

## Capítulo 10

# RETIFICADORES

### 10.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será feito o estudo dos retificadores não controlados, controlados e os híbridos ou semi-controlados, todos com **carga resistiva** ligada na saída.

O estudo destes retificadores, com carga indutiva ligada na saída, será feito no próximo capítulo, a fim de facilitar a compreensão, já que este estudo envolve fenômenos que não ocorrem com a carga resistiva.

A conversão de corrente alternada em corrente contínua com valores de tensão fixos, tanto na entrada quanto na saída do conversor, pode ser conseguida com diodos retificadores e estes conversores são denominados: **Retificadores não controlados**.

Com a utilização de SCR's é possível a montagem de **Retificadores controlados**, onde pode-se obter de uma tensão alternada constante, uma tensão contínua variável.

### 10.2 - NOMENCLATURA DE RETIFICADORES

Ao darmos nome ao um circuito retificador, devemos observar os seguintes aspectos:

a) **Nº de fases:** Deve mencionar se o retificador é monofásico (1 fase), bifásico (2 fases), trifásico (3 fases) etc.

b) **Tipo de controle:** Deve mencionar se o retificador é não controlado (constituído por diodos), se é controlado (constituído por SCR's) ou se é híbrido ou semicontrolado (constituído por SCR's e diodos).

c) **Tipo de aproveitamento:** Deve mencionar se o retificador é de  $\frac{1}{2}$  onda: aproveita um semiciclo da rede ou se é de onda completa: aproveita os dois semiciclos da rede.

A nomenclatura, portanto, do retificador deve seguir a seguinte sequência:

RETIFICADOR	_____	_____	_____
	nº de fases	tipo de controle	aproveitamento

**Exemplo:** Retificador monofásico não controlado de  $\frac{1}{2}$  onda.

### 10.3 - RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS

Os retificadores não controlados, como foi mencionado anteriormente, são constituídos por diodos.

Será feita uma análise dos retificadores supondo o diodo ideal, ou seja, tensão zero nos terminais do mesmo, quando estiver em condução, e quando estiver cortado será considerado uma chave aberta.

O estudo dos retificadores não controlados será limitado ao estudo dos **retificadores monofásico** e dos **retificadores trifásicos**.

#### 10.3.1- Retificador monofásico não controlado

Os retificadores monofásicos não controlados podem ser de  $\frac{1}{2}$  onda ou de onda completa.

Embora estes retificadores não sejam utilizados em aplicações de alta potência, são encontrados em circuitos de baixa potência e por este motivo se faz necessária a análise dos mesmos. Em muitas aplicações, o retificador é alimentado a partir de um transformador que permite: adaptação da tensão da fonte à tensão da carga e o isolamento galvânico entre a rede e a carga.

### 0.3.1.1 - Retificador monofásico não controlado de 1/2 onda.

Como a carga é resistiva (R), a tensão e a corrente estão em fase, e o diodo conduz durante o semiciclo positivo da rede, pois se encontra polarizado diretamente. Durante o semiciclo negativo, o diodo fica polarizado reversamente e não há circulação de corrente para a carga (R). A tensão de entrada, durante o semiciclo negativo, aparece nos terminais do diodo, pois o mesmo se comporta como uma chave aberta.

Na figura 10.1 é apresentado o circuito do retificador monofásico não controlado de 1/2 onda e suas formas de onda.

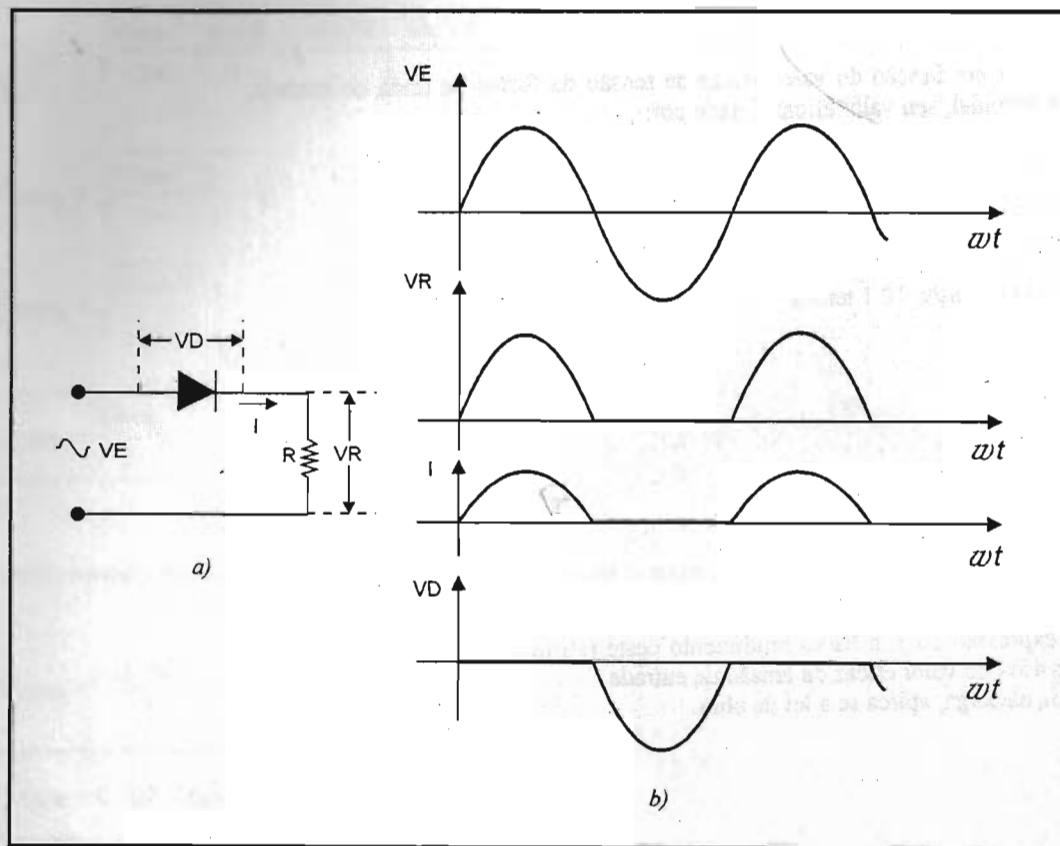


Fig. 10.1 - a) Retificador monofásico não controlado de 1/2 onda.  
b) Formas de ondas.

A tensão média ( $V_{DCR}$  ou  $V_{AVR}$ ) na carga é calculada pela expressão:

$$V_{DCR} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{max} \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{2\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi}$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{2\pi} [-(\cos \pi - \cos 0)]$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{2\pi} [-(-1 - 1)]$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{\pi} \quad 10.1$$

Podemos colocar a expressão 10.1 em função do valor eficaz de tensão da forma de onda de entrada, logo como sabemos que a entrada é senoidal, seu valor eficaz é dado por:

$$V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad 10.2$$

Substituindo a expressão 10.2 na expressão 10.1 temos:

$$V_{DCR} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{RMS}}{\pi}$$

$$V_{DCR} = 0,45 V_{RMS} \quad 10.3$$

Podemos verificar, através da expressão 10.3, o baixo rendimento deste retificador, pois o valor médio de tensão na carga ( $V_{DCR}$ ) é apenas 45% do valor eficaz da tensão de entrada.

Para o cálculo da corrente média na carga, aplica-se a lei de ohm:

$$I_{DCR} = \frac{V_{DCR}}{R} \quad 10.4$$

O valor da tensão eficaz na carga é dado pela expressão:

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_{max} \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{max}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t}$$

OBS:  $\int \sin^2 \omega t = \frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4}$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{2\pi} \left( \frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right) \Big|_0^{\pi}}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{2\pi} \left[ \frac{\pi - 0}{2} - \left( \frac{\sin 2\pi - \sin 2 \cdot 0}{4} \right) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{2\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - 0 \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{4}}$$

$$V_{RMSR} = \frac{V_{max}}{2} \quad 10.5$$

Colocando a expressão 10.5 em função do valor eficaz de entrada temos:

$$V_{RMSR} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{RMS}}{2}$$

$$V_{RMSR} = 0,707 V_{RMS} \quad 10.6$$

A corrente eficaz na carga é dada pela expressão:

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} \quad 10.7$$

O diodo, para este retificador, deve ser dimensionado para suportar o mesmo valor de corrente que circula pela carga, pois está em série com a mesma, e a sua tensão reversa deve ser especificada para um valor superior ao valor de pico da tensão de entrada.

É conveniente utilizar **um fator de segurança de 50%** ao especificar a corrente do diodo e a sua tensão reversa, pois isto irá garantir que o componente não irá trabalhar perto de seus limites máximos, logo, teremos:

$$I_{RMSD} = 1,5 I_{RMSR} \quad 10.8$$

$$I_{DCD} = 1,5 I_{DCR} \quad 10.9$$

Este retificador apresenta como vantagens: simplicidade e baixo custo.

#### Exercício :

- 1) Para o circuito da figura 10.2 pede-se:
  - a) Calcule os valores eficaz e médio de tensão e corrente na carga.
  - b) Especifique a tensão reversa do diodo e as suas correntes eficaz e média.

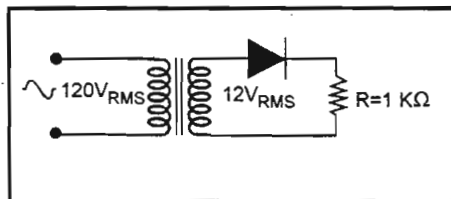


Fig. 10.2 - Retificador monofásico não controlado de 1/2 onda.

Para o cálculo do valor eficaz e médio de tensão temos:

$$V_{RMSR} = 0,707 V_{RMS} = 0,707 \cdot 12 = 8,5V$$

$$V_{DCR} = 0,45 V_{RMS} = 0,45 \cdot 12 = 5,4V$$

Os valores de correntes eficaz e médio na carga são dados pelas expressões:

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R} = \frac{8,5V}{1K\Omega} = 8,5 \text{ mA}$$

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R} = \frac{5,4V}{1K\Omega} = 5,4 \text{ mA}$$

Para especificar o diodo, é conveniente que os valores de suas correntes eficaz e média sejam superiores da carga, a fim de garantir que o mesmo não irá operar perto dos seus limites máximos.

Utilizando um fator de segurança de 50% (1,5), temos os valores de correntes no diodo.

$$I_{RMSD} = I_{RMSR} \cdot 1,5 = 8,5 \cdot 1,5 = 12,8 \text{ mA}$$

$$I_{DCD} = I_{DCR} \cdot 1,5 = 5,4 \cdot 1,5 = 8,1 \text{ mA}$$

A tensão reversa que o diodo deve suportar, neste caso, é igual a tensão de pico da tensão do secundário, logo:

$$V_{RD} = 12 \cdot \sqrt{2} = 17V$$

Devemos escolher um diodo que suporte uma tensão reversa maior que 17V e podemos utilizar um fator de segurança de 50%, logo:

$$V_{RD} = 17 \cdot 1,5 = 25,5V$$

Concluindo, para o circuito dado, o diodo deve suportar uma tensão reversa de no mínimo 25,5V, corrente eficaz de 12,8mA e corrente média de 8,1 mA.

### 10.3.1.2 - Retificador monofásico não controlado de onda completa:

É possível obter-se este tipo de retificador de duas formas: com transformador de tape central (center tape) ou em ponte.

Estes dois tipos de retificadores serão analisados a seguir juntamente com suas formas de ondas e expressões.

