

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODOLFO DE OSTE

**Estudo e implementação de um retificador monofásico chaveado  
microcontrolado**

São Carlos

2010



RODOLFO DE OSTE

**Estudo e implementação de um retificador monofásico chaveado  
microcontrolado**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao departamento de Engenharia Elétrica da  
Universidade de São Paulo.

Área de concentração: Eletrônica de potência

Orientador: Prof. Dr. Azauri Albano de  
Oliveira Júnior

São Carlos

2010



AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE  
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,  
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Oste, Rodolfo de

085e

Estudo e implementação de um retificador monofásico  
chaveado microcontrolado / Rodolfo de Oste ; orientador  
Azauri Albano de Oliveira Júnior. -- São Carlos, 2010.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica e Área  
de Concentração em Eletrônica de Potência) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2010.



## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Reginaldo e Neiva, por toda confiança depositada em mim e pela minha formação pessoal.

Ao Prof. Azauri, por sua dedicação na orientação deste trabalho, e pela sua confiança depositada, bem como sua ajuda com conselhos, no decorrer do mesmo.

Aos professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica da EESC pelo trabalho desenvolvido ao longo do período de graduação, o que certamente possibilitou a conclusão do mesmo.

Aos meus amigos da EESC, por todo apoio estrutural e conselhos que me apoiaram ao longo deste trabalho.





## Sumário

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. RETIFICADORES MONOFÁSICOS TOTALMENTE CONTROLADOS E HÍBRIDOS CONVENCIONAIS</b> .....	<b>5</b>
2.1. RETIFICADOR MONOFÁSICO TOTALMENTE CONTROLADO .....	5
2.1.1. ANÁLISE MATEMÁTICA .....	6
2.1.1.1. TENSÃO DE CARGA CC .....	7
2.1.1.2. CORRENTE DE LINHA CA.....	8
2.2. RETIFICADOR MONOFÁSICO HÍBRIDO .....	11
2.2.1. ANÁLISE MATEMÁTICA .....	12
2.2.1.1. TENSÃO DE CARGA CC .....	13
2.2.1.1. CORRENTE DE LINHA CA.....	14
<b>3. RETIFICADORES MONOFÁSICO PWM</b> .....	<b>17</b>
3.1. RETIFICADOR PWM REGULAR .....	18
3.2. RETIFICADOR PWM SENOIDAL .....	19
3.3. ANÁLISE MATEMÁTICA .....	20
3.3.1.1. TENSÃO DE CARGA CC .....	21
3.3.1.2. CORRENTE DE LINHA CA.....	21
<b>4. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO RETIFICADOR CHAVEADO</b> .....	<b>25</b>
4.1. CIRCUITO DE CONTROLE .....	26
4.2. CIRCUITO DE POTÊNCIA .....	26
4.3. SOFTWARE .....	28
<b>5. RESULTADOS DE LABORATÓRIO</b> .....	<b>33</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>43</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>45</b>
APÊNDICE A – RESULTADOS TEÓRICOS PARA A TENSÃO DE CARGA CC.....	47
APÊNDICE B – CÓDIGOS FONTE DAS FUNÇÕES IMPLEMENTADAS .....	51
FUNÇÃO GRAFTHD.....	51
FUNÇÃO SPWM .....	56
FUNÇÃO GRAFSPWM .....	58
FUNÇÃO FIALPHAL .....	60



## Lista de figuras

FIGURA 1 - CIRCUITO, QUADRANTES E FORMAS DE ONDA PARA O RETIFICADOR TOTALMENTE CONTROLADO (RASHID, 1999). .....	6
FIGURA 2 - DETERMINAÇÃO DE $\phi'$ PARA O RETIFICADOR MONOFÁSICO TOTALMENTE CONTROLADO. ....	10
FIGURA 3 - COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTE, THD E FP PARA O RETIFICADOR TOTALMENTE CONTROLADO. ....	11
FIGURA 4 - CIRCUITO, QUADRANTE E FORMAS DE ONDA PARA O RETIFICADOR HÍBRIDO (RASHID, 1999). ....	12
FIGURA 5 – DETERMINAÇÃO DE $\phi'$ PARA O RETIFICADOR HÍBRIDO. ....	15
FIGURA 6 - COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTE, THD E FP PARA O RETIFICADOR HÍBRIDO. ....	16
FIGURA 7 - CIRCUITO DO RETIFICADOR PWM. ....	17
FIGURA 8 - FORMAS DE ONDA PARA UM RETIFICADOR PWM REGULAR (RASHID, 1999). ....	18
FIGURA 9 – MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO SENOIDAL (RASHID, 1999). ....	20
FIGURA 10 - COMPONENTES HARMÔNICOS DE CORRENTE, THD E FP PARA O RETIFICADOR PWM REGULAR. ....	23
FIGURA 11 - COMPONENTES HARMÔNICOS DE CORRENTE, THD E FP PARA O RETIFICADOR PWM SENOIDAL. ....	23
FIGURA 12 - ESQUEMÁTICO DO PROTÓTIPO. ....	25
FIGURA 13 - PROTÓTIPO PARA EXPERIMENTOS PRÁTICOS. ....	25
FIGURA 14 - DETALHE DO SINCRONISMO COM O ZERO DA REDE. ....	27
FIGURA 15 - BOBINA MONTADA NO LABORATÓRIO. ....	27
FIGURA 16 - TELA INICIAL DO SOFTWARE. ....	28
FIGURA 17 - TELA DO SOFTWARE, RETIFICADOR TOTALMENTE CONTROLADO. ....	29
FIGURA 18 - TELA DO SOFTWARE, RETIFICADOR PWM SENOIDAL, ÍNDICE DE MODULAÇÃO. ....	29
FIGURA 19 - TELA DO SOFTWARE, RETIFICADOR PWM SENOIDAL, NÚMERO DE PULSOS. ....	30
FIGURA 20 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA IMPLEMENTADO. ....	31
FIGURA 21 - DETALHE DOS PULSOS APLICADOS AO GATE DO MOSFET PARA O RETIFICADOR PWM SENOIDAL. ....	32
FIGURA 22 - APARATO MONTADO PARA TESTE EXPERIMENTAL. ....	33
FIGURA 23 - FORMA DE ONDA DA TENSÃO NA CARGA PARA O RETIFICADOR TOTALMENTE CONTROLADO COM $A=0^\circ$ . ....	34
FIGURA 24 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE NA CARGA PARA O RETIFICADOR TOTALMENTE CONTROLADO COM $A=0^\circ$ . ....	35
FIGURA 25 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE LINHA CA PARA O RETIFICADOR TOTALMENTE CONTROLADO COM $A=0^\circ$ . ....	35
FIGURA 26 - FORMA DE ONDA DA TENSÃO NA CARGA PARA O RETIFICADOR HÍBRIDO COM $A=30^\circ$ . ....	36
FIGURA 27 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE NA CARGA PARA O RETIFICADOR HÍBRIDO COM $A=30^\circ$ . ....	37
FIGURA 28 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE LINHA CA PARA O RETIFICADOR HÍBRIDO COM $A=30^\circ$ . ....	37
FIGURA 29 - FORMA DE ONDA DA TENSÃO NA CARGA PARA O RETIFICADOR PWM REGULAR DE 10 PULSOS E LARGURA DE PULSO DE $10^\circ$ . ....	38
FIGURA 30 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE NA CARGA PARA O RETIFICADOR PWM REGULAR DE 10 PULSOS E LARGURA DE PULSO DE $10^\circ$ . ....	39
FIGURA 31 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE LINHA CA PARA O RETIFICADOR PWM REGULAR DE 10 PULSOS E LARGURA DE PULSO DE $10^\circ$ . ....	39
FIGURA 32 - FORMA DE ONDA DA TENSÃO NA CARGA PARA O RETIFICADOR PWM SENOIDAL DE 10 PULSOS E $M=1$ . ....	40
FIGURA 33 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE NA CARGA PARA RETIFICADOR PWM SENOIDAL DE 10 PULSOS E $M=1$ . ....	41
FIGURA 34 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE LINHA CA PARA O RETIFICADOR PWM SENOIDAL DE 10 PULSOS E $M=1$ . ....	41
FIGURA 35 - TENSÃO MÉDIA NA CARGA. ....	47
FIGURA 36 - HARMÔNICOS DE TENSÃO NA CARGA. ....	48
FIGURA 37 - HARMÔNICOS DE CORRENTE NA CARGA. ....	49
FIGURA 38 - RIPPLE DE CORRENTE. ....	50



## Lista de tabelas

TABELA 1 - RESULTADOS PRÁTICOS PARA O RETIFICADOR TOTALMENTE CONTROLADO .....	34
TABELA 2 - RESULTADOS PRÁTICOS PARA O RETIFICADOR HÍBRIDO .....	36
TABELA 3 - RESULTADOS PRÁTICOS PARA O RETIFICADOR PWM REGULAR .....	38
TABELA 4 - RESULTADOS PRÁTICOS PARA O RETIFICADOR PWM SENOIDAL .....	40



## Lista de siglas e símbolos

$I$	Corrente média
$i$	Corrente instantânea
$V$	Tensão média
$v$	Tensão instantânea
$V_m$	Tensão máxima (pico)
$\omega$	Frequência angular em radianos/segundos
$t$	tempo dado em segundos
$fp$	Fator de potência
$P$	Potência ativa
$S$	Potência aparente
$\phi'$	Ângulo de defasagem entre $V_1$ e $I_1$
$THD$	Distorção harmônica total ( <i>Total Harmonic Distortion</i> )
$CC$	Corrente contínua
$CA$	Corrente alternada
$SCR$	Tiristor ( <i>Silicon-Controlled-Rectifier</i> )
$\alpha$	Ângulo inicial de condução
$\beta$	Ângulo de extinção
$L$	Indutância
$R$	Resistência
$n$	Índice numérico
$a_n, b_n, c_n$	Coefficientes da série trigonométrica de Fourier





## Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de um retificador monofásico em ponte PWM de alto fator de potência. São necessários estudos sobre retificadores monofásicos totalmente controlados, híbridos, PWM regular e senoidal. Cada retificador atende a determinadas necessidades de projetos. São desenvolvidos programas computacionais utilizando o *software* Matlab para a determinação de harmônicos de corrente, distorção harmônica total e fator de potência a partir de equações teóricas de cada tipo de retificador. A maior dificuldade encontrada é o desenvolvimento de um método para o cálculo dos ângulos de disparo dos MOSFETs para o retificador PWM senoidal e a construção de um programa rápido e enxuto para o microcontrolador.

Palavras-chave: retificadores PWM, conversores estáticos de potência, qualidade de energia, SPWM.



## **Abstract**

The goal of this project is studying and developing of a high power factor single-phase PWM bridge rectifier. It takes studies on single-phase, hybrid, regular and sinusoidal PWM rectifier. Each one attends to specific needs of the project. Computational algorithms are developed using Matlab software, for the determination of current harmonics, total harmonic distortion and power factor from theoretical equations of each type of rectifier. The greatest encountered difficulty is the development of a method for calculating the shooting angles of the MOSFETs to the SPWM rectifier and building a lean and fast program for the microcontroller.

**Keywords:** PWM rectifiers, static power converters, power quality, SPWM.



## 1. Introdução

“A eletrônica de potência revolucionou o conceito de controle de potência para a conversão de energia e para o controle dos acionamentos das máquinas elétricas.” (Rashid, 1999)

Retificadores são utilizados amplamente na indústria, em eletrodomésticos, trens elétricos, e diversos dispositivos eletrônicos. O estudo sobre retificadores é motivado pela sua alta demanda industrial.

Os retificadores controlados (totalmente controlado, híbrido, chaveado) podem controlar a potência fornecida a uma carga em corrente contínua. Em um trabalho anterior (Del Bianco, Otani, & Quini, 2005) foi discutida a utilização de retificadores chaveados PWM para melhorar o *ripple* de corrente de carga CC e para diminuir o tamanho do filtro de corrente. Estes retificadores afetam também a corrente de linha CA, ocorre o aparecimento de componentes harmônicos de corrente, estes deformam as formas de onda da corrente de linha CA e acarretam problemas relacionados à qualidade de energia.

