

# Retificadores: Mono e Multifásicos

Batista, H.O.B.<sup>1</sup>, Alves, W. F. O.<sup>2</sup>, Gomes, T.R.A.G.<sup>3</sup>.

Matriculas: 96704<sup>1</sup>, 96708<sup>2</sup>, 86305<sup>3</sup>

Departamento de Engenharia Elétrica,

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

e-mails: hiago.batista@ufv.br<sup>1</sup>, werikson.alves@ufv.br<sup>2</sup>, thiago.ridogério@ufv.br<sup>3</sup>

**Resumo**—Este artigo retrata o estudo sobre retificadores, os quais convertem a energia CA em CC. Neste trabalho, serão abortados 5 tipologias de retificadores sendo elas: Retificador de meia onda, de onda completa com tap central, de onda completa em ponte com tap central, trifásico em ponte e por último o retificador de 12 pulsos. Em seguida, serão obtidos seus parâmetros de desempenho em cada tipologia. Ao final será feito um comparativo entre as diferentes topologias a fim de estabelecer as vantagens e desvantagens das aplicações de cada tipologia de retificação analisada.

**Palavra Chave**— Retificador, Diodo, Eletrônica de Potência.

**Abstract**—This article does the study of rectifiers, which convert AC power to DC. In this work, 5 types of rectifiers will be aborted, namely: Half-wave rectifier, full wave with central tap, full wave in bridge with central tap, three-phase in bridge and finally the 12-pulse rectifier. Then, your performance parameters will be obtained for each typology. At the end, a comparison will be made between the different topologies in order to establish the advantages and disadvantages of the applications of each type of grinding analyzed.

**Keywords**— Rectifier, Diode, Power Electronics.

## I. INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais globalizado e dependente de energia elétrica surge a necessidade de ter precaução em relação à qualidade de energia [4]. Atualmente, o emprego de semicondutores de potência atuando como chaves (ora aberta, ora fechada), representou um aumento substancial no rendimento e uma grande mudança de paradigma no processamento de energia [2].

Diante das qualidades de se usar semicondutores, as fontes chaveadas se tornaram muito populares em um vasto leque de aplicações, tanto nas industriais (equipamentos de áudio e empilhadeiras) como nas domésticas (televisores, computadores, impressora) [2].

Entretanto, uma fonte chaveada, se trata de um conversor CC-CC, e a fonte de energia disponível pelas concessionárias (normalmente) é CA, diante disto a maior parte das fontes chaveadas, utilizam um estágio retificador na sua entrada [5].

Diante disto, torna-se necessário, conhecer as topologias e desempenho dos diversos tipos de retificadores. Neste trabalho será estudados cinco tipos de retificadores: Retificador de meia onda, de onda completa com tap central, de onda completa em ponte com tap central, trifásico em ponte e por último o retificador de 12 pulsos.

## II. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são calcular os seguintes itens abaixo para os cinco diferentes tipos de retificadores:

- Calcular o valor eficaz da tensão e corrente na carga;
- Calcular o valor médio da tensão e corrente na carga;

- Calcular os fatores de desempenho:  $\eta$ ,  $V_{CA}$ , FF, FR, FUT e FP.

## III. METODOLOGIA

Neste trabalho serão analisadas as topologias, citadas anteriormente, por meio do simulador *PLECS* e da linguagem de programação *Python*. Para o cálculo e a análise dos resultados foram utilizados os parâmetros de desempenho [7], sendo eles,

- Os valores eficazes ( $V_{RMS}$ ) da tensão e corrente:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (1)$$

- Os valores médios ( $V_{CC}$ ) da tensão e corrente:

$$V_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2)$$

- A eficiência ( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{P_{CC}}{P_{CA}} = \frac{V_{CC} I_{CC}}{V_{CA} I_{CA}} \quad (3)$$

- O valor eficaz da componente CA da tensão de saída ( $V_{CA}$ ):

$$V_{CA} = \sqrt{V_{RMS}^2 - V_{CC}^2} \quad (4)$$

- O fator de forma, que é uma medida da forma da tensão de saída (FF):

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{CC}} \quad (5)$$

- O fator de ondulação ou fator de *ripple*, que é uma medida do conteúdo de ondulação (FR):

$$FR = \frac{V_{CA}}{V_{CC}} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (6)$$

- O fator de utilização do transformador (FUT):

$$FUT = \frac{P_{CC}}{V_S I_S} \quad (7)$$

- O fator de potência (FP):

$$FP = \frac{P_{CA}}{V_S I_S} \quad (8)$$

Para a execução das simulações, como configuração inicial geral, foram utilizados os parâmetros que são apresentados na Tabela I.