#### 10.3.1.2.1 - Retificador monofásico não controlado de onda completa com transformador de center tape

Na figura 10.3 é apresentado o circuito deste retificador e suas formas de ondas:



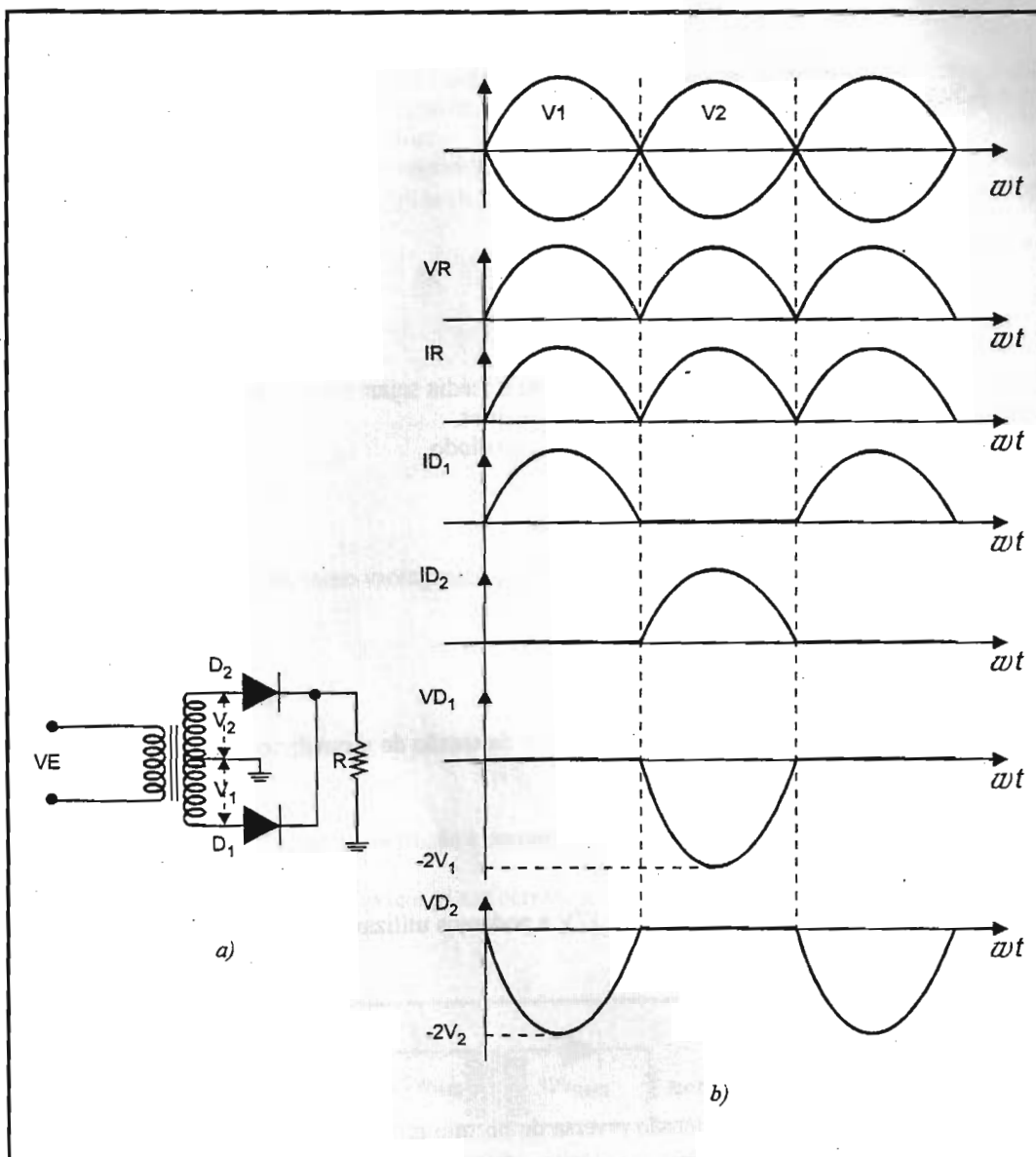


Fig. 10.3 - a) Retificador monofásico não controlado de onda completa com transformador de center tape.  
b) Formas de ondas.

Neste circuito, o transformador fornece tensões ( $V_1$  e  $V_2$ ) que estão defasadas de  $180^\circ$ . A cada semiciclo, apenas 1 diodo estará polarizado diretamente e conduzirá. Vale a pena ressaltar que o fato de um diodo estar conduzindo, faz o diodo em corte receber uma tensão reversa que é o **dobro** da tensão de cada enrolamento do transformador.

Na figura 10.4 é apresentado o circuito, supondo  $D_2$  cortado (OFF) e  $D_1$  conduzindo (ON). Os diodos estão representados como chaves, para facilitar análise, sendo possível verificar que a tensão que aparecerá nos terminais da chave  $D_2$  será:  $V_2 + V_1$ .

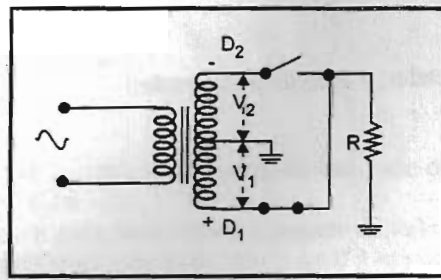


Fig - 10.4 - Retificador monofásico não controlado de onda completa conduzindo um dos semiciclos.

O valor médio de tensão na carga, para este retificador, é dado pela expressão:

$$V_{DCR} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{max} \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi}$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{\pi} [-(\cos \pi - \cos 0)]$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{\pi} [-(-1 - 1)]$$

$$V_{DCR} = \frac{2V_{max}}{\pi} \quad 10.10$$

Colocando a expressão 10.10 em função do valor eficaz da tensão de entrada do retificador temos:

$$V_{DCR} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{RMS}}{\pi}$$

$$V_{DCR} = 0,9 \cdot V_{RMS} \quad 10.11$$

Neste circuito temos um maior rendimento do que o de  $\frac{1}{2}$  onda, pois com o aproveitamento dos dois semiciclos do sinal senoidal, o valor médio na carga é 90% do valor eficaz da entrada do retificador.

O valor médio de corrente na carga é dado por:

$$I_{DCR} = \frac{V_{DCR}}{R} \quad 10.12$$



O valor eficaz de tensão na carga ( $V_{RMSR}$ ), para este retificador, é dado pela expressão:

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_{max} \sin wt)^2 \cdot dw}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{max}^2 \cdot \sin^2 wt \cdot dw}$$

$$\text{Obs: } \sin^2 wt = \frac{wt}{2} - \frac{\sin 2wt}{4}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{\pi} \left( \frac{wt}{2} - \frac{\sin 2wt}{4} \right) \Big|_0^{\pi}}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{\pi} \left[ \frac{\pi - 0}{2} - \left( \frac{\sin 2\pi - \sin 2 \cdot 0}{4} \right) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - 0 \right]}$$

$$V_{RMSR} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad 10.13$$

Neste circuito o valor eficaz de tensão na carga é igual ao valor eficaz da tensão de entrada, pois ambos os valores são dados por  $\frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$ , logo:

$$V_{RMSR} = V_{RMS} \quad 10.14$$

O valor eficaz de corrente na carga é dado por:

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} \quad 10.15$$

Para especificarmos os diodos, devemos calcular os valores de correntes eficaz e média e a tensão reversa.

O diodo, neste retificador, só conduz, cada um, durante 180°. Neste caso a corrente média em cada diodo é a metade da corrente da carga.

$$I_{DCD} = \frac{V_{DCR}}{2R} \quad 10.16$$

A expressão 10.16 é melhor compreendida, sabendo que cada diodo é responsável por um semiciclo conforme é mostrado na figura 10.3.b.

O valor eficaz de corrente em cada diodo não é a metade do valor da corrente eficaz na carga, pois o valor da tensão eficaz, aproveitando um semiciclo, não é igual à metade do valor da tensão eficaz quando se aproveita os dois semiciclos (vide expressões 10.5 e 10.13).

Para o cálculo da corrente eficaz em cada diodo, devemos lembrar que na carga a forma de onda de corrente conduzida por  $D_1$ , por exemplo, está apresentada na figura 10.5.

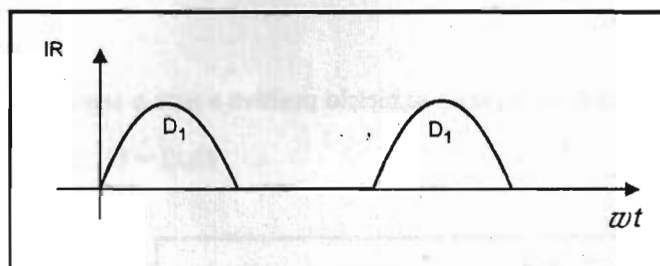


Fig.10.5 - Forma de onda de corrente na carga conduzida por  $D_1$

O valor eficaz da corrente no diodo é calculado, sabendo que a tensão eficaz na carga, quando o mesmo conduz, é a tensão eficaz correspondente ao retificador de  $\frac{1}{2}$  onda, pois cada diodo é responsável pela condução de um semiciclo apenas, logo:

$$I_{RMSD} = \frac{V_{RMSR}(\frac{1}{2} \text{ onda})}{R}$$

$$I_{RMSD} = \frac{0,707V_{RMS}}{R} \quad 10.17$$

### 3.1.2.2- Retificador monofásico não controlado de onda completa em ponte

O circuito do retificador monofásico não controlado de onda completa em ponte está apresentado na figura 10.6

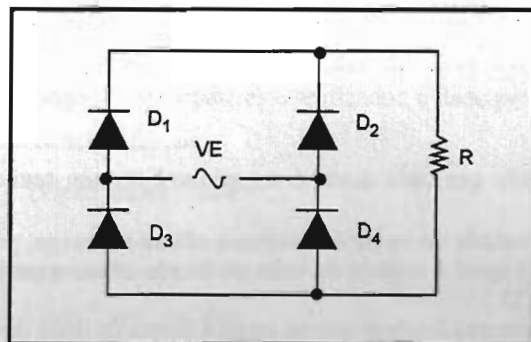


Fig.10.6 - Retificador monofásico não controlado de onda completa em ponte.

Na figura 10.7 é apresentado o comportamento do circuito para o semiciclo positivo e para o semiciclo negativo da senóide.

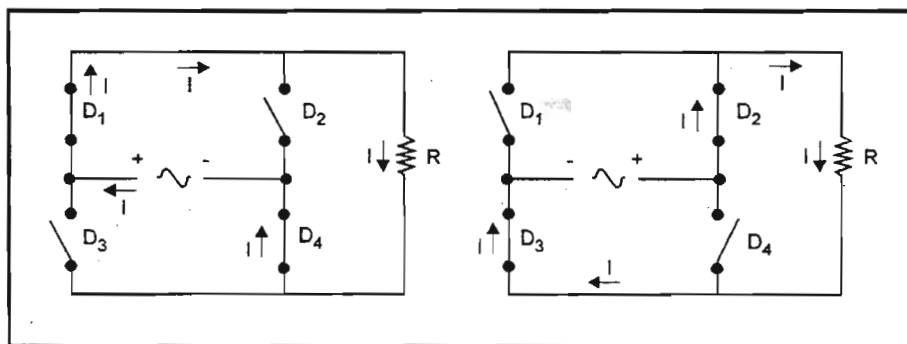


Fig.10.7 - Comportamento da ponte com diodos para os dois semiciclos da senóide.

Através da figura 10.7 podemos constatar que o sentido de corrente na carga não muda, comprovando que houve a retificação do sinal de entrada.

Vale apenas ressaltar que a única coisa que muda neste retificador, em relação ao retificador com transformador de tape central, é a tensão reversa de cada diodo, que neste caso, é igual à tensão de pico da tensão de entrada..

#### Exercício:

Para o circuito da figura 10.8 pede-se:

- Calcule os valores de tensão e corrente eficaz e média na carga.
- Calcule a tensão reversa do diodo e as suas correntes eficaz e média.

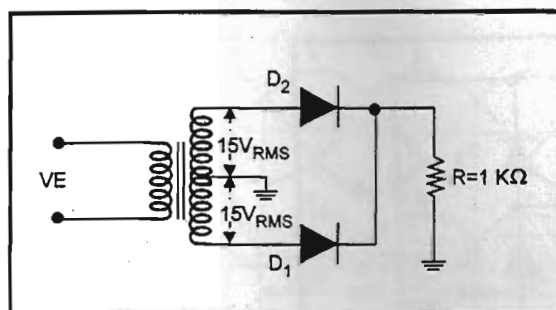


Fig - 10.8 - Retificador monofásico não controlado de onda completa com transformador de tape central.

a)  $V_{RMSR} = V_{RMS} = 15V$

$$V_{DCR} = 0,9 V_{RMS} = 0,9 \cdot 15 = 13,5V$$

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} = \frac{15V}{1K\Omega} = 15mA$$

$$I_{DCR} = \frac{V_{DCR}}{R} = \frac{13,5V}{1K\Omega} = 13,5 mA$$

b) Para os diodos temos:

$$I_{RMSD} = \frac{0,707 \cdot V_{RMS}}{R} = \frac{0,707 \cdot 15}{1K\Omega} = 10,6 mA$$

$$I_{DCD} = \frac{1}{2} \cdot I_{DCR} = 6,75 mA$$

Tensão reversa de cada diodo:

$$V_{RD} = 15 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 42,3V$$

Obs: quando for escolher o diodo comercial, colocar o fator de segurança de 50%, daí os valores serão:

$$I_{RMSD} = 10,6 \cdot 1,5 = 15,9mA$$

$$I_{DCD} = 6,75 \cdot 1,5 = 10,13mA$$

$$V_{RD} = 42,3 \cdot 1,5 = 63,45V$$

No caso do circuito ser em ponte, como mostra a figura 10.9, o único dado que irá mudar é a tensão reversa de cada diodo.