Atualmente os dispositivos elétricos e eletrônicos devem operar com eficiência e não podem introduzir componentes harmônicos de corrente à rede CA. Existem órgãos de certificação energética especializados na classificação de dispositivos eletrônicos quanto à eficiência e desempenho energético.

É possível calcular a distorção harmônica total (THD) de uma forma de onda de corrente com valor médio nulo através da equação 1, expressa por:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (\text{equação 1})$$

Onde  $I_n$  é a corrente do harmônico de ordem  $n$ .

Da definição do fator de potência, temos que:

$$fp = \frac{P}{S} \quad (\text{equação 2a})$$

Onde  $P$  é a potência ativa e  $S$  é a potência aparente, então

$$fp = \frac{VI_1 \cos \phi'}{V \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (\text{equação 2b})$$

$$fp = \frac{I_1 \cos \phi'}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}} \quad (\text{equação 2c})$$

Dividindo a equação 2c por  $I_1$ , pode-se escrever:

$$fp = \frac{\cos \phi'}{\sqrt{1 + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}}} \quad (\text{equação 2d})$$

Substituindo a equação 1 na equação 2d, tem-se:

$$fp = \frac{\cos \phi'}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde  $\phi'$  é o ângulo de defasagem entre a tensão e o primeiro harmônico de corrente na fonte, este ângulo varia para cada tipo de retificador. Sua determinação pode ser feita de forma gráfica como mostrada no capítulo 2.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um retificador chaveado, capaz de trabalhar como retificador totalmente controlado, híbrido comum e híbrido com acionamento PWM regular e senoidal. Para todos os casos, existe uma hipótese de que a corrente na carga seja contínua e constante.

O ponto forte é a flexibilidade apresentada por este hardware pois, basta o usuário entrar com os dados (tipo de retificador, ângulo de disparo, número de pulsos, etc) que o mesmo entra em operação.

As telas geradas pelo microcontrolador através da porta serial são auto-explicativas.

Os capítulos 2 e 3 apresentam o estudo teórico dos retificadores monofásicos totalmente controlado, híbrido e PWM.

O capítulo 4 mostra a construção do protótipo utilizado nas experiências práticas subdividindo o mesmo em duas partes, baixa e alta potência.

O capítulo 5 mostra os resultados práticos obtidos e a comparação entre estes resultados e os gráficos teóricos.

O capítulo 6 mostra as conclusões a respeito deste trabalho e propostas para estudos futuros.

Por fim o capítulo 7 mostra a bibliografia utilizada de apoio a este trabalho.

Foi utilizado o *software* “Matlab” versão R2008b para gerar os gráficos. O compilador C utilizado foi o “mikroC PRO for PIC”.





## **2. Retificadores monofásicos totalmente controlados e híbridos convencionais**

Esse capítulo descreve o funcionamento de retificadores monofásicos em ponte totalmente controlado e híbrido conectados a uma carga RL.

Os estudos foram feitos considerando corrente contínua e constante na carga e semicondutores ideais (sem queda de tensão em seus terminais, resistência nula quando em condução, comutação instantânea e apresenta resistência infinita quando não está conduzindo).

### **2.1. Retificador monofásico totalmente controlado**

Este item descreve o funcionamento do retificador monofásico totalmente controlado. O protótipo desenvolvido permite operar neste modo e, para uma melhor compreensão, este retificador pode ser representado utilizando SCRs (Figura 1(a)).

T1 e T2 podem conduzir de 0 até  $\pi+\pi/2$ , enquanto que T3 e T4 podem conduzir de  $\pi+\pi/2$  até  $2\pi+\pi/2$ .

Podemos ver na Figura 1(c) que a corrente na carga ( $i_o$ ) se mantém constante, pois foi uma hipótese considerada para este trabalho.

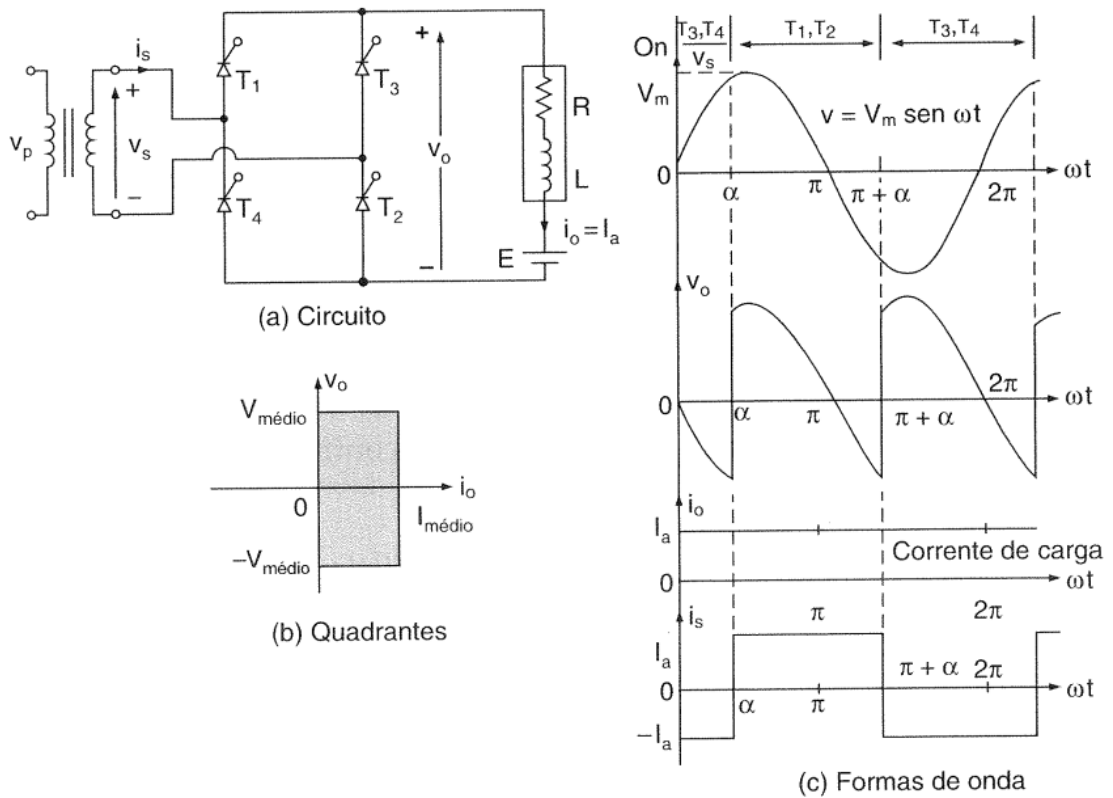


Figura 1 - Circuito, quadrantes e formas de onda para o retificador totalmente controlado (Rashid, 1999).

### 2.1.1. Análise matemática

Para escrever as equações específicas de cada conversor estudado e a fim de se obter expressões genéricas para programas computacionais foi utilizado normalização em pu, sabendo que o valor do filtro indutivo é desconhecido e será determinado posteriormente utilizando a função *fialphal* (Apêndice A) utilizada no trabalho anterior (Del Bianco, Otani, & Quini, 2005), pode-se considerar  $Z = R$  e  $E=0$  pois este trabalho não considera cargas ativas.

$$V_{base} = \sqrt{2}V_m \quad (\text{equação 3})$$

$$Z_{base} = R \quad (\text{equação 4})$$

$$I_{base} = \frac{V_{base}}{Z_{base}} = \frac{\sqrt{2}V}{R} \quad (\text{equação 5})$$

O valor da tensão instantânea na carga é:

$$v_{out} = \sqrt{2}Vsen(\omega t) \quad (\text{equação 6})$$

Para  $\alpha \leq \omega t \leq \pi + \alpha$

Logo, aplicando a primeira lei de Kirchoff no circuito da Figura 1(a), tem-se:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2}Vsen(\omega t) \quad (\text{equação 7})$$

E a tensão média de carga CC pode ser escrita como:

$$V_{DC} = V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}Vsen(\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 8a})$$

Resolvendo, tem-se:

$$V_{0pu} = \frac{2}{\pi} \cos\alpha \quad (\text{equação 8})$$

A tensão média e a corrente média de entrada serão positivas durante o intervalo de 0 até  $\pi$ , então o fluxo de potência flui da fonte para a carga, pode-se dizer que o conversor opera no modo de retificação. De  $\pi$  até  $\pi+\pi/2$ , a corrente média de entrada é positiva e a tensão média é negativa, logo o fluxo de potência flui da carga para a fonte, pode-se dizer que o conversor opera no modo de inversão. O conversor opera em dois quadrantes como na Figura 1(b).

### 2.1.1.1. Tensão de carga CC

Os estudos no lado da carga já foram realizados em (Del Bianco, Otani, & Quini, 2005), logo podemos ressaltar apenas os termos (referentes à tensão na carga CC) resultantes

da análise de Fourier. Os principais resultados (gráficos) obtidos neste estudo estão no Apêndice A.

$$V_{0pu} = \frac{2}{\pi} \cos\alpha \quad (\text{equação 8})$$

$$a_n = -\frac{(1+n)\cos(1-n) + (1-n)\cos(1+n)}{1-n^2} \quad (\text{equação 9})$$

$$b_n = \frac{(1+n)\text{sen}(1-n) - (1-n)\text{sen}(1+n)}{1-n^2} \quad (\text{equação 10})$$

### 2.1.1.2. Corrente de linha CA

Através da análise de Fourier, podem se obter os termos referentes à corrente de linha CA:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \cos(n\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 11a})$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{n} \text{sen}(n\omega t) \right]_{\alpha}^{\pi+\alpha} \quad (\text{equação 11b})$$

Então, tem-se:

$$a_n = \frac{4}{n\pi} (-\text{sen}(n\alpha)) \quad (\text{equação 11})$$

Para o termo  $b_n$  é possível escrever:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \text{sen}(n\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 12a})$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{n} (-\cos(n\omega t)) \right]_{\alpha}^{\pi+\alpha} \quad (\text{equação 12b})$$

Então, tem-se:

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \cos(n\alpha) \quad (\text{equação 12})$$

Com estes dois coeficientes  $c_n$  pode ser calculado.

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (\text{equação 13a})$$

Substituindo as equações 11 e 12 no resultado anterior, tem-se:

$$c_n = \frac{4}{n\pi} \quad (\text{equação 13})$$

$C_n$  aqui calculado é a corrente de linha CA.

Pode-se notar que  $c_n$  independe do ângulo de disparo, isso implica que é constante ao longo de  $\alpha$ .

Para se gerarem os gráficos dos componentes harmônicos de corrente, *THD* e *fp*, devem ser empregadas as equações 1, 2 e 13. Como dito anteriormente no capítulo 1, é preciso calcular o ângulo de defasagem entre a corrente fundamental e a tensão na fonte ( $\phi'$ ).

Analisando as formas de onda da tensão (senoidal) e da corrente (quadrada), é possível determinar este ângulo de forma gráfica como mostrado na Figura 2.

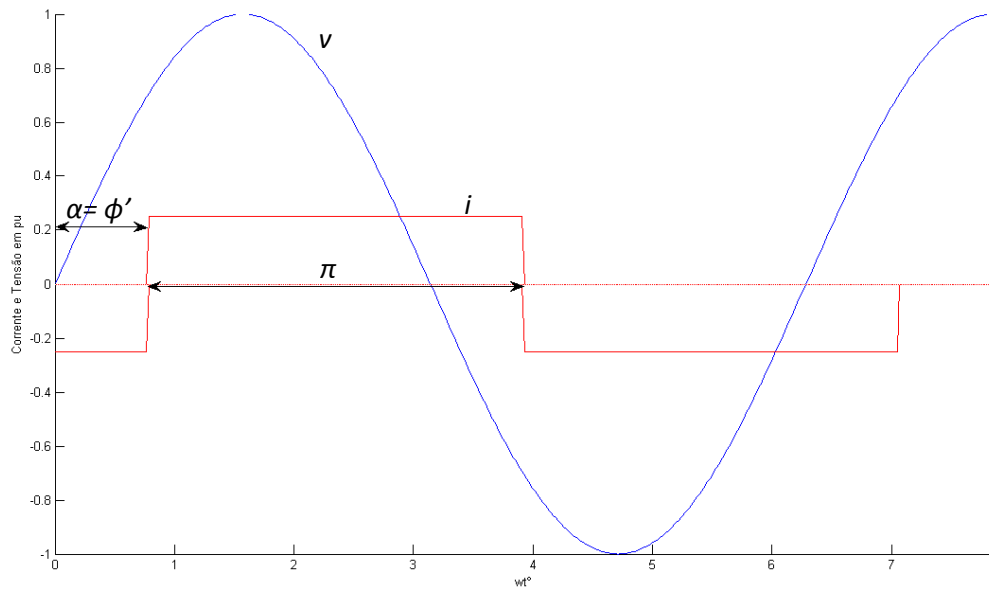


Figura 2 - Determinação de  $\phi'$  para o retificador monofásico totalmente controlado.