Tabela I: Configurações iniciais gerais.

Grandeza	Valor
Passo da simulação	1/60/1000
$V_{RMS}$	127 V
$f$	60 Hz
$R_C$	12 $\Omega$
Relação do transformador monofásico	2/1 : 1
Relação do transformador com tap central	2/1 : 1
Relação do transformador trifásico $\Delta - Y$	10/10 $\sqrt{3}$
Resistência do enrolamento do transformador trifásico $\Delta - Y$	10/10 [ $\mu\Omega$ ]
Indutância de dispersão do transformador $\Delta - Y$	10/10 [ $\mu H$ ]
Relação do transformador $Y/\Delta - Y$	10/10 $\sqrt{3}$ : 10
Indutância de dispersão do transformador trifásico $Y/\Delta - Y$	20/10 : 10 [ $\mu H$ ]
Resistência do enrolamento do transformador $Y/\Delta - Y$	0,1/0,1 : 0,1 [ $m\Omega$ ]

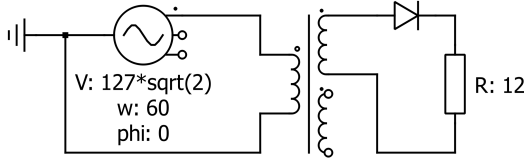


Figura 1: Retificador de meia onda.  
(Fonte: Próprio Autor)

#### A. Retificador meia onda

O primeiro circuito a ser analisado é o retificador de meia onda, Figura 1, o qual recebe um sinal CA e o converte para um sinal CC variável que alimenta uma carga puramente resistiva.

Inicialmente, uma fonte de tensão alternada alimenta o transformador no primário. No secundário, a tensão de saída é dividida em dois estágios, o semiciclo positivo e o semiciclo negativo.

No primeiro estágio, devido ao sentido em que o diodo foi conectado, a corrente circula normalmente no circuito, energizando a carga. No segundo estágio, o diodo no circuito impede a passagem da corrente no sentido contrário ao dele, logo a tensão na carga é zero. Os parâmetros iniciais adotados nesta simulação são apresentadas na Tabela I.

#### B. Retificador de Onda Completa Com Tap Central

Para este tipo de circuito, Figura 2 durante meio ciclo, um diodo estará polarizado diretamente e o outro reversamente, logo, neste período teremos um diodo permitindo a passagem de corrente enquanto o outro está bloqueando. Durante a outra metade do ciclo os papéis se invertem. O diodo que antes conduzia agora passa a bloquear e o diodo que bloqueava agora permite a passagem da corrente. O resultado desse processo é polarização fixa do sinal durante todo ciclo, ou seja, se não há inversão de polaridade a onda está contínua e portando o sinal foi retificado. Cada diodo do circuito deve ser dimensionado para suportar o dobro da tensão sobre a carga. O sinal de saída pode ser verificado na figura 6 no gráfico com título "Onda completa com Tap Central"

O Retificador de Onda Completa com Tap Central possuem as desvantagens de ter sua aplicação limitada a 10 W, o transformador com Tap (derivação central) provoca um aumento no custo do transformador. Este aumento de custo ainda é potencializado devido a corrente CC que flui no secundário do transformador. Por outro lado, esse tipo de retificador é de fabricação simples, a frequência de ondulação é o dobro da frequência de alimentação e ainda tem a capacidade de proporcionar isolamento elétrica.