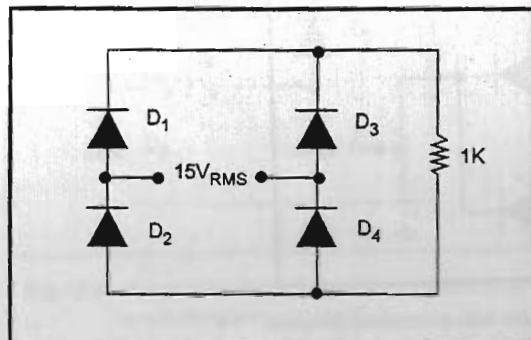


Fig. 10.9 - Retificador monofásico não controlado de onda completa em ponte.

A tensão reversa de cada diodo passará a ser:

$$V_{RD} = 15 \cdot \sqrt{2} = 21,15V$$

Para a escolha do valor comercial, devemos colocar o fator de segurança, logo, a tensão reversa será:

$$V_{RD} = 21,15 \cdot 1,5 = 31,73V$$

### 10.3.2- Retificador trifásico não controlado de ½ onda

O retificador trifásico não controlado de ½ onda é constituído por 3 diodos, conforme mostra a figura 10.10

Os 3 diodos que compõem este retificador podem ser ligados direto na rede trifásica, ou através de um transformador trifásico, cuja ligação, apresente o neutro, visto que este retificador necessita do neutro para a ligação de um terminal da carga ( vide fig. 10.10 ).

O diodo que irá conduzir, a cada instante, é aquele que estiver ligado à fase mais positiva. Pelo sistema trifásico apresentado na figura 10.10.b, podemos perceber que a cada instante apenas uma das fases estará mais positiva, e por este motivo apenas um diodo estará polarizado diretamente.

A troca de diodos, neste retificador, ocorre quando uma fase passa a ser mais positiva do que a outra, ou seja, o instante de troca dos diodos ocorre no ponto de comutação natural ( a 30° do eixo de referência ).

Pelo fato exposto acima, a tensão na carga não chega a tocar o eixo de referência ( vide fig. 10.10.b ) como nos retificadores monofásicos e desta forma temos um menor ripple na mesma.

Através da figura 10.10.b. podemos perceber que cada diodo conduz 120° e que a frequência da forma de onda na carga é **três vezes maior** do que a frequência da rede. Este aspecto já facilita a filtragem neste tipo de retificador, pois o ripple apresentado no mesmo é pequeno e a frequência do sinal na carga é maior do que nos retificadores monofásicos.

O valor da tensão média na carga (  $V_{DCR}$  ) é dado por:

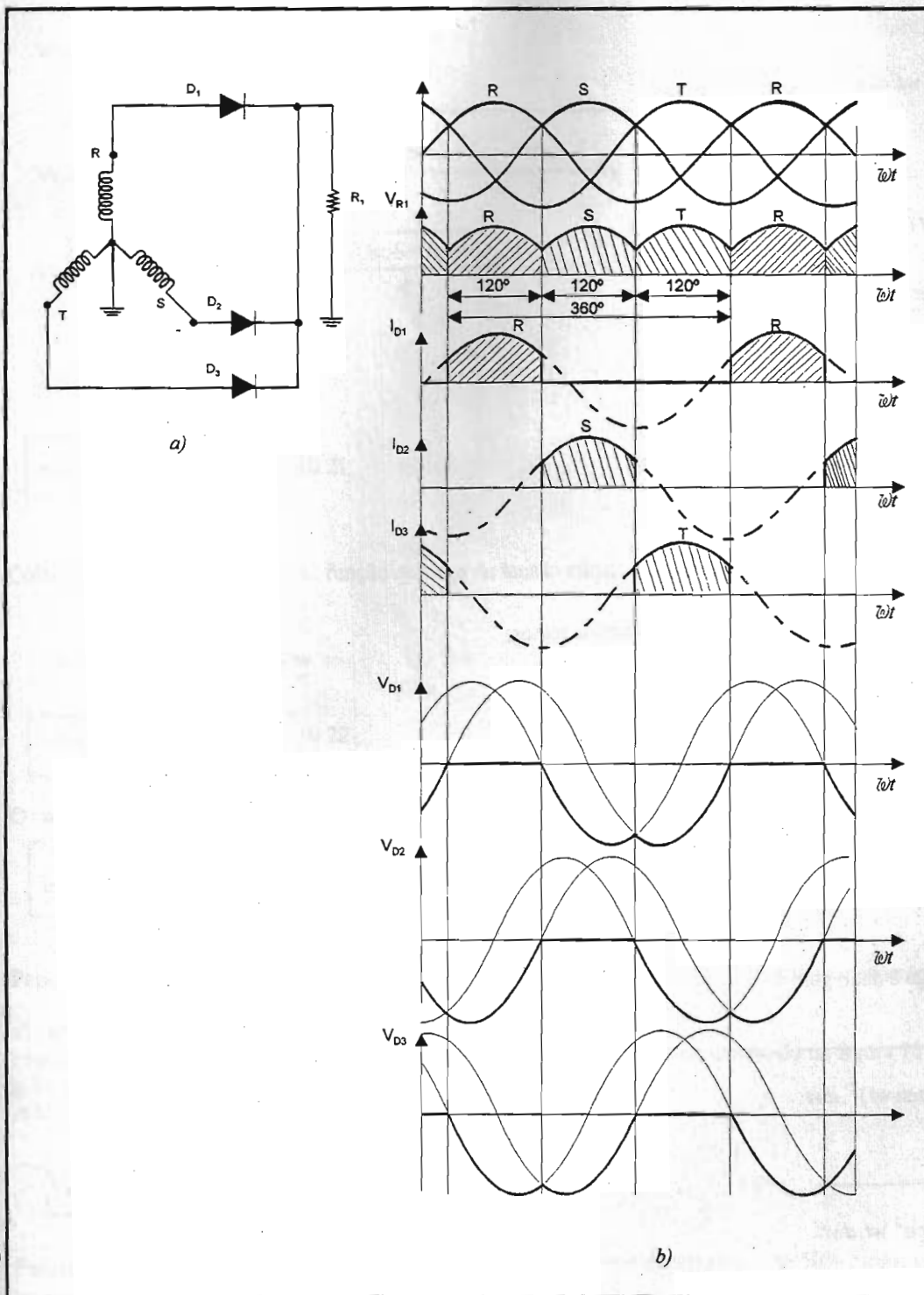


Fig.10.10 - a) Retificador trifásico não controlado de 1/2 onda.

b) Formas de ondas do retificador trifásico não controlado de 1/2 onda.



$$V_{DCR} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_{max_{FN}} \sin wt \cdot dw$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} (-\cos wt) \Big|_{\pi/6}^{5\pi/6}$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} \left[ -\left(\cos \frac{5\pi}{6} - \cos \frac{\pi}{6}\right) \right]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} [ -(-0,866 - 0,866) ]$$

$$V_{DCR} = 0,83 V_{max_{FN}} \quad 10.18$$

onde:  $V_{max_{FN}}$  = Tensão máxima fase-neutro.

Expressando  $V_{DCR}$  em função do valor eficaz fase-neutro de entrada temos:

$$V_{DCR} = 0,83 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{RMS_{FN}}$$

$$V_{DCR} = 1,17 \cdot V_{RMS_{FN}} \quad 10.19$$

O valor de corrente média na carga é dado por :

$$I_{DCR} = \frac{V_{DCR}}{R} \quad 10.20$$

O valor da tensão eficaz na carga é dado por:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (V_{max_{FN}} \sin wt)^2 \cdot dw}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_{max_{FN}}^2 \sin^2 wt \cdot dw}$$

$$\text{Obs: } \int \sin^2 wt = \frac{wt}{2} - \frac{\sin 2wt}{4}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FN}}^2}{2\pi} \left( \frac{wt}{2} - \frac{\sin 2wt}{4} \right) \Big|_{\pi/6}^{5\pi/6}}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FN}}^2}{2\pi} \left[ \left( \frac{5\pi/6 - \pi/6}{2} \right) - \left( \frac{\sin 2 \cdot 5\pi/6 - \sin 2 \cdot \pi/6}{4} \right) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FN}}^2}{2\pi} \left[ \frac{4\pi}{12} - \left( \frac{-0,866 - 0,866}{4} \right) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FN}}^2}{2\pi}} (1,48)$$

$$V_{RMSR} = 0,84 V_{máx_{FN}} \quad 10.21$$

Colocando a expressão 10.21 em função do valor da tensão eficaz da senóide temos:

$$V_{RMSR} = 0,84 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{RMS_{FN}}$$

$$V_{RMSR} = 1,18 \cdot V_{RMS_{FN}} \quad 10.22$$

O valor da corrente eficaz na carga é dada por:

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} \quad 10.23$$

Para a especificação dos diodos devemos observar, através da figura 10.10.b, os seguintes aspectos:

- a) cada diodo só conduz  $120^\circ$
- b) a tensão reversa de cada diodo é **fase-fase** e não fase neutro, como é demonstrado na figura 10.11, supondo  $D_2$  on e  $D_1$  e  $D_3$  off.

A tensão reversa que cada diodo deve suportar é dada por:

$$V_{RD} = V_{máx_{FF}} \quad 10.24$$

Para a escolha do diodo comercial, é aconselhável colocar um fator de segurança de 50%, logo, temos:

$$V_{RD} = 1,5 V_{máx_{FF}} \quad 10.25$$

A corrente média que cada diodo deve suportar é  $\frac{1}{3}$  da corrente média da carga, pois cada diodo conduz  $\frac{1}{3}$  do período, logo:

$$I_{DCD} = \frac{I_{DCR}}{3} \quad 10.26$$

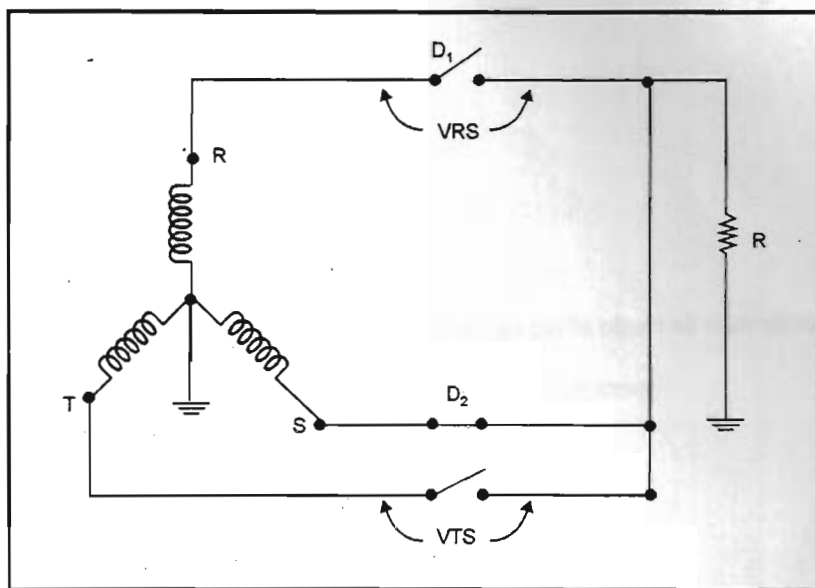


Fig.10.11 - Retificador trifásico não controlado de 1/2 onda com  $D_2$  ON

A corrente eficaz em cada diodo não é  $\frac{1}{3}$  da corrente eficaz da carga. Como podemos verificar na figura 10.10.b, cada diodo conduz  $120^\circ$  e o período da forma de onda é  $2\pi$ , logo, a corrente eficaz no diodo é calculada da seguinte forma:

$$I_{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (I_{max} \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t}$$

$$I_{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_{max}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t}$$

$$\text{Obs: } \sin^2 \omega t = \frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4}$$

$$I_{RMSD} = \sqrt{\frac{Imax^2}{2\pi} \left( \frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right) \Big|_{\pi/6}^{5\pi/6}}$$

$$I_{RMSD} = \sqrt{\frac{Imax^2}{2\pi} \left[ \frac{5\pi/6 - \pi/6}{2} - \left( \frac{\sin 2 \cdot 5\pi/6}{4} - \sin 2 \cdot \pi/6 \right) \right]}$$

$$I_{RMSD} = \sqrt{\frac{Imax^2}{2\pi} [1,05 + 0,43]}$$

$$I_{RMSD} = 0,49 \cdot Imax \quad 10.27$$

Colocando a expressão 10.27 em função da corrente eficaz na carga temos:

$$I_{RMSD} = 0,49 \cdot \frac{I_{RMSR}}{0,84}$$

$$I_{RMSD} = 0,58 \cdot I_{RMSR} \quad 10.28$$

Podemos, portanto, enumerar algumas características do retificador trifásico não controlado de 1/2 onda:

- Necessita do neutro para a ligação da carga.
- Cada diodo conduz durante 120°.
- A frequência da forma de onda retirada na carga é três vezes a frequência da rede.
- A tensão aplicada à carga é **fase-neutro**.
- A tensão reversa em cada diodo é **fase-fase**.