A onda senoidal de tensão se inicia em  $0^\circ$  enquanto que a onda quadrada de corrente se inicia em  $\phi'$ , logo o ponto médio da onda quadrada é igual a  $\phi' + \frac{\pi}{2}$  e olhando pela onda senoidal, este mesmo ponto é igual a  $\alpha + \frac{\pi}{2}$ , igualando estas duas expressões podemos encontrar o valor de  $\phi'$  em função de  $\alpha$ :

$$\phi' = \alpha \quad (\text{equação 14})$$

O ângulo  $\phi'$  aqui calculado não tem relação com o ângulo de carga, ele trata apenas da defasagem entre a tensão e a corrente fundamental criada com o processo de retificação.

Após determinado o ângulo de defasagem, foi feita uma sub-rotina (*grafthd*) para plotar este gráfico, a seguir podemos ver o resultado obtido.

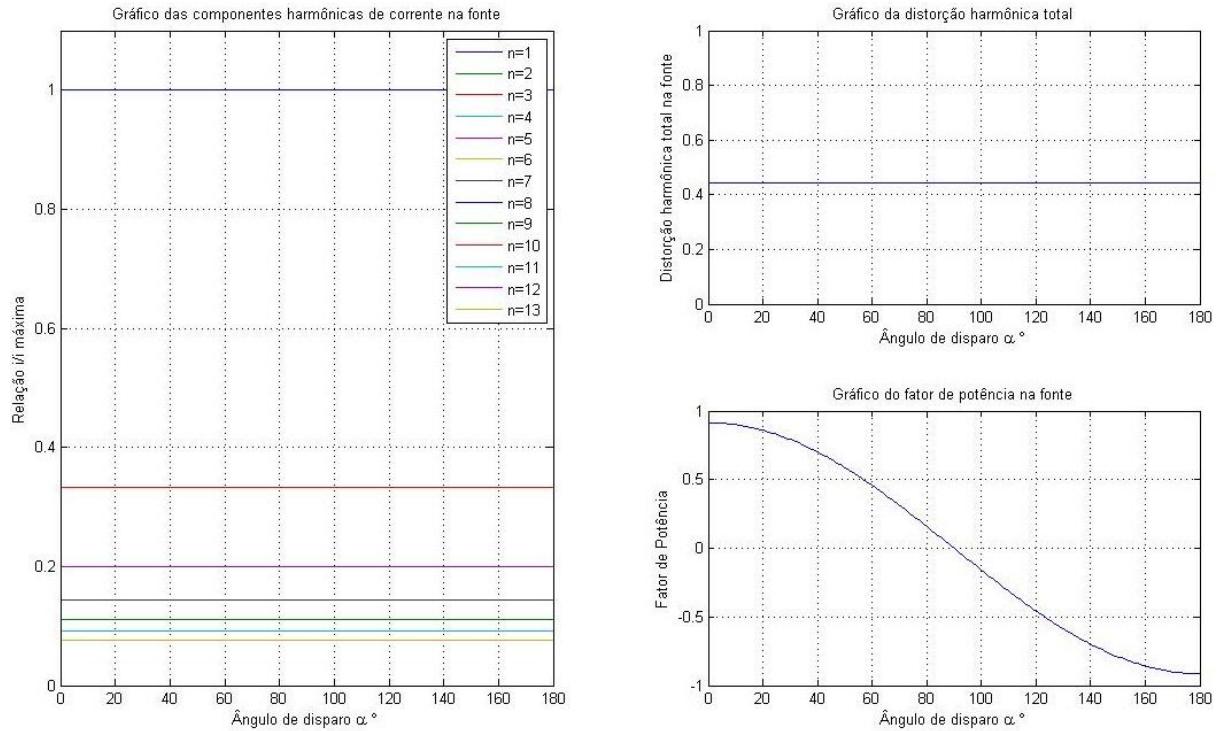


Figura 3 - Componentes harmônicas de corrente, THD e fp para o retificador totalmente controlado.

Como dito anteriormente, as componentes harmônicas de corrente são constantes pois o termo  $c_n$  independe de  $\alpha$ , apesar do gráfico mostrar  $\alpha$  variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , sabemos que este trabalho considera que  $\alpha$  varie de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  para o conversor trabalhar sempre no modo de retificação.

Analisando estes gráficos, podemos observar que o retificador totalmente controlado, Figura 3, possui fator de potência muito baixo para valores maiores de  $\alpha$ .

## 2.2. Retificador monofásico híbrido

Este item descreve o funcionamento do retificador monofásico híbrido. O protótipo desenvolvido permite operar neste modo. Este retificador pode ser representado utilizando SCRs e diodos (Figura 4(a)).

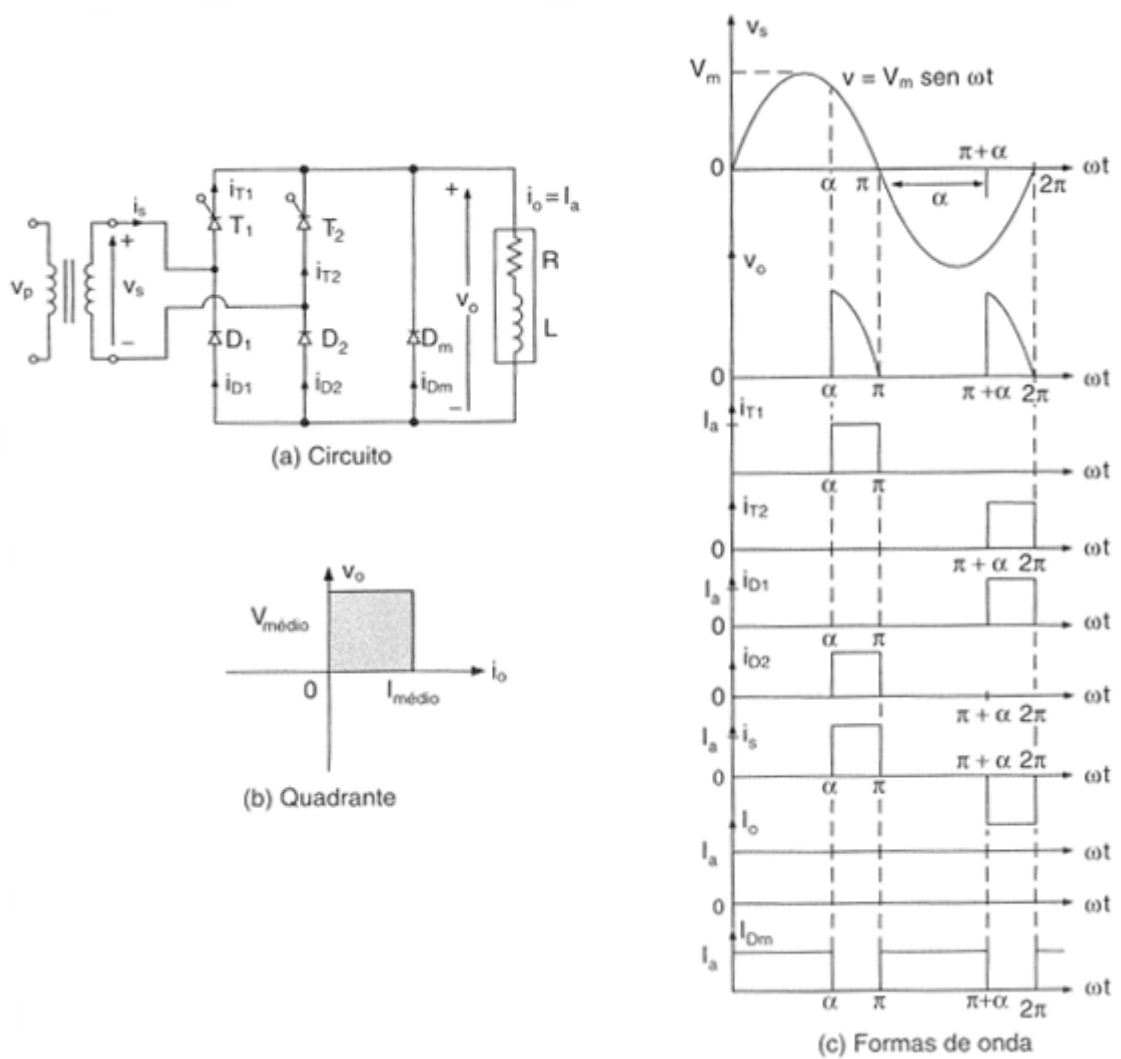


Figura 4 - Circuito, quadrante e formas de onda para o retificador híbrido (Rashid, 1999).

T1 e D2 podem conduzir de  $\alpha$  até  $\pi$ , enquanto que T2 e D1 podem conduzir de  $\pi + \alpha$  até  $2\pi$ .

È possível observar na Figura 4(c) que a corrente na carga ( $i_o$ ) se mantém constante e contínua, pois é uma hipótese já mencionada.

### 2.2.1. Análise matemática

Podemos repetir a equação 6 para mostrar o valor da tensão instantânea na carga:



$$v_{out} = \sqrt{2}Vsen(\omega t) \quad (\text{equação 6})$$

para  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$

Novamente, aplicando-se a primeira Lei de Kirchoff, tem-se:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2}sen(\omega t) \quad (\text{equação 7})$$

E a tensão média será:

$$V_{DC} = V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}Vsen(\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 15})$$

A tensão média e a corrente média de entrada serão positivas durante o intervalo de 0 até  $\pi$ , então o fluxo de potência flui da fonte para a carga, pode-se dizer que o conversor opera no modo de retificação. De  $\pi$  até  $\pi+\alpha$ , a corrente instantânea na carga é zero. O conversor opera em um quadrante como na Figura 4(b). Não é possível operar no modo de inversão com este retificador.

### 2.2.1.1. Tensão de carga CC

Novamente os estudos referentes à carga já foram vistos em (Del Bianco, Otani, & Quini, 2005), abaixo encontram-se os termos da análise de Fourier.

$$V_0 = \frac{1}{\pi} (1 + \cos\alpha) \quad (\text{equação 16})$$

$$a_n = \frac{\alpha - \pi}{\pi} \left[ \frac{(1+n)\cos(1-n) + (1-n)\cos(1+n)}{1-n^2} \right] \quad (\text{equação 17})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{(1+n)sen(1-n)(\pi - \alpha) + (1-n)sen(1+n)(\alpha - \pi)}{1-n^2} \right] \quad (\text{equação 18})$$

### 2.2.1.1. Corrente de linha CA

A partir da análise de Fourier, é possível calcular os termos para o retificador híbrido.

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \cos(n\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 19a})$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{n} \text{sen}(n\omega t) \right]_{\alpha}^{\pi} \quad (\text{equação 19b})$$

$$a_n = \frac{2}{n\pi} (\text{sen}(n\pi) - \text{sen}(n\alpha)) \quad (\text{equação 19c})$$

Sabe-se que  $\text{sen}(n\pi) = 0$ , então temos:

$$a_n = \frac{2}{n\pi} (-\text{sen}(n\alpha)) \quad (\text{equação 19})$$

E, para o termo  $b_n$ , pode-se escrever:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \text{sen}(n\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 20a})$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{n} (-\cos(n\omega t)) \right]_{\alpha}^{\pi} \quad (\text{equação 20b})$$

Logo, tem-se:

$$b_n = \frac{2}{n\pi} (\cos(n\alpha) - \cos(n\pi)) \quad (\text{equação 20})$$

O termo  $c_n$  pode ser calculado como na equação 13a.