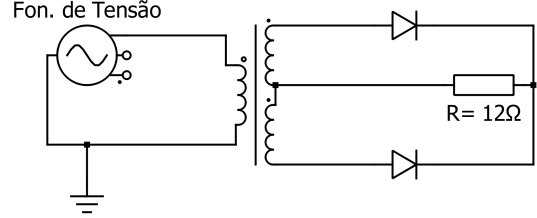


Figura 2: Retificador de onda completa  
(Fonte: Próprio Autor)

#### C. Retificador de Onda Completa em Ponte

Uma alternativa para retificar uma onda por completa é utilizar o Retificador de Onda completa em Ponte, mostrado na Figura 3. Esse tipo de retificador possui uma ponte contendo 4 diodos, sendo que dois deles conduzem durante o primeiro meio ciclo e os outros durante o meio ciclo final. A grande vantagem desse tipo de retificador é que estão associados a aplicação industrial, uma vez que suportam até 100 kW, a tensão reversa suportadas pelos diodos devem ser a mesma tensão da carga e também dispensam a utilização de transformadores com Tap central, que geram custo mais altos para a fabricação dos retificadores.

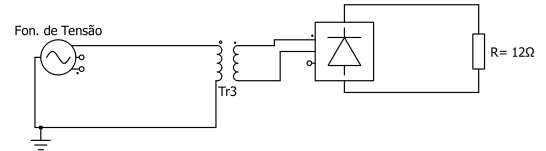


Figura 3: Retificador de Onda Completa em Ponte com Tap Central  
(Fonte: Próprio Autor)

#### D. Retificador trifásico em ponte

Para o quarto circuito, foi simulado o retificador trifásico em ponte, tendo este basicamente a mesma função que um retificador monofásico em ponte, em outras palavras, um conversor CA/CC para fontes trifásicas. Este modelo de retificador possui outras determinadas variações, como por exemplo 6 pulsos, 12 pulsos e 36 pulsos, entretanto, por agora será analisado apenas o retificador trifásico em ponte para seis pulsos.

O circuito utilizado é apresentado na Figura 4, no qual foram utilizados um transformador, estando o primário em Delta ( $\Delta$ ) e o secundário em Estrela ( $Y$ ), seis diodos e uma carga resistiva.

Na montagem, em cada caminho que a corrente percorre foram conectados dois diodos, formando uma ponte, dessa forma realizando a retificação completa da tensão na carga.

É importante ressaltar que devido a fonte trifásica o diodo não irá permanecer polarizado o tempo todo. Isto ocorre devido ao fato dos sinais de tensão possuírem defasagem entre si de 120°, assim cada diodo permanecerá polarizado somente

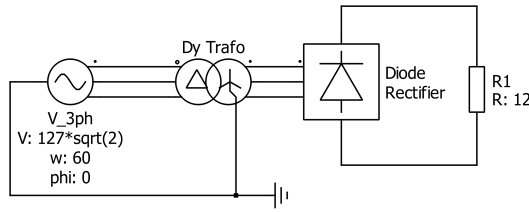


Figura 4: Retificador trifásico em ponte.  
(Fonte: Próprio Autor)

durante esta faixa, e desta forma, mantém a carga "praticamente" energizada dentro de uma faixa de tensão devido a sobreposição dos sinais. Para esta simulação foram considerados os parâmetros citados na Tabela I.

#### E. Retificador 12 Pulsos

Por último, será analisado o retificador de 12 pulsos. A maneira mais tradicional de se obter um retificador 12 pulsos, é a forma que está ilustrada na Figura 5, ou seja, o primário em Estrela (Y) e no lado dos secundários em Delta ( $\Delta$ ) e Estrela (Y); dessa forma será obtido uma defasagem de  $30^\circ$  entre as tensões do secundário.

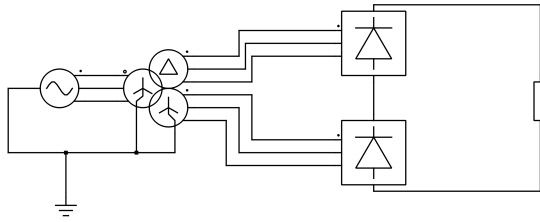


Figura 5: Retificador 12 Pulsos.  
(Fonte: Próprio Autor)

Para esta simulação, será utilizado o circuito da Figura 5, que utiliza uma conexão  $Y/\Delta-Y$ , porém também poderia ser utilizado a conexão  $\Delta/\Delta-Y$ , pois fornece  $30^\circ$  de defasagem entre as tensões retificadas [6].

Portanto, serão utilizados os seguintes valores iniciais, conforme mostra a Tabela I e a partir disto será determinado todos os parâmetros já mencionados.

### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### A. Valor eficaz e Valor médio

Para esta simulação, iremos ilustrar apenas as curvas de tensão na carga, visto que, como a carga é puramente resistiva, não há deslocamento de fase entre corrente e tensão, sendo assim a diferença entre a curva de tensão e corrente, será apenas na amplitude.

A Figura 6 ilustra as diferentes curvas de tensão nos diferentes tipos de retificadores.

Dado o gráfico da Figura 6, a Tabela II mostra os valores obtidos para a tensão eficaz, corrente eficaz, tensão média e corrente média dos cinco diferentes tipos de retificadores.

#### B. Fatores de Desempenho

A partir dos valores eficazes e médios simulados e das Equações apresentadas na metodologia, foi construída a Tabela III, e a Figura 7, que expõem os fatores de desempenho para cada retificador.

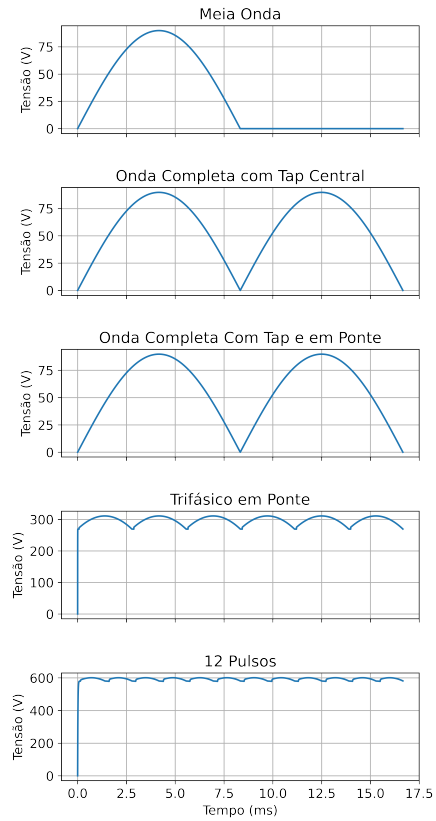


Figura 6: Tensão na carga durante um período.  
(Fonte: Próprio Autor)

Tabela II: Valores de Corrente e Tensão

Retificador	$V_{ef}$ (V)	$I_{ef}$ (A)	$V_{cc}$ (V)	$I_{cc}$ (A)
Meia Onda	44,90	3,74	28,58	2,38
Onda Completa c/ Tap	63,50	5,29	57,15	4,76
Onda Completa c/ Tap em Ponte	63,50	5,29	57,15	4,76
Trifásico	297,22	24,77	296,95	24,75
12 Pulsos	593,15	49,43	593,12	49,43

Tabela III: Fatores de Desempenho

Retificador	$\eta$	$V_{ca}$	FF	FR	FUT	FP
Meia Onda	0,405	34,630	1,571	1,212	0,286	0,707
Onda Completa c/ Tap	0,810	27,650	1,111	0,484	0,810	1,000
Onda Completa c/ Tap em Ponte	0,810	27,650	1,111	0,484	0,810	1,000
Trifásico	0,998	12,690	1,001	0,043	0,958	0,960
12 Pulsos	0,999	7,470	1,000	0,013	0,957	0,957

#### C. Análise

Diante dos resultados obtidos, verificamos que o retificador de 12 pulsos se destaca como um dos melhores retificadores, pois apresenta os melhores parâmetros de desempenho (Figura 7), e também como pode se ver na Figura 6, é o que tem a forma de onda mais próxima de uma tensão contínua.

Outro fato importante de se analisar é o que os retificadores de onda completa monofásicos, apesar de possuírem topologias diferentes como mostra as Figuras 2 e 3, ambos apresentaram