#### Exercício:

Para o circuito da figura 10.12, calcule:

$V_{RMSR}$ ,  $V_{DCR}$ ,  $I_{RMSR}$ ,  $I_{RMSD}$ ,  $I_{DCD}$  e a tensão reversa do diodo.

$$V_{RMSR} = 1,18 V_{RMSFN} = 1,18 \times 220 = 259,6V$$

$$V_{DCR} = 1,17 V_{RMSFN} = 257,4V$$

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} = \frac{259,6V}{1K\Omega} = 259,6 \text{ mA}$$

$$I_{DCR} = \frac{V_{DCR}}{R} = \frac{257,4V}{1K} = 257,4 \text{ mA}$$

$$I_{RMSD} = 0,58 I_{RMSR} = 150,6 \text{ mA}$$

$$I_{DCD} = \frac{I_{DCR}}{3} = \frac{257,4}{3} = 85,8 \text{ mA}$$

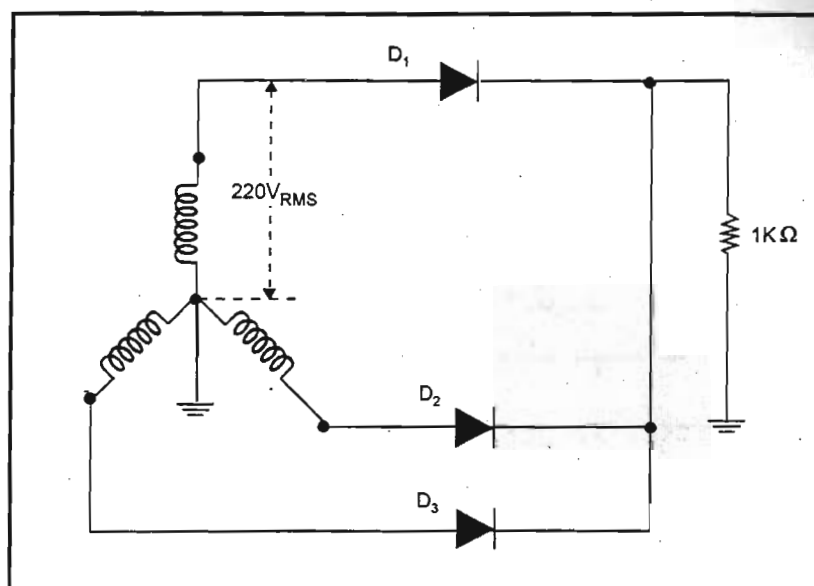


Fig.10.12 - Retificador trifásico não controlado de 1/2 onda.

Tensão reversa de cada diodo:

$$V_{RD} = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} = 536,65 \text{ V}$$

Obs: Para a escolha do diodo colocar o fator de segurança nos valores encontrados.

### 10.3.3 - Retificador trifásico não controlado de onda completa ( ponte de GRAETZ)

Na figura 10.13 é apresentado o circuito do retificador trifásico não controlado de onda completa e suas formas de ondas.

Neste circuito, irá conduzir o diodo que estiver ligado à fase mais positiva e o diodo ligado à fase mais negativa. A tensão que irá aparecer na carga é **fase-fase**, sendo o positivo referente à fase mais positiva e o negativo referente à fase mais negativa, naquele mesmo instante.

A carga é ligada entre o barramento de catodos de um grupo de diodos e o barramento de anodos de outro grupo de diodos e por este motivo não há a necessidade do neutro.

No ponto 1 da forma de onda da figura 10.13.b, podemos observar, que neste instante, a fase mais positiva é a **R** e a mais negativa é a **S**, logo conduzirão os diodos  $D_1$  ( $R+$ ) e  $D_6$  ( $S-$ ) e a tensão na carga será de  $V_{RS}$ .

Só haverá troca de diodo no próximo ponto de comutação natural, ou seja, no ponto 2, pois neste caso a fase **T** se torna mais negativa do que a fase **S** e então o diodo  $D_2$  ( $T-$ ) entra em condução, polarizando reversamente  $D_6$  ( $S-$ ), que deixa de conduzir.

No ponto 3 da forma de onda da figura 10.13b, a fase **S** passa a ser mais positiva do que a fase **R**, logo o diodo  $D_3$  ( $S+$ ), passa a conduzir e polariza reversamente  $D_1$  ( $R+$ ), que vai ao corte.

Agora a tensão na carga é  $V_{ST}$ , pois **S** é a fase mais positiva e **T** é a fase mais negativa.

Acompanhando as formas de ondas apresentadas na figura 10.13b, você pode continuar analisando os demais ciclos de operação deste retificador.

Podemos notar, através da figura 10.13b, que cada diodo conduz durante  $120^\circ$ , pois conduz **dois ciclos de  $60^\circ$  da forma de onda da carga**.

Para o cálculo da tensão média na carga, podemos observar, através da figura 10.13.b, que devemos integrar a tensão **fase-fase**, logo:

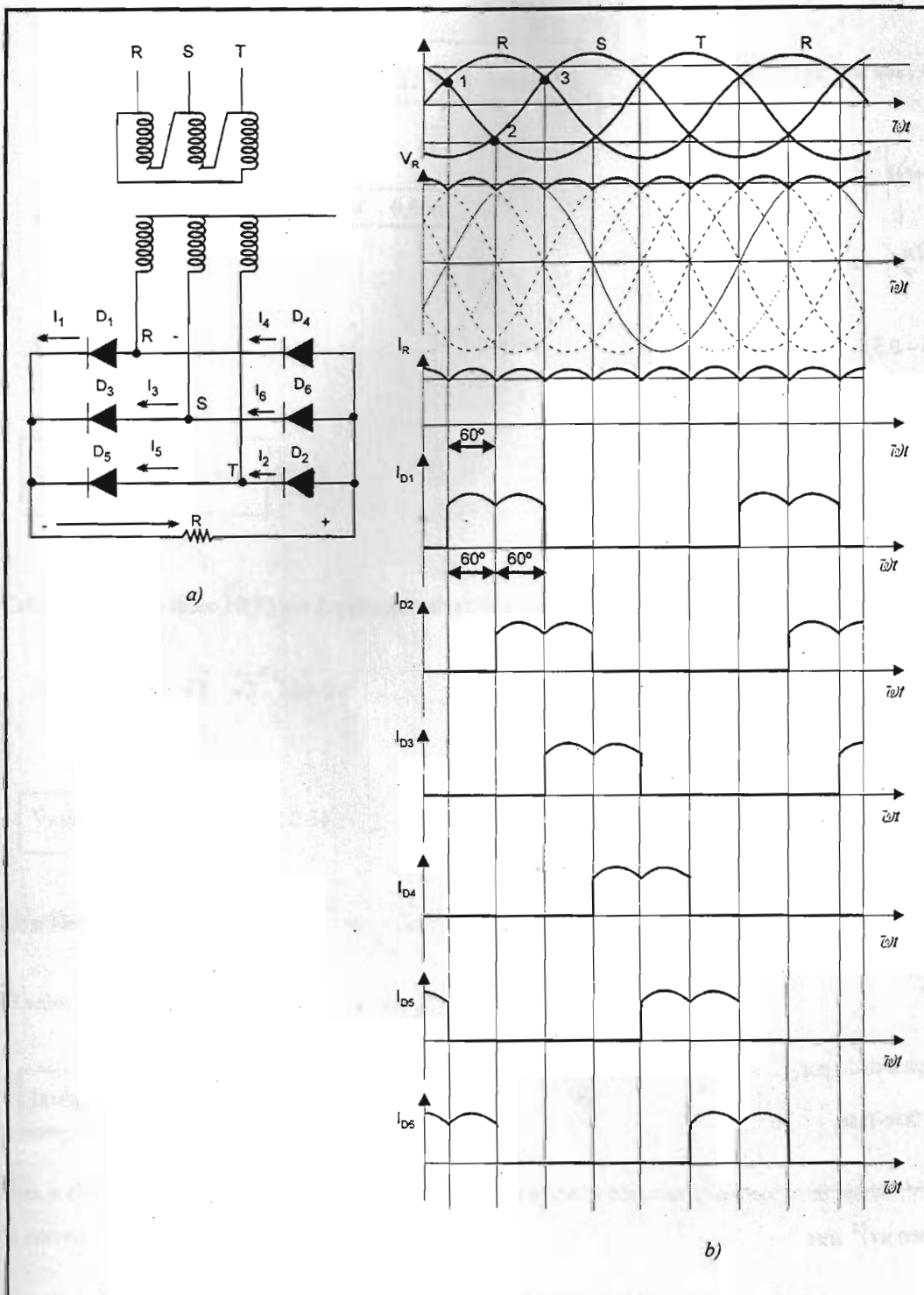


Fig. 10.13 - a) Esquema do retificador trifásico não controlado de onda completa  
b) Formas de ondas do retificador.



$$V_{DCR} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{máx_{FF}} \cdot \text{sen } wt \cdot dwt$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FF}}}{\pi} [(-\cos wt)] \Big|_{\pi/3}^{2\pi/3}$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FF}}}{\pi} \cdot [-(\cos 2\pi/3 - \cos \pi/3)]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FF}}}{\pi} [ -(-0,5 - 0,5) ]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FF}}}{\pi}$$

$$V_{DCR} = 0,96 V_{máx_{FF}} \quad 10.30$$

Expressando em função do valor eficaz fase-neutro temos:

$$V_{DCR} = 0,96 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_{RMS_{FN}}$$

$$V_{DCR} = 2,34 \cdot V_{RMS_{FN}} \quad 10.31$$

O valor de corrente média na carga é dado por:

$$I_{DCR} = \frac{V_{DCR}}{R} \quad 10.32$$

O valor da tensão eficaz na carga é dado por:

Obs: Deve-se integrar a tensão fase-fase.

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} (V_{max_{FF}} \cdot \text{sen } wt)^2 \cdot dwt}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FF}}^2}{\pi} \left( \frac{wt}{2} - \frac{\text{sen } 2wt}{4} \right) \Big|_{\pi/3}^{2\pi/3}}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FF}}^2}{\pi} \left[ \frac{2\pi/3 - \pi/3}{2} - \left( \frac{\sin 2 \cdot 2\pi/3 - \sin 2 \cdot \pi/3}{4} \right) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FF}}^2}{\pi} \left[ \frac{\pi}{6} - \left( \frac{-0,866 - 0,866}{4} \right) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{3V_{max_{FF}}^2}{\pi}} (0,956)$$

$$V_{RMSR} = 0,96 V_{máx_{FF}} \quad 10.33$$

Colocando a expressão 10.33 em função do valor eficaz fase-neutro temos:

$$V_{RMSR} = 0,96 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_{RMSFN}$$

$$V_{RMSR} = 2,34 \cdot V_{RMSFN} \quad 10.34$$

Obs: Neste retificador temos que o valor eficaz e o valor médio de tensão na carga **são iguais**.