Para se plotarem os gráficos dos componentes harmônicos de corrente,  $THD$  e  $fp$ , devemos utilizar as equações 1, 2 e 13a. Como dito anteriormente no capítulo 1, é preciso calcular o ângulo de defasagem entre a corrente fundamental e a tensão na fonte ( $\phi$ ).

Analisando as formas de onda da tensão (senoidal) e da corrente (quadrada), podemos determinar este ângulo de forma gráfica como mostrado a seguir:

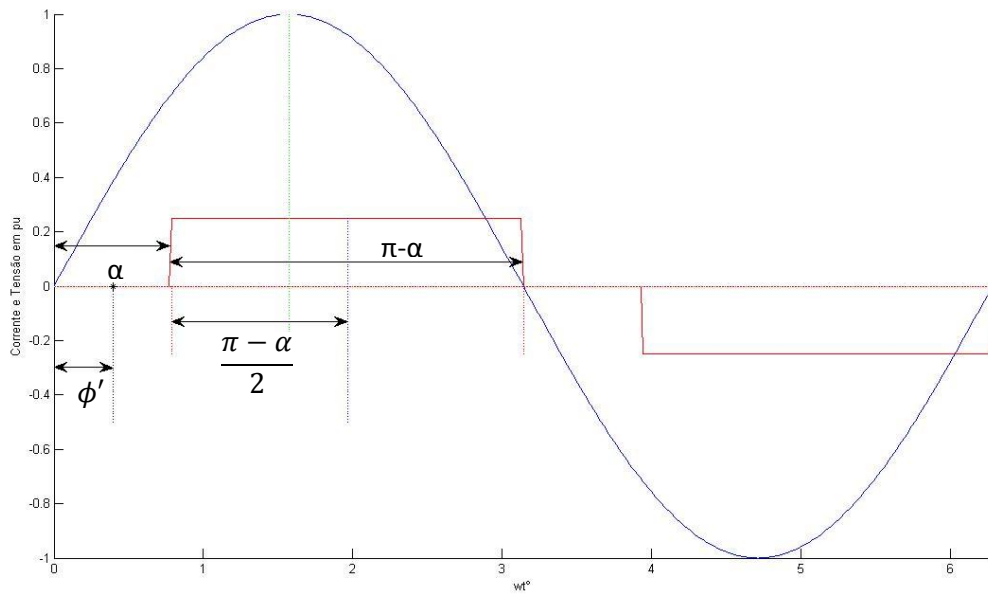


Figura 5 – Determinação de  $\phi'$  para o retificador híbrido.

A onda senoidal de tensão se inicia em  $0^\circ$  enquanto que a onda quadrada de corrente se inicia em  $\phi'$ , logo o ponto médio da onda quadrada é igual a  $\phi' + \frac{\pi}{2}$  e olhando pela onda senoidal, este mesmo ponto é igual a  $\alpha + \frac{\pi-\alpha}{2}$ , igualando estas duas expressões pode-se encontrar o valor de  $\phi'$  em função de  $\alpha$ :

$$\phi' + \frac{\pi}{2} = \alpha + \frac{\pi-\alpha}{2} \quad (\text{equação 21a})$$

$$2\phi' + \pi = 2\alpha + \pi - \alpha \quad (\text{equação 21b})$$

$$\phi' = \frac{\alpha}{2} \quad (\text{equação 21})$$

O ângulo  $\phi'$  aqui calculado não tem relação com o ângulo de carga, ele trata apenas da defasagem entre a tensão e a corrente fundamental criada com o processo de retificação.

Após determinado o ângulo de defasagem, foi utilizado a mesma sub-rotina (*grafthd*) para plotar este gráfico, a seguir pode-se ver o resultado obtido.

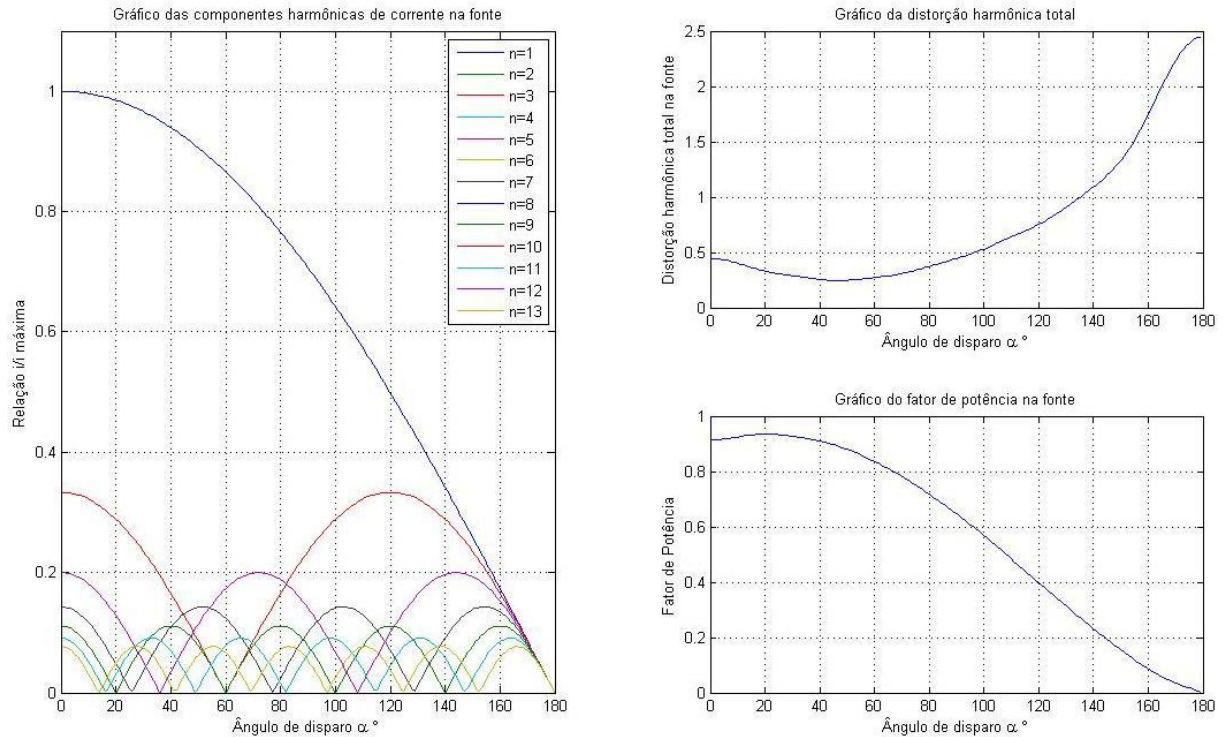


Figura 6 - Componentes harmônicas de corrente,  $THD$  e  $fp$  para o retificador híbrido.

Pode-se notar que as componentes harmônicas de corrente não se comportam de forma linear como no retificador anterior, porém, seu fator de potência é maior para  $\alpha$  entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (faixa de  $\alpha$  para o retificador totalmente controlado).

Através do gráfico do retificador híbrido, Figura 6, podemos perceber que o fator de potência é melhor que o totalmente controlado, podemos comparar que para  $\alpha=80^\circ$ , o retificador híbrido apresenta  $fp$  próximo a 0,7 e o totalmente controlado apresenta  $fp$  próximo a 0,2.

### 3. Retificadores monofásico PWM

Este capítulo trata dos retificadores PWM regular e senoidal. O protótipo desenvolvido também pode operar neste modo. Neste trabalho iremos operar este retificador PWM como um híbrido, ou seja, deixaremos dois MOSFETs sempre prontos para conduzirem, fazendo papel de diodos. A figura abaixo mostra a topologia utilizada, os MOSFETs T2 e T4 farão papel de diodo.

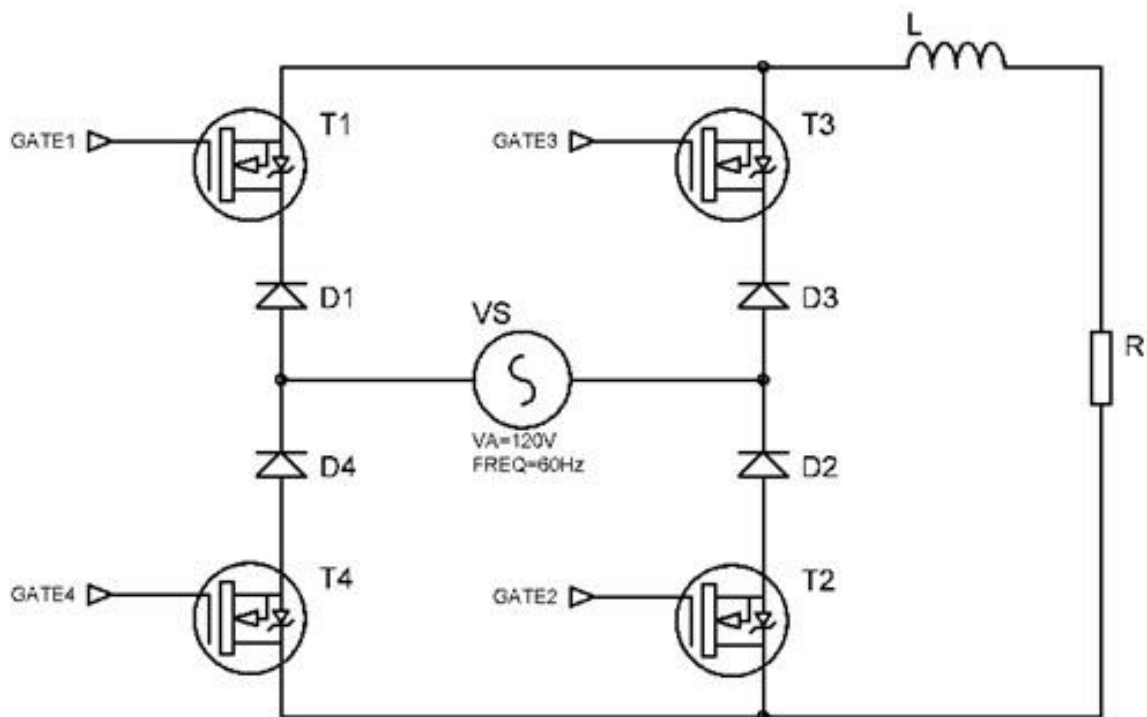


Figura 7 - Circuito do retificador PWM.

O retificador PWM aqui proposto é controlado de duas maneiras, a primeira forma de controle trata-se da modulação PWM regular e a segunda trata-se da modulação PWM senoidal.

### 3.1. Retificador PWM regular

A modulação PWM regular pode ser obtida através de uma onda portadora triangular e um sinal de referência constante (sinal CC). Essa modulação dispara os MOSFETs T1 e T3, enquanto que T2 e T4 operam como diodos. Este tipo de controle funciona como um chaveamento de pulsos igualmente espaçados e de mesma largura. T1 será chaveado durante o semi-ciclo positivo enquanto que T3 será chaveado durante o negativo. A Figura 8 mostra este tipo de modulação.