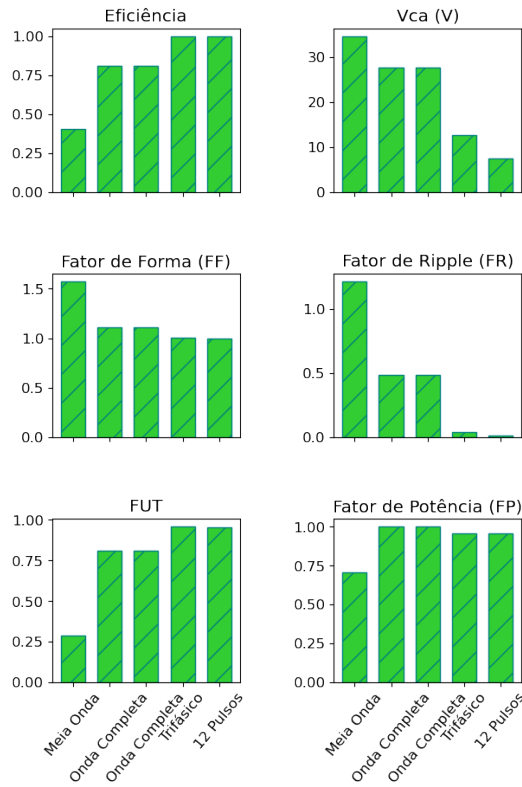


Figura 7: Fatores de Desempenho dos Retificadores  
(Fonte: Próprio Autor)

respostas iguais, tendo os mesmos valores de desempenho (Figura 7) e a mesma curva de tensão (Figura 6). Entretanto não são iguais, pois no caso do retificador com tap central a tensão no diodo será o dobro da tensão na carga, enquanto no retificador que está na topologia de ponte, a tensão no diodo será a mesma que da carga, fazendo assim os diodos não ficarem sobrecarregados.

O retificador trifásico em ponte, assim como o de 12 pulsos, também propicia melhor aproveitamento do transformador, e alto rendimento. Em contra partida, o transformador de meia onda apresentou os piores resultados, sendo o que tem a menor eficiência (40,50%) e o maior FF (1,571). Além disso, o retificador de meia onda insere muitas harmônicas na rede, o que é prejudicial à qualidade da energia, pois as harmônicas podem aumentar as ocorrências de ressonância, sobreaquecimento dos cabos e cargas e perda do rendimento das máquinas elétricas [3].

Entretanto, a utilização do transformador de 12 pulsos convencional, pode não ser a melhor opção, pois costuma ser pesado e volumoso, sendo assim poderia ser utilizado versões mais modernas, como o retificador de 12 pulsos, com autotransformador e conversores boost [1], pois apresenta um rendimento global maior, peso e volume menor e insere harmônicas de menor amplitude.

## V. CONCLUSÕES

Percebe-se, portanto, que os objetivos deste trabalho foram alcançados: Determinar os valores médios e eficazes de tensão e corrente, e determinar também os parâmetros de desempenho para cada retificador.

Foi verificado através da Figura 7, quais retificadores possuem os melhores parâmetros de desempenho e quais possuem

os piores, dessa forma podendo definir qual retificador seria mais útil em determinada situação, com base em seus fatores de desempenho.

Entretanto, apesar deste trabalho indicar que o retificador de 12 pulsos e o retificador trifásico serem os melhores, estes fatores não devem ser os únicos a serem analisados como tomada de decisão, fatores como: custo, tamanho, peso, volume, harmônicas, carga a ser alimentada e corrente média e eficaz dos diodos também são fatores de grande importância na determinação de um estágio retificador que poderão ser abordados em estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

- [1] Daniel TS Borges and Luiz CG Freitas. Retificador trifásico de 12 pulsos com autotransformador e conversores boost cascadeados. *Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP). Uberlândia, MG, Brasil*, pages 38400–902.
- [2] Ivan Eidt Colling et al. Conversores ca-cc monofásicos e trifásicos reversíveis com elevado fator de potência. pages 2–3, 2000.
- [3] A De Almeida, L Moreira, and J Delgado. Power quality problems and new solutions. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, volume 3, 2003.
- [4] Luís Eduardo Pompeu de Sousa Brasil Háteras. Retificadores multi-pulsos. page 17, 2019.
- [5] Mark J. Kocher and Robert L. Steigerwald. An ac-to-dc converter with high quality input waveforms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-19(4):63–75, 1983.
- [6] Priscila da Silva Oliveira. Classificação, metodologia de projeto e aplicação de retificadores multipulsos com conexão diferencial de transformador. 2011.
- [7] Muhamed H RASHID. Eletrônica de potência: dispositivo, circuitos e aplicações. 4ª edição, ed.