O valor da corrente eficaz na carga é dado por:

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} \quad 10.35$$

Para o diodo, neste circuito, através da figura 10.13.b, podemos observar que a corrente média no diodo da corrente média da carga, logo:

$$I_{DCD} = \frac{I_{DCR}}{3} \quad 10.36$$

Para o valor eficaz de corrente no diodo, iremos aproximar a forma de corrente do diodo ( vide figura 10.13.b ) para o aspecto apresentado na figura 10.14.

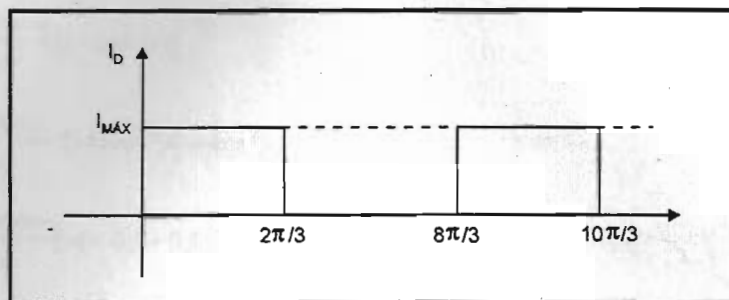


Fig.10.14 - Forma de onda de corrente do diodo.

$$I_{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_{max}^2 \cdot dt}$$

$$I_{RMSD} = \sqrt{\frac{I_{max}^2}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{3}}$$

$$I_{RMSD} = \frac{I_{max}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{RMSD} = 0,58 I_{max} \quad 10.37$$

Colocando a expressão 10.37 em função da corrente eficaz na carga temos:

$$I_{RMSD} = 0,58 \cdot \frac{I_{RMSR}}{0,96}$$

$$I_{RMSD} = 0,6 I_{RMSR} \quad 10.38$$

Resumo das características do retificador trifásico não controlado de onda completa:

- a) Não necessita do neutro para funcionar.
- b) Cada diodo conduz durante um intervalo de 120° ( dois ciclos de 60° ).

- Há condução de 2 diodos a cada instante: 1 responsável pela condução do semiciclo positivo e outro responsável pela condução do semiciclo negativo.
- A frequência da forma de onda na carga é 6 vezes maior do que a frequência da rede.
- A tensão na carga é **fase-fase**.
- O valor médio de tensão na carga é igual ao valor eficaz de tensão na mesma.

**Exercício:**

Para o circuito da figura 10.15, calcule:  $V_{RMSR}$ ,  $V_{DCR}$ ,  $I_{RMSR}$ ,  $I_{DCR}$ ,  $I_{DCD}$ ,  $I_{RMSD}$  e a tensão reversa do diodo, sabendo que a tensão de alimentação é 220  $V_{RMSFN}$ .

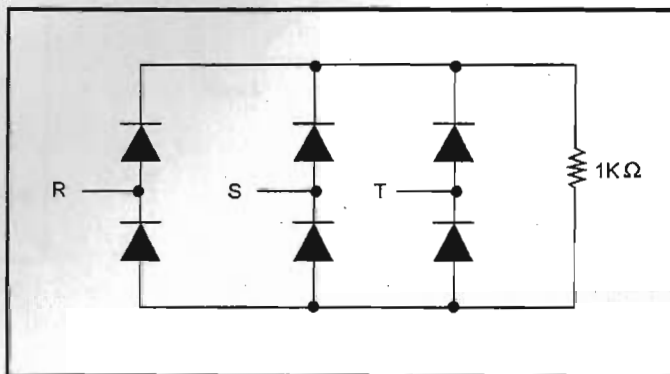


Fig.10.15 - Retificador trifásico não controlado de onda completa.

$$V_{RMSR} = V_{DCR} = 2,34 \cdot V_{RMSFN} = 2,34 \cdot 220 = 514,8V$$

$$I_{DCR} = I_{RMSR} = \frac{514,8}{1K\Omega} = 514,8mA$$

$$I_{RMSD} = 0,6 \cdot I_{RMSR} = 0,6 \cdot 514,8 \text{ mA} = 308,88mA$$

$$I_{DCD} = \frac{I_{DCR}}{3} = \frac{514,8mA}{3} = 171,6mA$$

$$V_{RD} = 220\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} = 536,65V$$

Obs: No momento da escolha do diodo, os valores acima deverão ser multiplicados pelo fator de segurança.

**10.4 - RETIFICADOR CONTROLADO**

O uso dos elementos retificadores controlados introduz uma nova possibilidade no sistema de retificação, pois a tensão de saída pode ser controlada de zero até um valor máximo.

**10.4.1 - Retificador monofásico controlado de ½ onda**

O circuito do retificador monofásico controlado de ½ onda encontra-se apresentado na figura 10.16.

O tiristor conduzirá quando sua tensão anodo-catodo for positiva e receber sinal no gate.

O instante de disparo do tiristor pode ser controlado através do sinal aplicado ao gate.

Através da figura 10.16.b, podemos observar que o aumento do ângulo de disparo, ocasiona um menor tempo de tensão aplicada à carga e, por este motivo, menor potência será dissipada na mesma.

A tensão média ( $V_{DCR}$  ou  $V_{AVR}$ ) é calculada pela expressão:

$$V_{DCR} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max} \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{\max}}{2\pi} (-\cos \omega t) \Big|_{\alpha}^{\pi}$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{\max}}{2\pi} [-(\cos \pi - \cos \alpha)]$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{\max}}{2\pi} [-(-1 - \cos \alpha)]$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{\max}}{2\pi} [1 + \cos \alpha] \quad 10.39$$

A curva de  $V_{DCR}$  em função de  $\alpha$  está apresentada na figura 10.17.

O valor eficaz de tensão na carga é dado pela expressão:

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{\max} \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{\max}^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \cdot d\omega t}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{\max}^2}{2\pi} \left( \frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right) \Big|_{\alpha}^{\pi}}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{\max}^2}{2\pi} \left[ \frac{\pi - \alpha}{2} - \left( \frac{\sin 2\pi - \sin 2\alpha}{4} \right) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{2\pi} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} \right)} \quad 10.40$$

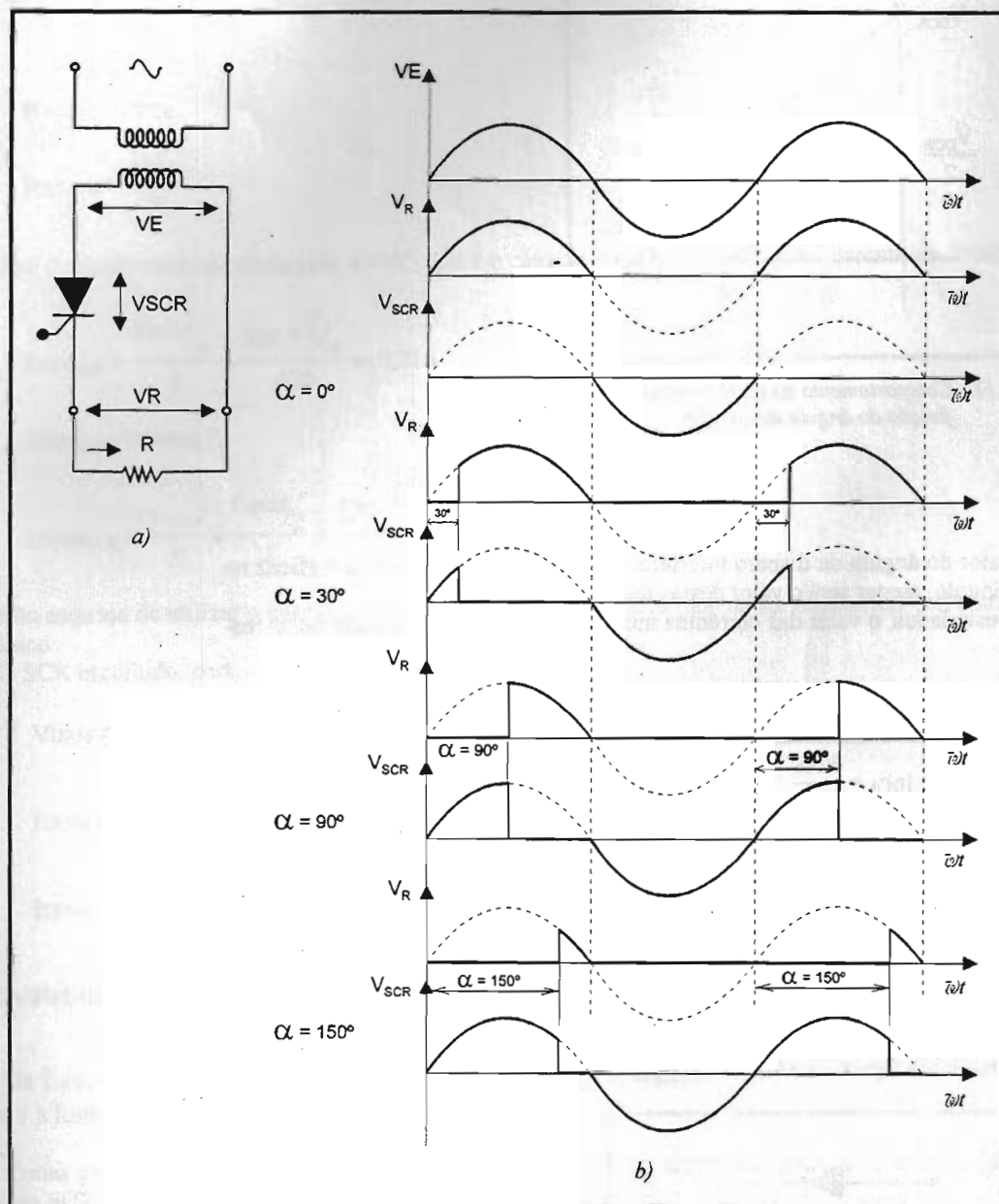


Fig.10.16 - a) Circuito do retificador monofásico controlado.

b) Formas de ondas na carga para diferentes valores de  $\alpha$ .



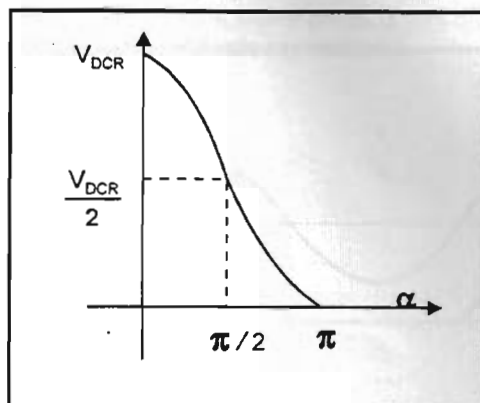


Fig. 10.17 - Comportamento da tensão média na carga em função do ângulo de disparo.

Concluimos, portanto, que o valor do ângulo de disparo interfere no valor das tensões média e eficaz na carga e quanto maior o valor deste ângulo, menor será o valor destas tensões.

Como nos outros retificadores estudados, o valor das correntes média e eficaz na carga é dado pelas respectivas expressões:

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} \quad 10.41 \quad \text{e} \quad I_{DCR} = \frac{V_{DCR}}{R} \quad 10.42$$

Para especificarmos o tiristor deste retificador, devemos fazer o cálculo para  $\alpha = 0^\circ$ , pois é neste caso que teremos maior valor de corrente neste componente.

Exercício:

- 1) Especifique o SCR para o circuito da figura 10.18.

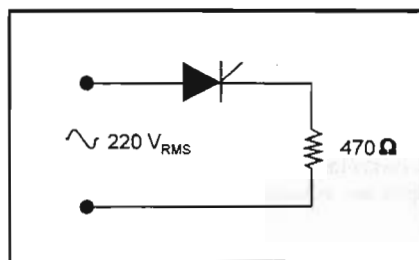


Fig. 10.18 - Circuito do retificador monofásico controlado de 1/2 onda.

$$V_{DRM} \geq 1,5 V_{DWM} \text{ (vide capítulo 4)}$$

$$V_{DRM} \geq 1,5 \cdot 220 \cdot \sqrt{2} = 465,3V$$

Neste circuito, a corrente do SCR é igual a corrente na carga

$$I_{TAV_{SCR}} = I_{DCR}$$

$$I_{TAV_{SCR}} = \frac{V_{DCR}}{R}$$

Obs: A tensão será calculada para  $\alpha = 0^\circ$ , pois é o caso onde irá circular a maior corrente no tiristor.

$$I_{TAV_{SCR}} = \frac{V_{max}/\pi}{R} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}/\pi}{470} = 0,21A$$

$$I_{TRMS_{SCR}} = I_{RMSR}$$

$$I_{TRMS_{SCR}} = \frac{V_{RMSR}}{R} = \frac{V_{max}/2}{R} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}/2}{470} = 0,33A$$

Não esqueça de utilizar o fator de segurança de pelo menos 50% quando for especificar um componente eletrônico.