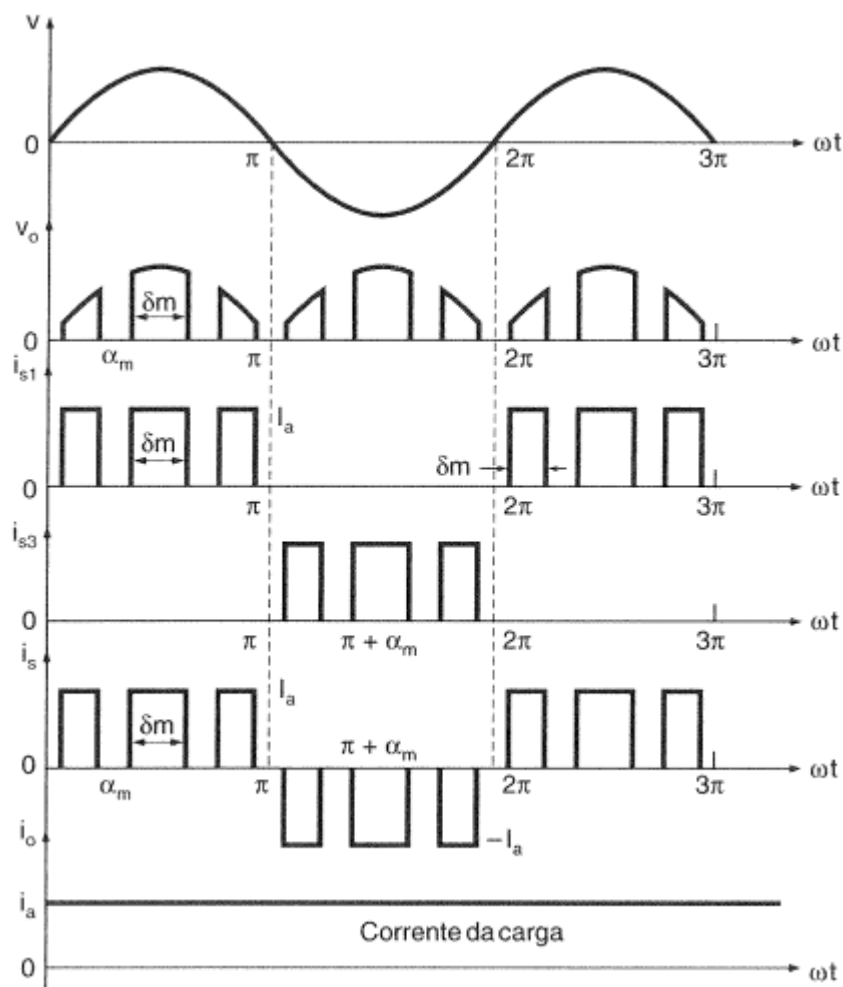


Figura 8 - Formas de onda para um retificador PWM regular (Rashid, 1999).

### 3.2. Retificador PWM senoidal

Já na modulação PWM senoidal tem-se uma onda portadora triangular e um sinal de referência senoidal da mesma frequência que a onda senoidal da fonte  $V_s$ . Essa modulação resultará em pulsos de largura e espaçamentos variáveis senoidalmente. A Figura 9 mostra melhor esse tipo de modulação.

O retificador PWM senoidal é, geralmente, especificado utilizando a frequência de modulação e não o número de pulsos. Podemos estabelecer uma relação entre frequência de modulação e número de pulsos.

$$p = \frac{f_{triangular}}{2f_{senoide}} \quad (\text{equação 22})$$

Ou seja, para o caso de o retificador PWM senoidal ter 10 pulsos por semi-ciclo, e a frequência da onda senoidal ser de 60hz (rede AC para o Brasil), tem que existir uma onda triangular de frequência igual a 1200hz.

O trabalho anterior (Del Bianco, Otani, & Quini, 2005) mostra que para frequências de chaveamento acima de 10kHz não há mais variações (melhorias) em relação à tensão de carga CC, logo pode-se dizer que este retificador com acionamento PWM senoidal se comporta como PWM regular. Logo apenas serão mostrados estudos envolvendo o PWM regular. No entanto, para a corrente de linha CA, o retificador PWM senoidal apresenta divergências se comparado ao regular.

Assim como o retificador híbrido convencional, este conversor PWM opera somente em um quadrante, corrente e tensão sempre positivo.

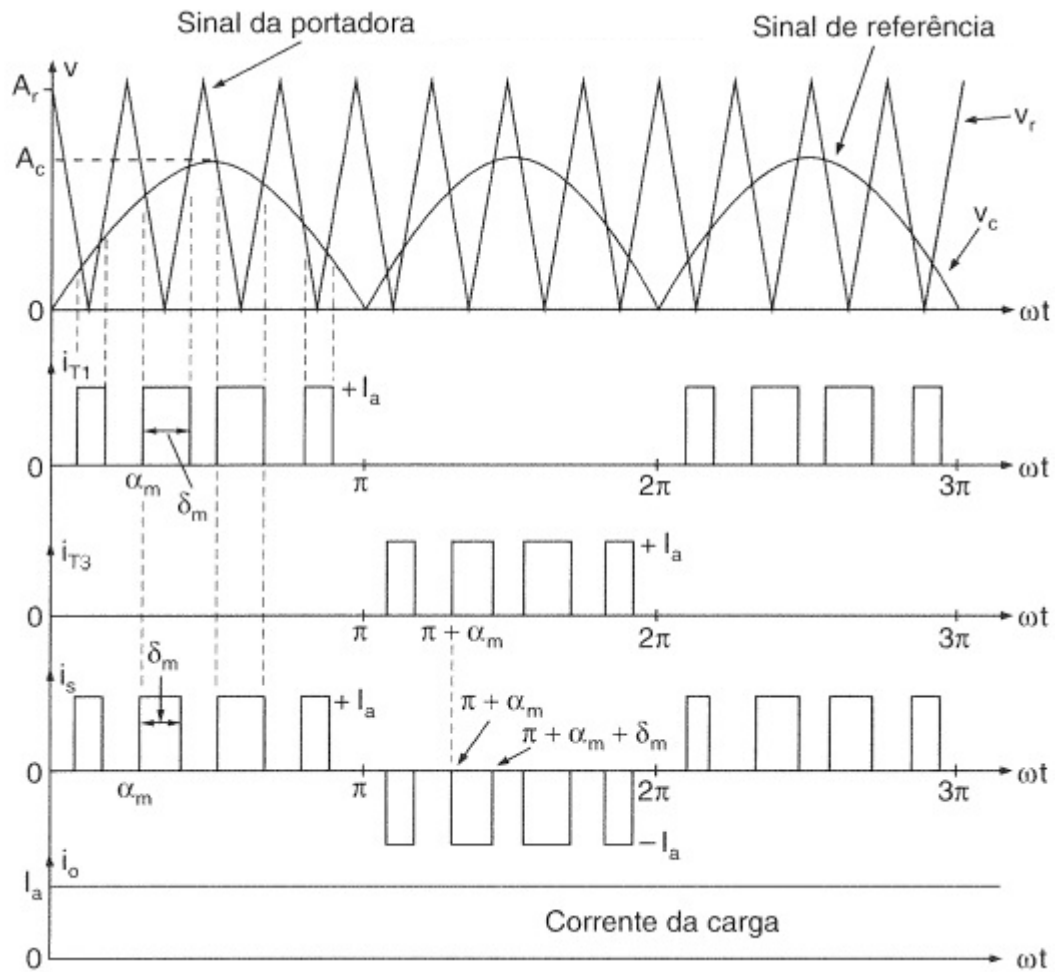


Figura 9 – Modulação por largura de pulso senoidal (Rashid, 1999).

### 3.3. Análise matemática

Novamente, repete-se a equação 6 para mostrar a tensão instantânea na carga.

$$v_{out_k} = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) \quad (\text{equação 6})$$

para  $\alpha_k \leq \omega t \leq \beta_k$

Onde  $\alpha_k$  é o ângulo de disparo do pulso no gate do MOSFET e  $\beta_k$  é o ângulo de extinção do pulso no gate do MOSFET.

Mais uma vez, aplicando-se a primeira Lei de Kirchoff, tem-se:



$$L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2} \text{sen}(\omega t) \quad (\text{equação 7})$$

A tensão média pode ser expressa como:

$$V_{DC} = V_0 = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^p \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \sqrt{2} V \text{sen}(\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 23a})$$

Resolvendo, tem-se:

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^p (\cos \alpha_k - \cos \beta_k) \quad (\text{equação 23})$$

Onde p é o número de pulsos por semi-ciclo.

### 3.3.1.1. Tensão de carga CC

O retificador PWM possui vários pulsos por semi-ciclo que deverão ser somados na aplicação das equações, este estudo já foi verificado em (Del Bianco, Otani, & Quini, 2005) e, portanto, apenas os termos da análise de Fourier foram apresentados.

$$a_n = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^p \left[ -\frac{\cos(1-n)(\omega t)}{2(1-n)} - \frac{\cos(1+n)(\omega t)}{2(1+n)} \right]_{\alpha_k}^{\beta_k} \quad (\text{equação 24})$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^p \left[ \frac{\text{sen}(1-n)(\omega t)}{2(1-n)} - \frac{\text{sen}(1+n)(\omega t)}{2(1+n)} \right]_{\alpha_k}^{\beta_k} \quad (\text{equação 25})$$

### 3.3.1.2. Corrente de linha CA

Aplicando a análise de Fourier para o retificador PWM, tem-se:

$$a_n = \sum_{k=1}^p \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \cos(n\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 26a})$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^p \left[ \frac{1}{n} \text{sen}(n\omega t) \right]_{\alpha_k}^{\beta_k} \quad (\text{equação 26b})$$

Logo, podemos escrever:

$$a_n = \frac{2}{n\pi} \sum_{k=1}^p (\text{sen}(n\beta_k) - \text{sen}(n\alpha_k)) \quad (\text{equação 26})$$

Novamente, para  $b_n$ , temos:

$$b_n = \sum_{k=1}^p \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \text{sen}(n\omega t) d\omega t \quad (\text{equação 27a})$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^p \left[ \frac{1}{n} (-\cos(n\omega t)) \right]_{\alpha_k}^{\beta_k} \quad (\text{equação 27b})$$

Resolvendo este resultado, temos:

$$b_n = \frac{2}{n\pi} \sum_{k=1}^p (\cos(n\alpha_k) - \cos(n\beta_k)) \quad (\text{equação 27})$$

O valor dos ângulos  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  podem ser determinados pela função *spwm* para o caso do retificador PWM senoidal que se encontra no Apêndice B.

Para se plotarem os gráficos dos componentes harmônicos de corrente, *THD* e *fp*, utilizou-se as equações 1, 2 e 13a. Como dito anteriormente no capítulo 1, é preciso calcular o ângulo de defasagem entre a corrente fundamental e a tensão na fonte ( $\phi'$ ).

Analisando as formas de onda da tensão (senoidal) e da corrente (quadrada), (Figura 8 e Figura 9) nota-se que os retificadores PWM não possuem ângulo de defasagem entre tensão e corrente, logo  $\phi' = 0$ .

Novamente foi utilizada a sub-rotina *grafthd* para plotar este gráficos, a seguir pode-se ver o resultado obtido.

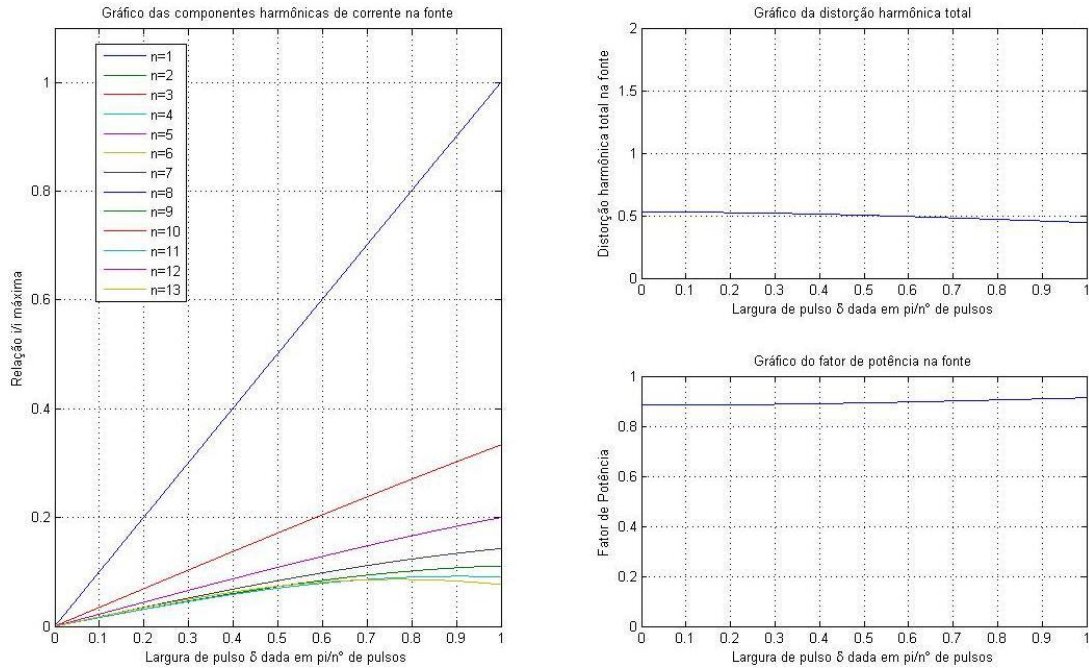


Figura 10 - Componentes harmônicos de corrente,  $THD$  e  $fp$  para o retificador PWM regular.

