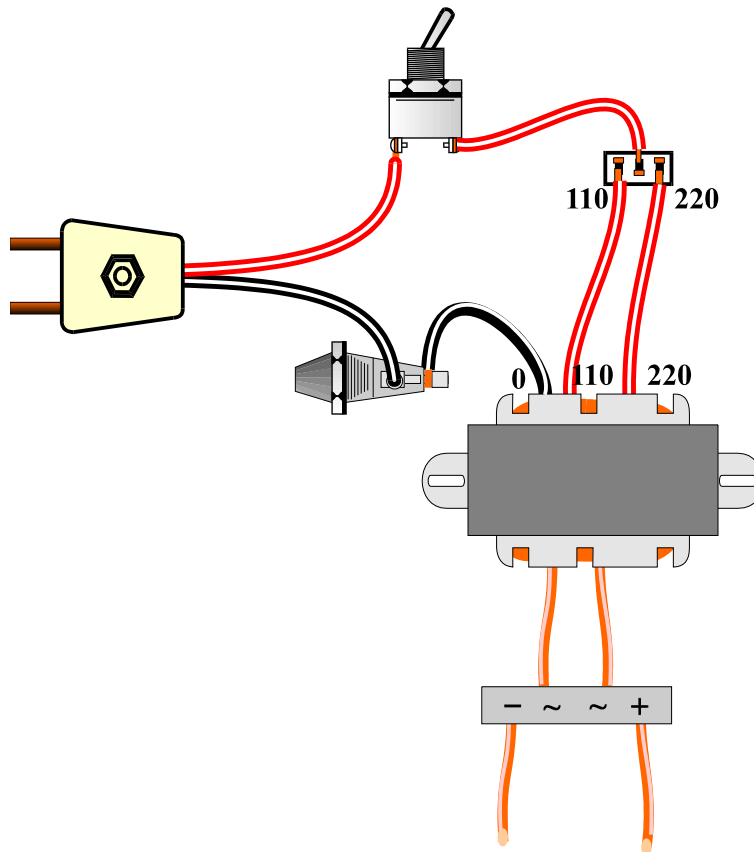


Fig.29 Montagem de uma fonte de alimentação utilizando ponte retificadora.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que é retificação de onda completa?
2. Como se compara o rendimento de um retificador de onda completa em relação ao rendimento de um retificador de meia onda?
3. Quais os valores da tensão média e da tensão efetiva medidas na carga de um retificador de onda completa de derivação central submetido a uma entrada senoidal de 3 V? Admita que os diodos sejam de silício.
4. Repita a questão anterior para o caso de um retificador de onda completa com ponte de quatro diodos.
5. Quais são as vantagens do retificador em ponte em relação ao retificador com derivação central?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.^a ed. São Paulo, Érica, 1983, 580pp.

DEGEM SYSTEMS . Fontes de alimentação eletrônicas. Israel, Eletrônica Modular Pantec, c1976, 49pp. ilustr.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica Industrial; circuitos e aplicações. São Paulo, Hemus, c1982, 336pp.

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c1979 (Coleção Básica Senai, Módulo 1).