O SCR escolhido, portanto, deverá apresentar

$$V_{DRM} \geq 465,3V$$

$$I_{TAV_{SCR}} = 0,21 \cdot 1,5 = 0,32 A$$

$$I_{TRMS_{SCR}} = 0,33 \cdot 1,5 = 0,5 A$$

#### 0.4.2- Retificador monofásico controlado de onda completa

Na figura 10.19 é apresentado o circuito do retificador monofásico controlado de onda completa em ponte e a forma de onda na carga para  $\alpha = 60^\circ$ .

Como podemos verificar na figura 10.19.b, o SCR<sub>1</sub> deve ser disparado junto com o SCR<sub>4</sub> e o SCR<sub>2</sub> junto do SCR<sub>3</sub>.

Uma outra forma de construirmos o retificador monofásico controlado de onda completa é através da utilização de um transformador de tape central, conforme está apresentado na figura 10.20.

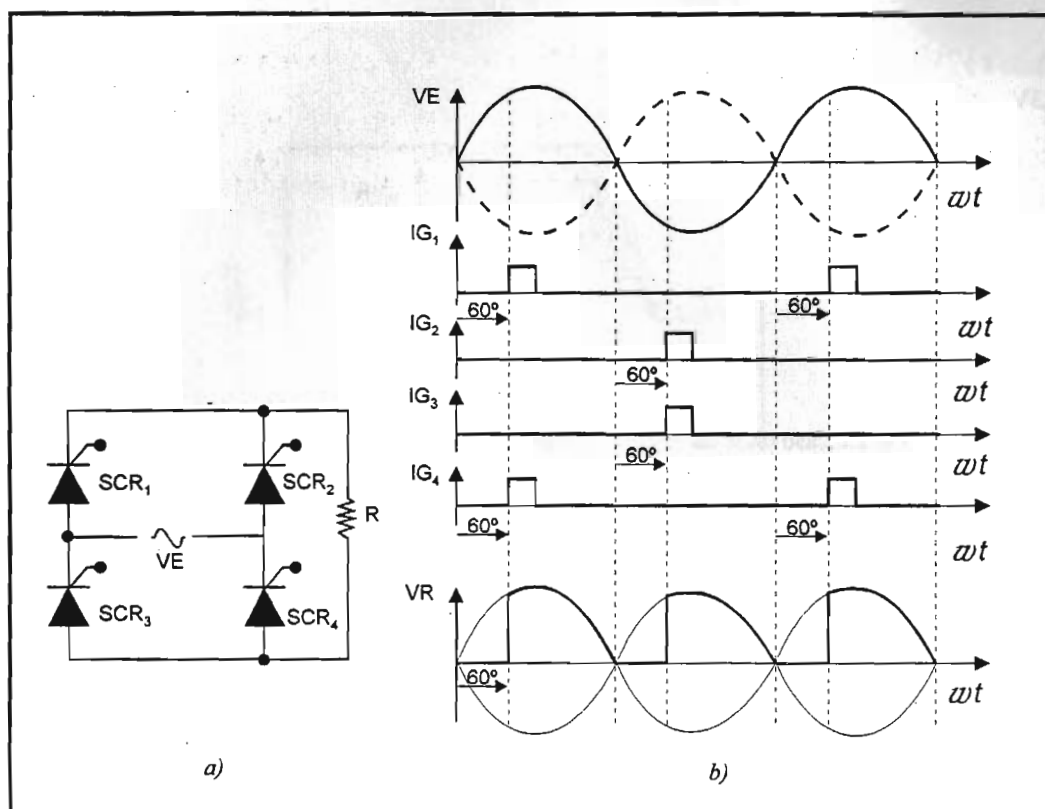


Fig. 10.19 - a) Circuito do retificador monofásico controlado de onda completa.  
b) Formas de ondas para  $\alpha = 60^\circ$ .

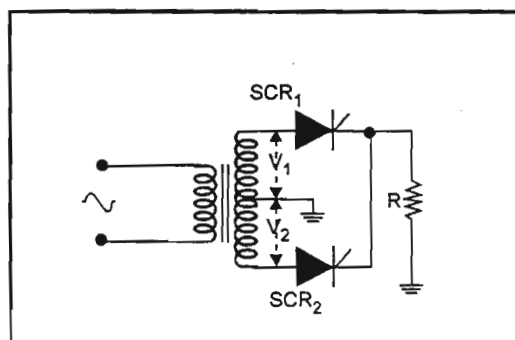


Fig. 10.20 - Retificador monofásico controlado de onda.

Neste circuito, apenas um tiristor se encontra diretamente polarizado a cada semiciclo do sinal da rede e ao receber o pulso no gate, entrará em condução.

Ao controlarmos o instante de surgimento do pulso no gate, estamos controlando o ângulo de disparo e com isto a potência dissipada na carga.

A tensão na saída deste retificador pode variar desde zero ( $\alpha = 180^\circ$ ) até o valor máximo, correspondente a  $\alpha = 0^\circ$ .

Para facilitar os nossos trabalhos, a partir deste ponto em diante, apresentaremos a integral a ser trabalhada e o resultado da integração. Caberá a você desenvolver a expressão e obter o resultado apresentado. Quando na integral surgir alguma forma de dedução ainda não apresentada, neste caso, será feita a demonstração completa da mesma.

A tensão média na carga, para este retificador, é obtida através da expressão:

$$V_{DCR} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha] \quad 10.43$$

A tensão eficaz na carga para este retificador é obtida através da expressão:

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{max} \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{\pi} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} \right)} \quad 10.44$$

#### 10.4.3 - Retificador Trifásico Controlado de 1/2 Onda

O retificador trifásico controlado de 1/2 onda é constituído por 3 SCR's e na figura 10.21 é apresentado o circuito deste retificador.

Neste retificador, cada tiristor poderá ser disparado a partir do ponto em que a fase, na qual estiver ligada, for mais positiva do que as outras. Esta situação ocorre no cruzamento das fases e por isto este ponto é considerado como referência para a definição de ângulo de disparo.

O ponto de cruzamento das fases é chamado de ponto de comutação natural, pois é neste local onde ocorre a troca entre diodos nos retificadores não controlados. O ponto de comutação natural corresponde a  $0^\circ$  do eixo de referência e a um ângulo de disparo de  $0^\circ$ .

Nos retificadores controlados, o ângulo de disparo igual a  $0^\circ$  corresponde ao ponto onde os diodos comutariam, se no lugar dos tiristores tivéssemos estes componentes.

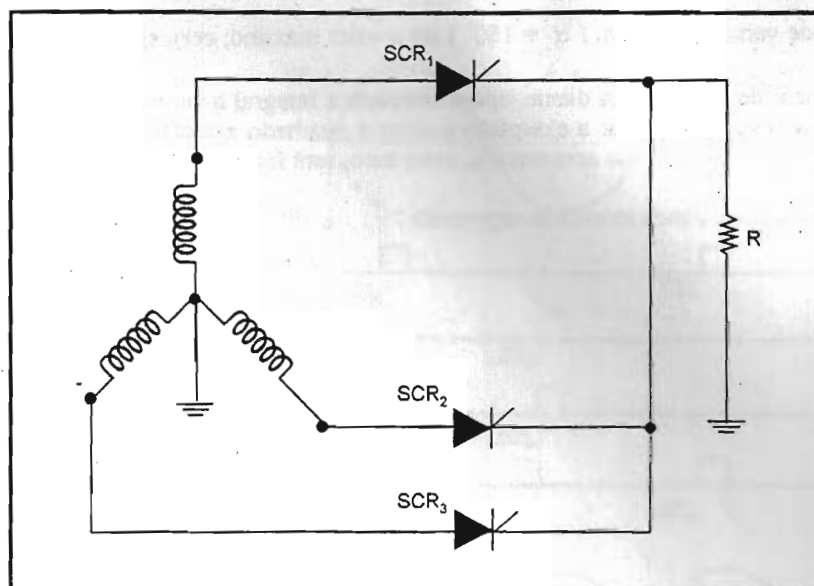


Fig.10.21 - Retificador trifásico controlado de 1/2 onda.

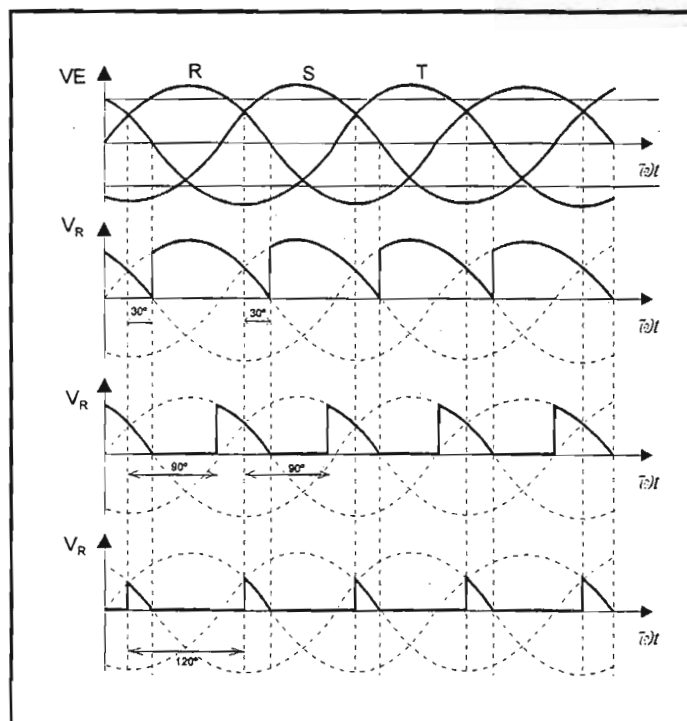


Fig.10.22 - Formas de ondas na carga do retificador trifásico controlado de 1/2 onda para diferentes valores de  $\alpha$ .

Concluimos, portanto, que nos retificadores trifásicos controlados, o ângulo de disparo igual a  $0^\circ$  corresponde a  $30^\circ$  do eixo de referência e por isto a faixa de disparo para o circuito da figura 10.21 é de  $0^\circ$  a  $150^\circ$ .

Neste retificador, com o aumento do ângulo de disparo, o valor das tensões média e eficaz na carga diminui. Na figura 10.22 são apresentadas formas de ondas na carga para diferentes ângulos de disparo.

Para ângulos de disparo menores ou iguais a  $30^\circ$ , o regime de tensão na carga é contínuo, ou seja, não há intervalos sem tensão na mesma.

Para ângulos de disparo acima de  $30^\circ$ , o regime de tensão na carga é descontínuo, ou seja, há intervalos sem tensão na mesma.

Este aspecto deverá ser observado, quando formos calcular o valor das tensões médias e eficaz na carga, pois o limite superior da integração, para ângulos de disparo menores do que  $30^\circ$ , será diferente em relação aos ângulos superiores a  $30^\circ$ .