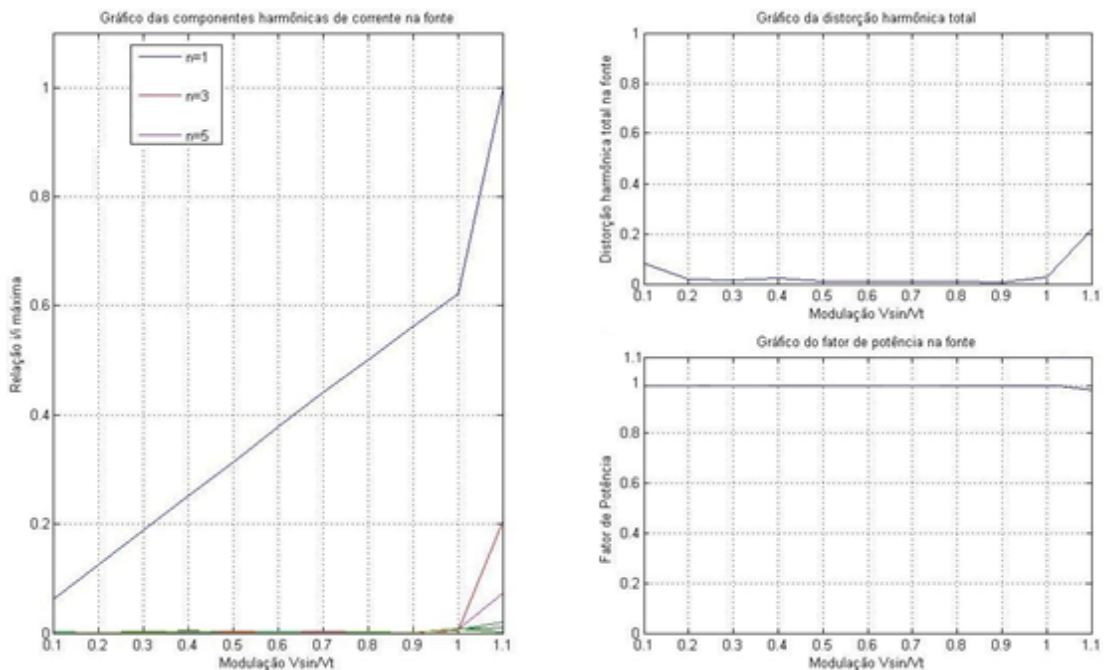


Figura 11 - Componentes harmônicos de corrente,  $THD$  e  $fp$  para o retificador PWM senoidal.

Para o retificador PWM regular podemos notar que as componentes harmônicas de corrente possuem certa linearidade, porém ainda existem componentes de baixa ordem. Seu fator de potência fica em torno de 0,9 para toda faixa de controle.

Já o retificador PWM senoidal não apresenta componentes harmônicas de corrente de baixa ordem quando o índice de modulação é menor que 1. Seu fator de potência é praticamente constante igual a 1.

Uma análise mais profunda pode mostrar que o retificador PWM senoidal apresenta uma característica de eliminação de componentes harmônicas (Dewan & Straughen, 1975), ele elimina os harmônicos inferiores a  $2p-1$ , onde  $p$  é o número de pulsos por semi-ciclo. Então se considerarmos este retificador com 10 pulsos, o harmônico de menor ordem será o décimo nono.

No retificador PWM regular, podemos notar que as componentes harmônicas de corrente apresentam certa linearidade e o fator de potência fica sempre próximo a 0,9. Para o PWM senoidal com índice de modulação entre 0 e 1, o retificador apresenta perfeita linearidade quando falamos em componentes harmônicas e fator de potência, percebe-se que o  $fp$  fica muito próximo de 1, que seria o valor ideal e que não existem componentes harmônicas significativas. Quando o índice de modulação passa de 1, surgem algumas componentes harmônicas e o fator de potência decai um pouco, no entanto o esperado é que se projete um retificador PWM senoidal com índice de modulação menor ou igual a 1.

Em relação ao custo envolvido na construção de cada retificador e, considerando que foi desenvolvido um único hardware flexível e apenas o controle (*software*) seria diferente pra cada tipo, concluiu-se que o retificador PWM teve o menor custo por apresentar menor filtro indutivo, porém, em ambiente industrial, sabe-se que, muitas vezes, o custo do desenvolvimento do *software* é maior que o do hardware, logo, o custo do retificador PWM se elevaria pela sua complexidade de controle.

### 4. Projeto e desenvolvimento do retificador chaveado

O protótipo desenvolvido consiste em um circuito eletrônico dividido em duas principais partes. Circuito de controle e de potência. A figura abaixo mostra o esquemático do circuito montado.

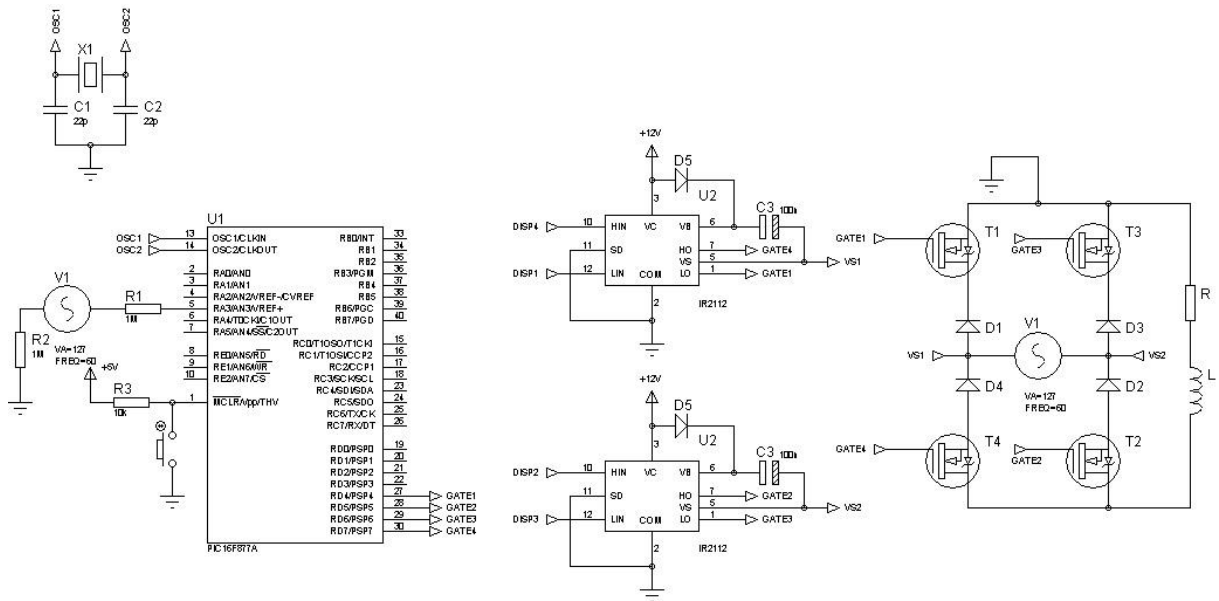


Figura 12 - Esquemático do protótipo.

Os circuitos que fornecem +5Vcc e +12Vcc e comunicação serial foram omitidos por simplificação, ele possui dois reguladores de tensão, LM7805 e LM7812, um conversor serial MAX232.

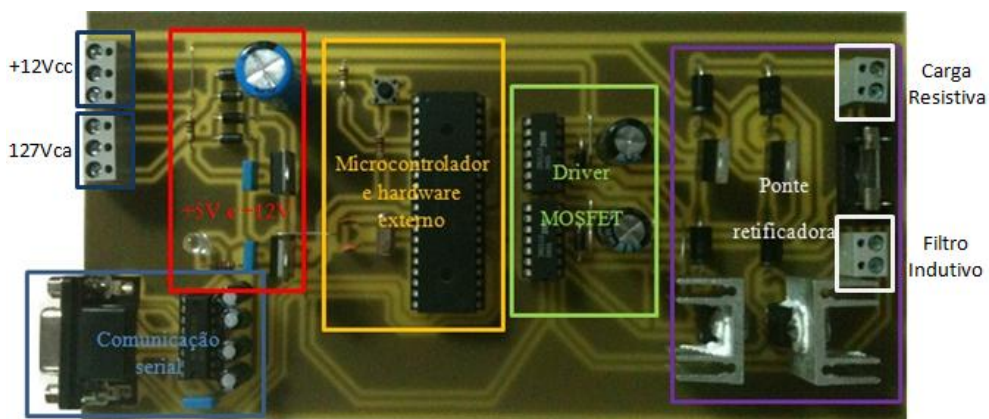


Figura 13 - Protótipo para experimentos práticos.

#### 4.1. Circuito de controle

O circuito de controle, ou de baixa potência, consiste basicamente em um microcontrolador PIC16F877A da *Microchip* devidamente ligado com todos componentes externos necessários (circuito oscilador, resistor de reset, VDD, GND) e dois drivers completos para MOSFET modelo IR2112 da *International Rectifier*. Todos os componentes foram ligados de acordo com os datasheets. Foi colocada uma porta serial para comunicação com o PC, tanto para a gravação do PIC quanto para o envio de comandos para o PIC. Este microcontrolador tem a função de enviar comandos de disparo para os drivers. Os componentes foram escolhidos de acordo com a disponibilidade no LACEP. O circuito de sincronismo com zero utiliza apenas dois resistores, um entre a fase da rede elétrica e a porta A3 do microcontrolador e outro entre o neutro da rede e o terra do circuito digital, esta solução encontra-se disponível em uma aplicação da Atmel (Atmel Corporation, 2003).

A Figura 14 mostra os pulsos obtidos utilizando o método da Atmel, esta forma de onda foi obtida com a um programa compilado e gravado no PIC onde ele gera um pulso de largura de  $1\mu\text{s}$  quando há cruzamento da onda pelo zero.

#### 4.2. Circuito de potência

O circuito de potência consiste em uma ponte completa formada por MOSFETs e diodos em série. Os MOSFETs utilizados foram IRF630 da *International Rectifier*, cuja corrente máxima é 9A e tensão de 200V. Os diodos em série são MUR460, cuja corrente máxima é 4A, e tensão reversa máxima é 1000V e são de recuperação rápida. Estes diodos são utilizados para que os MOSFETs não conduzam naturalmente da fonte para o dreno. Foi utilizado um fusível de 3A para proteger estes componentes.

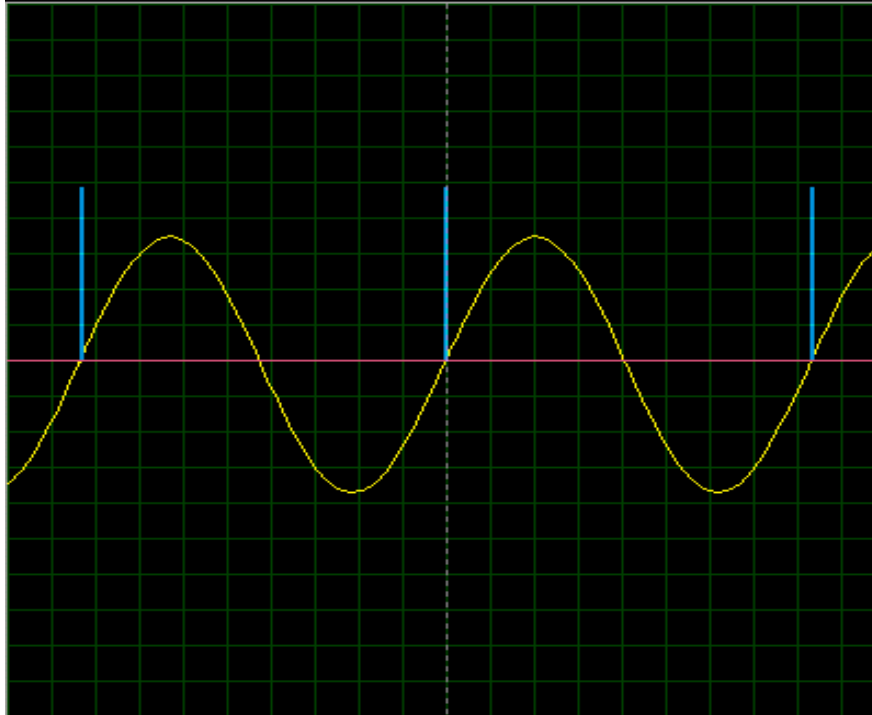


Figura 14 - Detalhe do sincronismo com o zero da rede.