O valor médio de tensão na carga para  $\alpha \leq 30^\circ$  é calculado com os seguintes limites:

$$\text{limite inferior} = \left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{limite superior} = \left(\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}\right) = \left(\alpha + \frac{5\pi}{6}\right)$$

$$V_{DCR} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{(\alpha+\pi/6)}^{(\alpha+5\pi/6)} V_{max_{FN}} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} \left[ -\cos \omega t \right]_{\left(\alpha+\frac{\pi}{6}\right)}^{\left(\alpha+\frac{5\pi}{6}\right)}$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} \left[ -\left(\cos\left(\alpha + \frac{5\pi}{6}\right) - \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)\right) \right]$$

Obs:  $\cos(a+b) = \cos a \cdot \cos b - \sin a \cdot \sin b$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} \left[ -\left(\left(\cos \alpha \cdot \cos \frac{5\pi}{6} - \sin \alpha \cdot \sin \frac{5\pi}{6}\right) - \left(\cos \alpha \cdot \cos \frac{\pi}{6} - \sin \alpha \cdot \sin \frac{\pi}{6}\right)\right) \right]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} \left[ -\left((-0,866 \cos \alpha - 0,5 \sin \alpha) - (0,866 \cos \alpha - 0,5 \sin \alpha)\right) \right]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} \left[ -(-0,866 \cos \alpha - 0,5 \sin \alpha - 0,866 \cos \alpha + 0,5 \sin \alpha) \right]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} [1,73 \cdot \cos \alpha]$$

$$V_{DCR} = 0,83 \cdot V_{máx_{FN}} \cdot \cos \alpha \quad 10.45$$

Expressando o valor da tensão média na carga em função da tensão eficaz fase-neutro da senóide temos:

$$V_{DCR} = 0,83 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{RMS_{FN}} \cdot \cos \alpha$$



$$V_{DCR} = 1,17 \cdot V_{RMS_{FN}} \cdot \cos \alpha \quad 10.46$$

O valor da tensão média na carga para ângulos de disparo acima de  $30^\circ$ , possui o seguinte valor:

$$\text{limite inferior} = \left( \alpha + \frac{\pi}{6} \right)$$

$$\text{limite superior} = \pi$$

$$V_{DCR} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{(\alpha+\pi/6)}^{\pi} V_{max_{FN}} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} \left[ -\cos \omega t \right]_{(\alpha+\pi/6)}^{\pi}$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} [-(\cos \pi - \cos(\alpha + \frac{\pi}{6}))]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} [-(-1 - \cos(\alpha + \frac{\pi}{6}))]$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max_{FN}}}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + \frac{\pi}{6})]$$

$$V_{DCR} = 0,48 V_{máx_{FN}} [1 + \cos(\alpha + \frac{\pi}{6})] \quad 10.47$$

Na figura 10.23 temos o circuito de disparo de um retificador trifásico controlado de  $\frac{1}{2}$  onda, com o TCA 780 ou TCA 785.

Na figura 10.23.b, podemos observar que cada módulo de disparo está sincronizado com uma tensão fase-neutro. Os pinos de número 11 foram interligados, de modo que ao variarmos  $P_2$  estamos variando a tensão de controle dos três módulos de disparo de forma simultânea.

A presença de  $R_X$  garante, ao curto-circuitarmos  $P_2$ , que a tensão de controle não seja 0V e com isto asseguramos que para um ângulo de disparo igual a  $0^\circ$ , o tiristor receberá um pulso a  $30^\circ$  do eixo de referência (tensão fase-neutro).

#### 10.4.4- Retificador trifásico controlado de onda completa.

Neste circuito, todos os diodos da ponte trifásica são substituídos por tiristores, como é apresentado na figura 10.24.

Cada tiristor deve ter o seu circuito de disparo e a numeração da ponte segue a sequência de disparo dos tiristores.

Em relação ao circuito da figura 10.24, podemos tecer os seguintes comentários:

$R_x \Rightarrow$  garante que para o potenciômetro na sua posição mínima, o ângulo de disparo mínimo será o **ponto de comutação natural**.

$P_2 \Rightarrow$  controla o ângulo de disparo simultaneamente dos três módulos, através da variação da tensão de controle do pino 11 de cada módulo de disparo.

$15A \Rightarrow$  saída de pulso positivo, durante o semiciclo positivo, para a confirmação do SCR que irá operar juntamente com o SCR que também está recebendo este pulso de disparo.

$15E \Rightarrow$  entrada do pulso de confirmação vindo de outro módulo de disparo.

$14A \Rightarrow$  saída de pulso positivo, durante o semiciclo negativo, para a confirmação do SCR que irá operar juntamente com o SCR que também está recebendo este pulso de disparo.

$14E \Rightarrow$  entrada do pulso de confirmação vindo de outro módulo de disparo.

Através da figura 10.24.a, podemos verificar a interligação destes módulos. Para o entendimento destas interligações, é necessário compreender a sequência na qual os tiristores serão disparados e com este intuito apresentamos, na figura 10.25, o mapa de pulsos desta ponte retificadora.

O mapa de pulsos apresenta os tiristores que estão recebendo pulso a cada instante e a sequência de disparo dos mesmos.

Supondo  $\alpha = 30^\circ$ , cada pulso irá surgir a **30° do ponto de comutação natural**.

A cada instante, teremos um pulso que será levado a dois tiristores diferentes, pois a ponte para funcionar precisa que haja o disparo de dois SCR's, a fim de fechar o percurso de corrente na carga.

Através da figura 10.25, podemos perceber que o primeiro pulso deverá disparar o tiristor da fase **R+** e também deverá ser levado para o tiristor da fase **S-**.

O segundo pulso de disparo será responsável pelo disparo do tiristor da fase **T-** e também deverá controlar o disparo do tiristor da fase **R+**. Caso estivéssemos ligando a ponte neste exato instante, estaríamos disparando estes dois tiristores, pois o tiristor responsável pela fase **R+** não havia sido disparado anteriormente.

Você poderá continuar analisando o mapa de pulsos e verificar, que a cada ponto de disparo, teremos dois SCR's recebendo pulso.

Na figura 10.26, temos a forma de onda neste retificador para alguns valores de  $\alpha$ .

Deve ser lembrado que o ponto de comutação natural fica a **30° do eixo de referência, no caso das tensões fase-neutro, e a 60° do eixo de referência, no caso das tensões fase-fase**.

Neste retificador, quando  $\alpha \leq 60^\circ$  o regime é **contínuo** (vide figura 10.26.c e 10.26.d) e para ângulos superiores a  $60^\circ$  o regime é **descontínuo**.

O valor médio de tensão na carga para  $\alpha \leq 60^\circ$  é calculado através da seguinte expressão.

$$\text{limite inferior} = \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$\text{limite superior} = \left( \alpha + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{3} \right) = \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$V_{DCR} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)}^{\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)} V_{m\acute{a}x_{FF}} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t$$

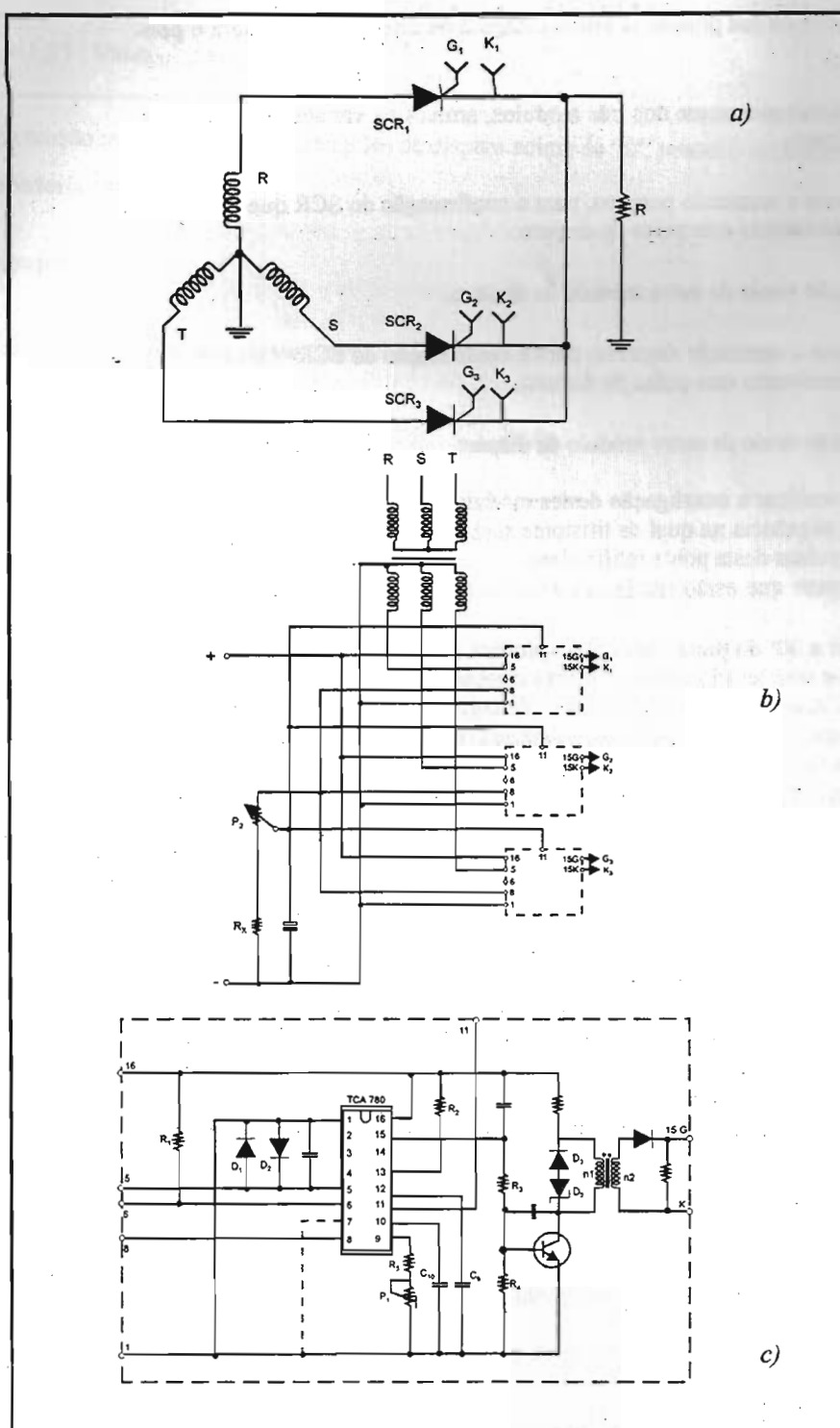


Fig.10.23 - a) Circuito do retificador trifásico controlado de 1/2 onda.  
 b) Interligação dos módulos de disparo.  
 c) Circuito interno do módulo de disparo.

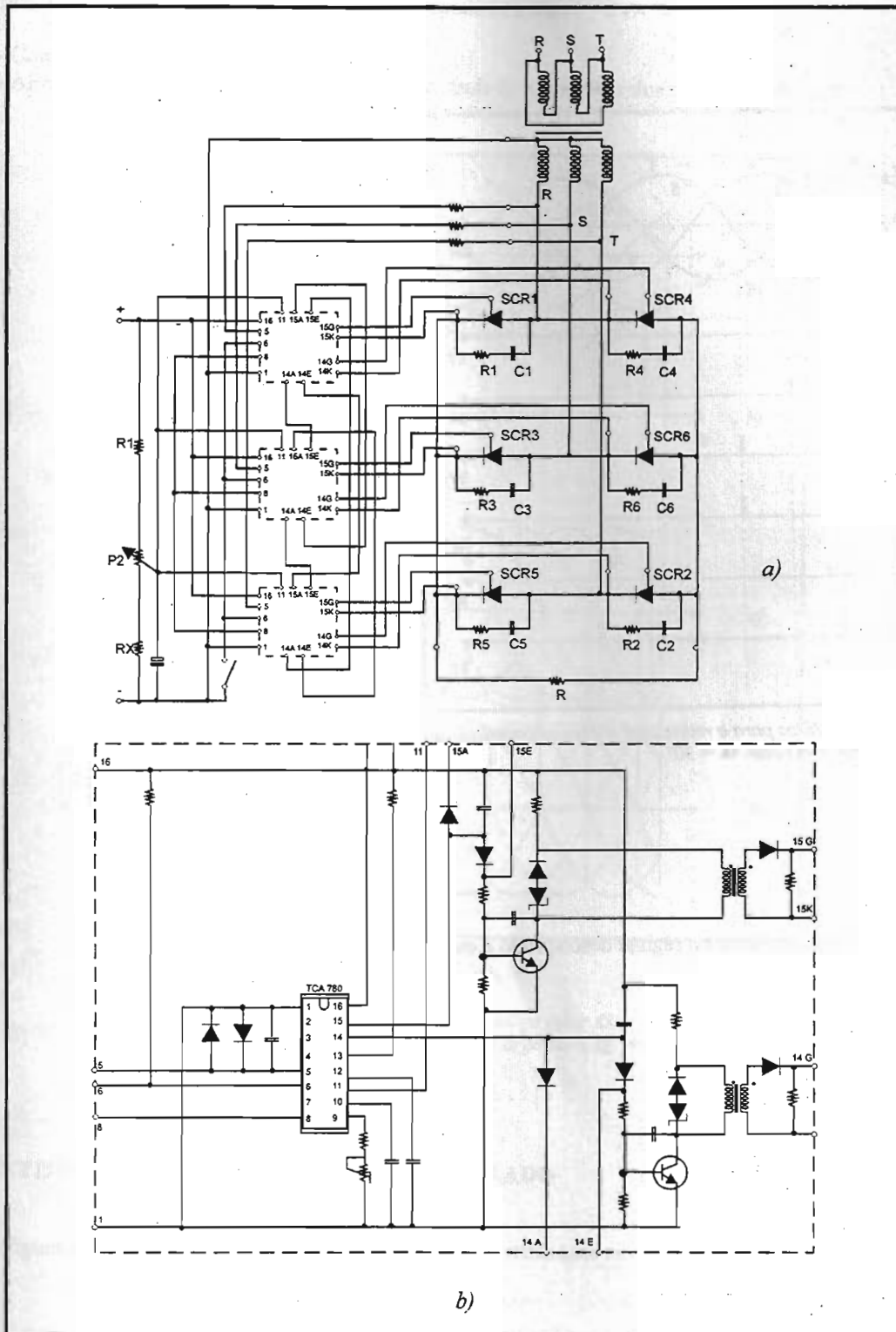


Fig.10.24 - a) Retificador trifásico controlado de onda completa com os módulos de disparo.  
b) Circuito interno do módulo de disparo.