A carga utilizada foi um banco de lâmpadas do laboratório (3 lâmpadas incandescentes de 100W cada) e bobinas (filtro indutivo) fabricadas no próprio laboratório. A bobina da Figura 15 possui um valor de indutância próximo de  $400\mu\text{H}$  e foi utilizada para os ensaios práticos.



Figura 15 - Bobina montada no laboratório.

### 4.3. Software

O algoritmo implementado no microcontrolador contém um programa completo de detecção de zero, função de retificador totalmente controlado, híbrido, PWM regular e senoidal. Ele possui interrupção serial para recebimento de dados. Por exemplo, ao ligá-lo no PC, ele monta uma tela de opções para a escolha do conversor a ser testado que vai de 1 a 4. Quando feita a escolha do conversor, deve-se escolher o ângulo de disparo para os retificadores totalmente controlado e híbrido. No caso do PWM regular, deve-se escolher o número de pulsos e a largura dos pulsos. Para o PWM senoidal, deve-se escolher o número de pulsos e o índice de modulação. As figuras 16, 17, 18 e 19 mostram algumas dessas telas.

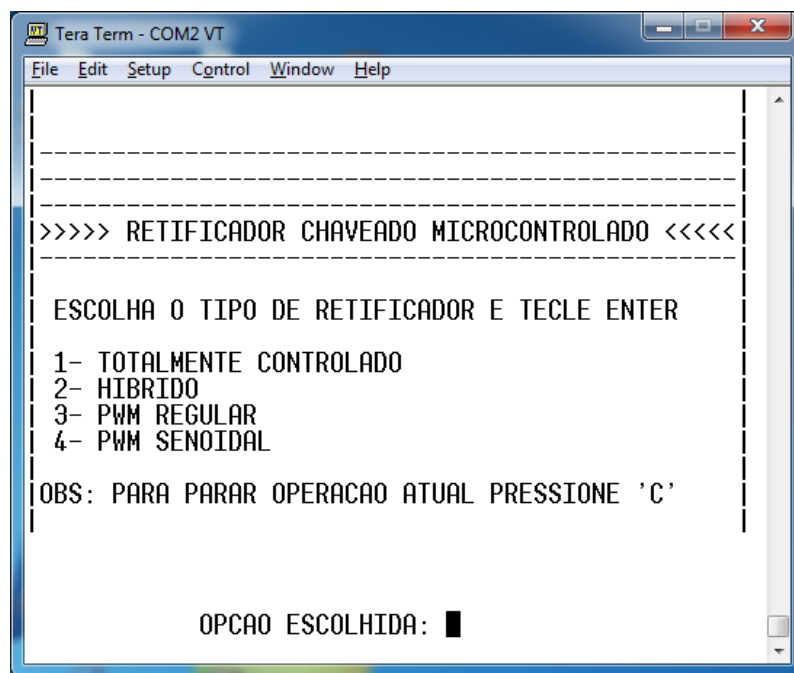


Figura 16 - Tela inicial do software.

A Figura 16 mostra a tela inicial quando o dispositivo é ligado. A Figura 17 mostra a tela quando o usuário escolhe a opção “totalmente controlado”.



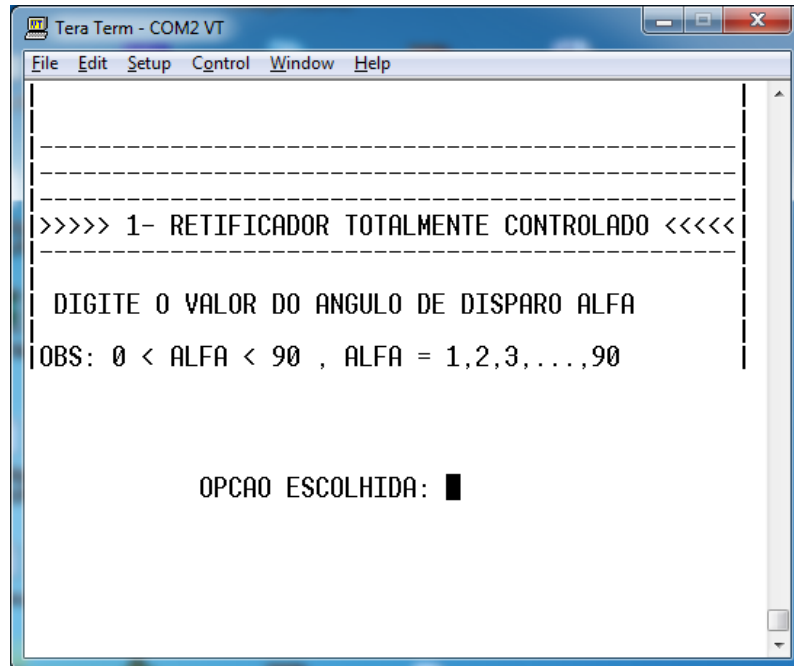


Figura 17 - Tela do software, retificador totalmente controlado.

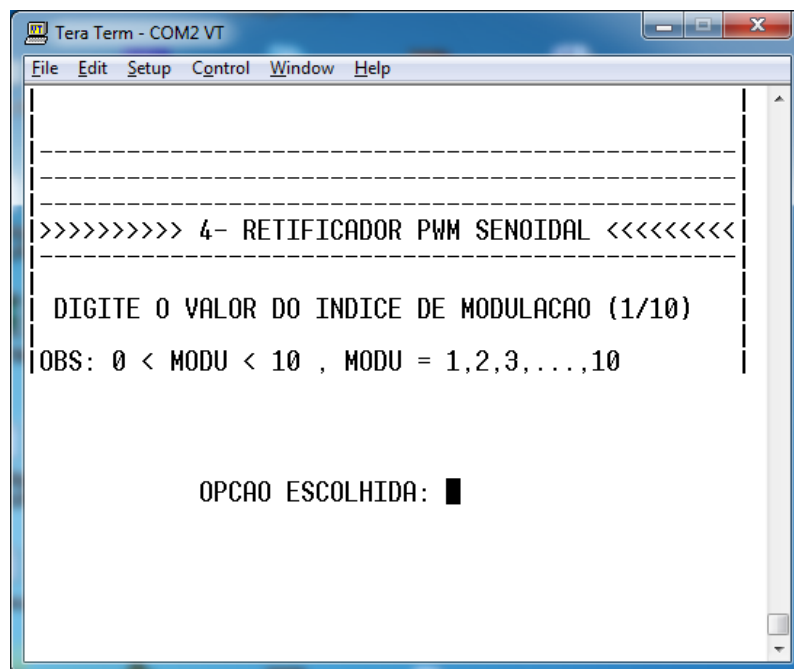


Figura 18 - Tela do software, retificador PWM senoidal, índice de modulação.

A Figura 18 mostra a tela quando o usuário escolhe a opção “PWM senoidal”, essa tela pede ao usuário para entrar com o índice de modulação, observe que este índice (0 a 10) é

dividido por 10, ou seja, resultará entre 0 e 1. A Figura 19 mostra a tela que pede ao usuário para informar o número de pulsos por semi-ciclo.

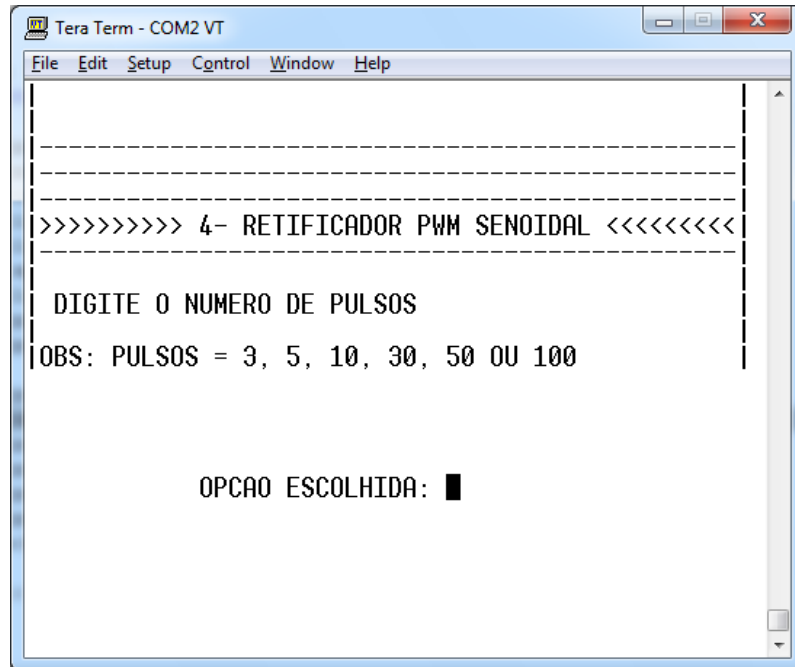


Figura 19 - Tela so software, retificador PWM senoidal, número de pulsos.

Os valores de ângulos de disparo, número de pulsos e índice de modulação são pré tabelados na memória do microcontrolador, então para o caso dos retificadores totalmente controlado e híbrido é possível escolher qualquer ângulo de disparo com precisão de 1°. Para os PWM somente é possível escolher 3, 5, 10, 30, 50 e 100 pulsos, largura de pulso de 0 a 100% (de 10 em 10) e, para o PWM senoidal, é possível escolher também o índice de modulação que varia de 0 a 1 com incremento de 0,1. Abaixo encontra-se um fluxograma do programa utilizado.

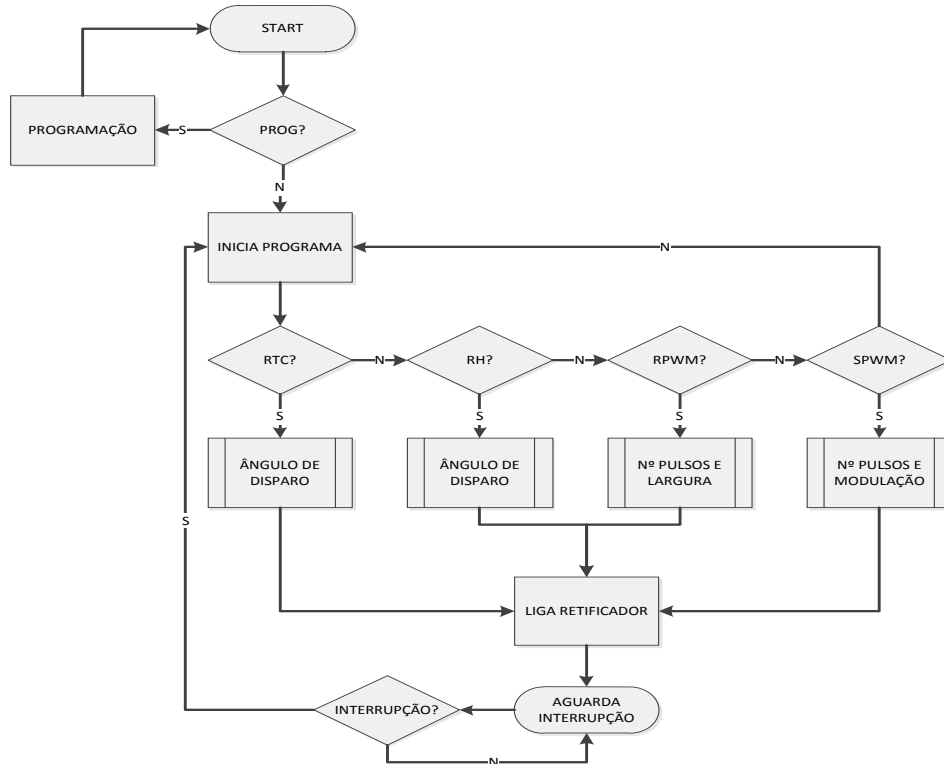


Figura 20 - Fluxograma do programa implementado.