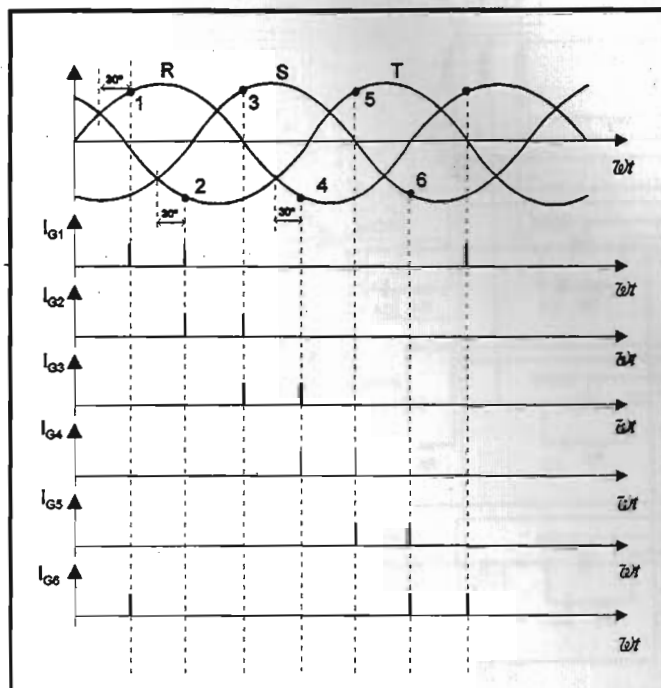


Fig. 10.25 - Mapa de pulsos para o retificador trifásico controlado de onda completa com  $\alpha = 30^\circ$ .

$$V_{DCR} = \frac{3V_{maxFF}}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

Caso o ângulo de disparo seja maior que  $60^\circ$ , temos o regime descontínuo e os valores dos limites para a integração são:

$$\text{limite inferior: } \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$\text{limite superior: } \pi$$

$$V_{DCR} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right)}^{\pi} V_{maxFF} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = \frac{3V_{maxFF}}{\pi} \left[ 1 + \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right]$$

Entre as aplicações dos retificadores controlados podemos citar:

- 1- Controle de velocidade de motor C.C.
- 2- Alimentação de inversores nos sistemas de controle de velocidade dos motores de indução.

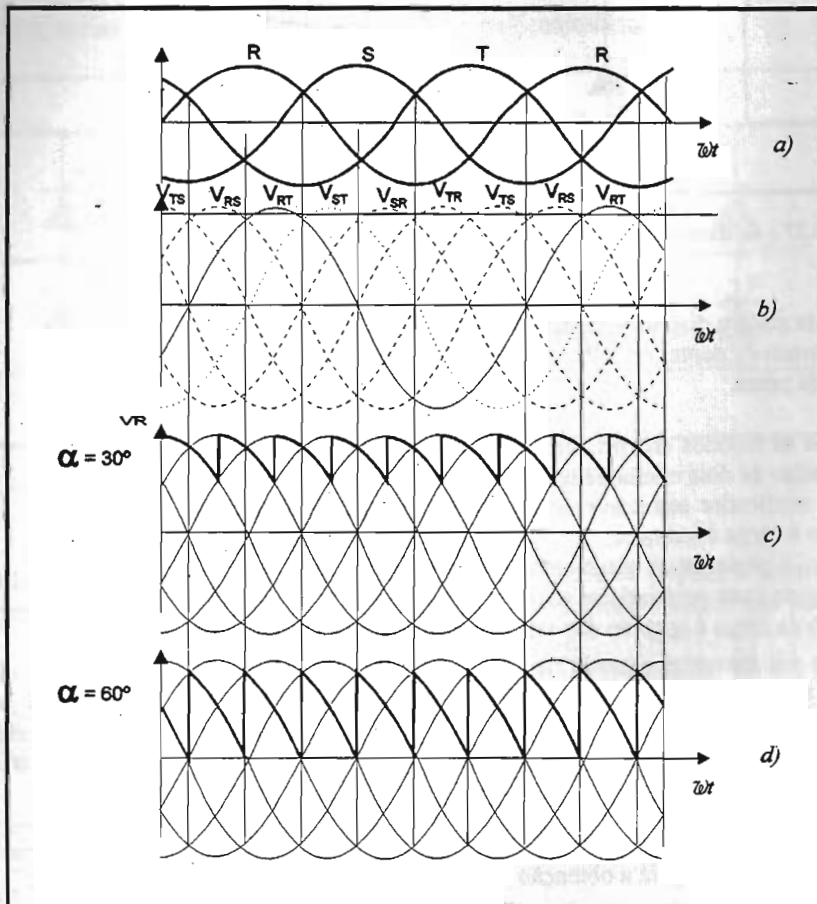


Fig. 10.26 - a) Tensões fase - neutro.  
 b) Tensões fase - fase.  
 c) Formas de ondas na carga para  $\alpha = 30^\circ$ .  
 d) Formas de ondas na carga para  $\alpha = 60^\circ$ .

## 10.2 RETIFICADOR MONOFÁSICO SEMICONTROLADO

Na figura 10.27 temos as configurações possíveis para o retificador monofásico semicontrolado.

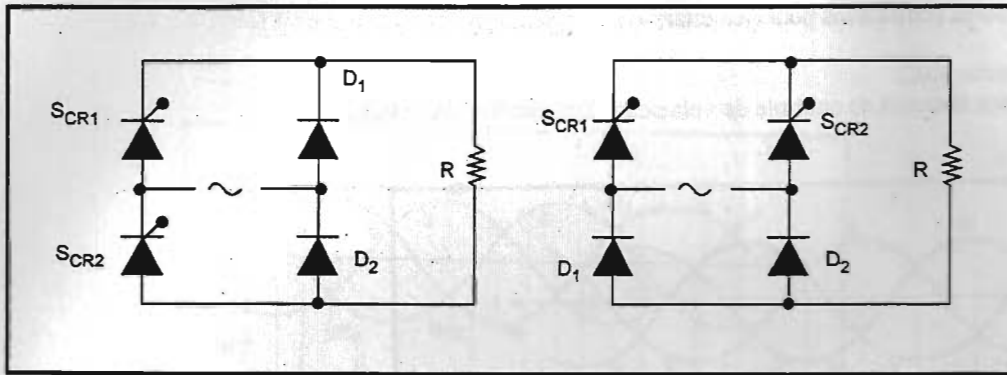


Fig. 10.27 - Retificadores semicontrolados.

Na prática, os braços controlados da ponte podem dispor-se de duas maneiras:

- Com dois tiristores ligados no mesmo braço da ponte
- Com um tiristor ligado em cada braço da ponte.

A segunda opção facilita o disparo, pois os catodos dos tiristores estão ligados em um mesmo ponto, permitindo a utilização de transformador de pulso de dois enrolamentos.

A diferença entre o comportamento do retificador semicontrolado para o controlado não é percebida quando a carga é resistiva, mas apenas quando a carga é indutiva.

Como será analisado no próximo capítulo, a presença de carga indutiva permite a ocorrência da **regeneração** (devolução de energia da carga para a rede) nos retificadores controlados.

Neste retificador, o valor médio de tensão na carga é igual ao dos retificadores controlados, ou seja:

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Na figura 10.28 temos outras configurações possíveis para a obtenção de retificadores semicontrolados.

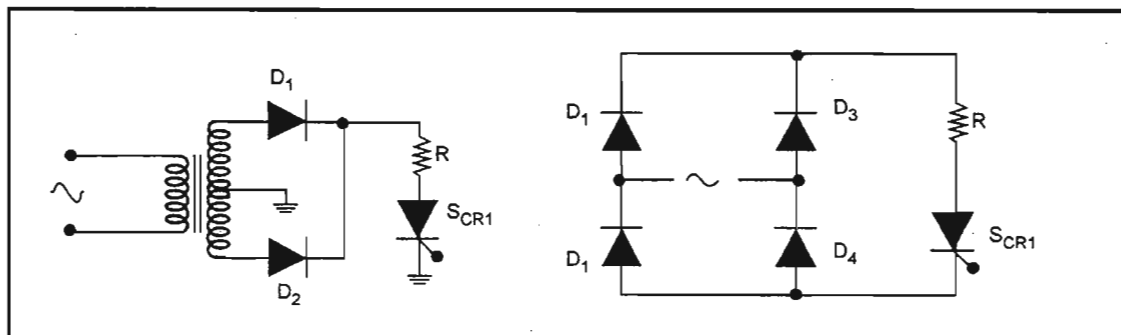


Fig. 10.28 - Retificadores monofásicos semicontrolados.



Nos circuitos da figura 10.28, podemos notar que só haverá corrente na carga quando o tiristor for disparado, realizando, portanto, através da variação do ângulo de disparo, o controle da tensão de saída do retifica-

## 26- RETIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO

Na figura 10.29, temos o circuito do retificador trifásico semicontrolado.

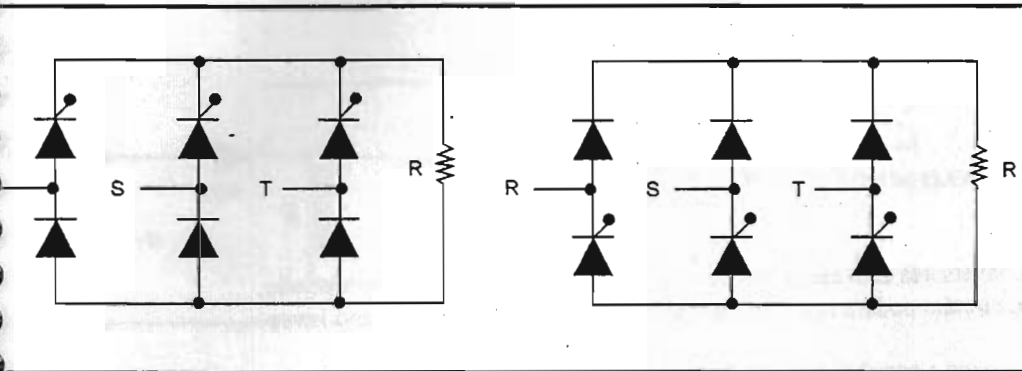


Fig.10.29 - Retificadores trifásicos semicontrolados.

Nos semiciclos onde temos a condução através de tiristores, podemos realizar o controle do ângulo de disparo. Nos semiciclos onde temos a condução através de diodos, o disparo ocorre nos **pontos de comutação natural**.

Comparando com o retificador controlado, verificamos que este circuito apresenta um circuito de disparo mais simples (principalmente com a ligação comum dos catodos), é mais barato e não regenera quando temos carga indutiva na saída.

A tensão média na saída deste retificador é dada pela expressão:

$$V_{DCR} = \frac{3V_{max}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$