A equação abaixo ilustra a relação entre o ângulo de condução e o tempo real.

$$\alpha = \omega t \quad (\text{equação 28a})$$

Logo:

$$\frac{\alpha\pi}{180^\circ} = 2\pi f t \quad (\text{equação 28b})$$

Neste caso,  $f=60\text{hz}$ , tem-se então:

$$t = \frac{\alpha}{21600} \quad (\text{equação 28})$$

Onde  $\alpha$  é dado em graus e  $t$  em segundos.

Esta equação foi utilizada para o cálculo dos atrasos no microcontrolador. Este atrasos são responsáveis por espaçamento e largura de pulsos.

A Figura 21 demonstra a forma de onda dos pulsos de disparo dos gates dos MOSFETs. Trata-se de uma modulação senoidal com índice de modulação igual a 1 e 10 pulsos por semi-ciclo.

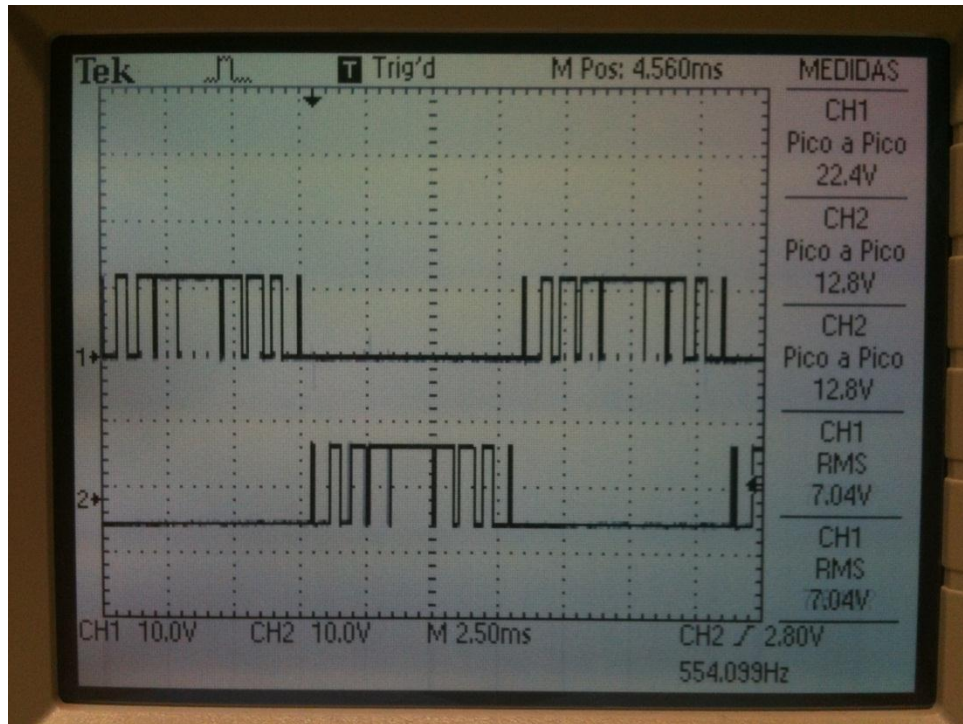


Figura 21 - Detalhe dos pulsos aplicados ao gate do MOSFET para o retificador PWM senoidal.

## 5. Resultados de laboratório

A figura a seguir mostra o equipamento montado para o experimento prático.

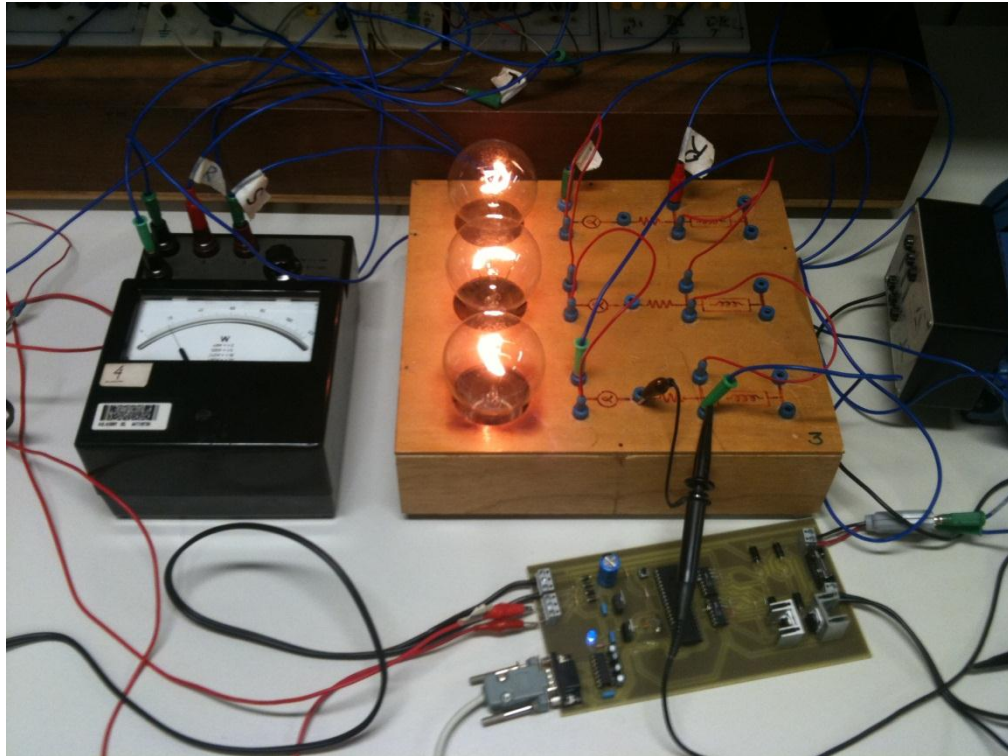


Figura 22 - Aparato montado para teste experimental.

Os resultados de laboratório foram obtidos a partir do protótipo desenvolvido. Este foi alimentado por um variac e forneceu potência para uma carga RL formada por um banco de lâmpadas e filtro indutivo. A potência ativa foi medida utilizando um wattímetro analógico com precisão de 2W e a potência aparente foi medida utilizando um voltímetro e um amperímetro. O número de pulsos por semi-ciclo para os retificadores PWM é igual a 10. Os resultados obtidos estão apresentados na tabelas 1, 2, 3 e 4 e as formas de onda estão apresentadas na figuras 23 a 34. Para os retificadores com acionamento PWM, o número de pulsos por semi-ciclo é 10.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para o retificador totalmente controlado com um filtro indutivo de aproximadamente 45mH (obtido através da função *fialphal*) para um *ripple* máximo de 10%.

Tabela 1 - Resultados práticos para o retificador totalmente controlado.

Ângulo de disparo (°)	Tensão média da carga (V)	Potência ativa (W)	Potência aparente (VA)	Fator de potência
0	114	300	333	0,90
30	100	160	205	0,78
60	57	45	105	0,43
90	0	0	0	0

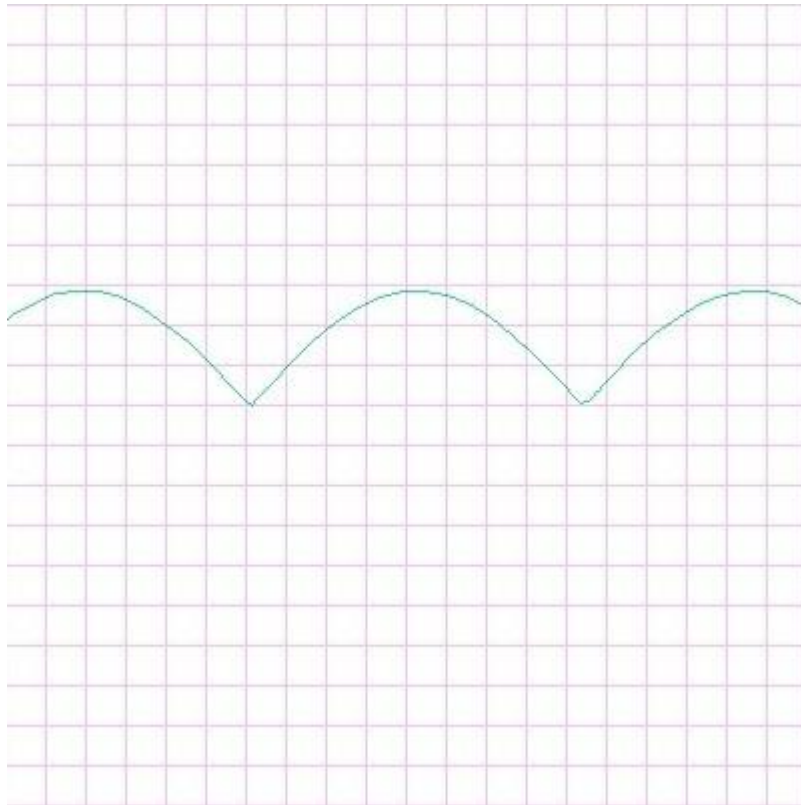


Figura 23 - Forma de onda da tensão na carga para o retificador totalmente controlado com  $\alpha=0^\circ$ .

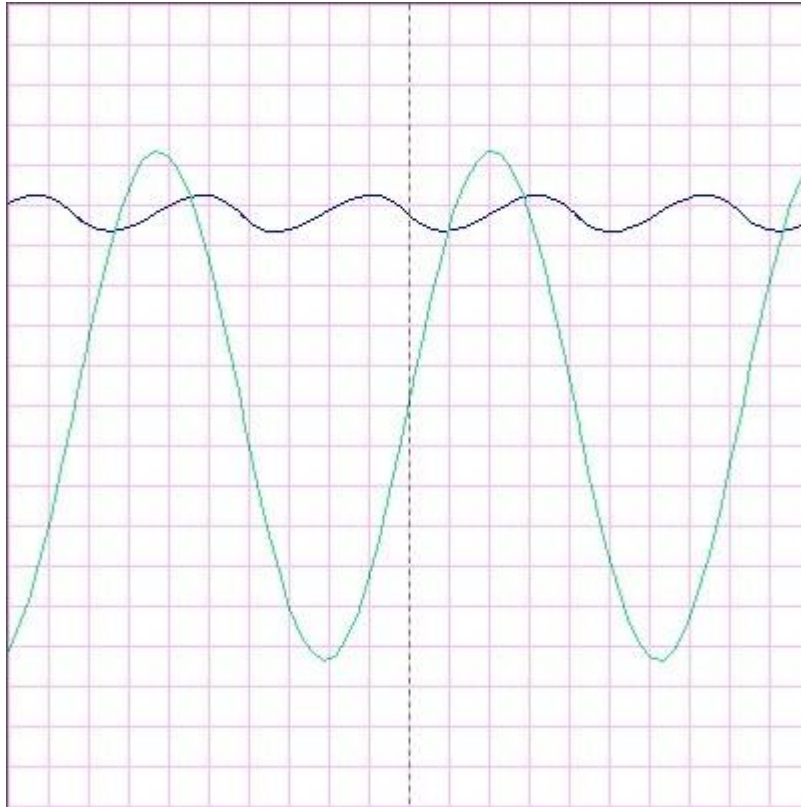


Figura 24 - Forma de onda da corrente na carga para o retificador totalmente controlado com  $\alpha=0^\circ$ .



Figura 25 - Forma de onda da corrente de linha CA para o retificador totalmente controlado com  $\alpha=0^\circ$ .

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para o retificador híbrido com um filtro indutivo de aproximadamente 10mH. (obtido através da função *fialpha*) para um *ripple* máximo de 10%.

Tabela 2 - Resultados práticos para o retificador híbrido.

Ângulo de disparo (°)	Tensão média da carga (V)	Potência ativa (W)	Potência aparente (VA)	Fator de potência
0	114	300	333	0,90
30	106	270	290	0,93
60	85	220	267	0,82
90	57	110	170,4	0,65
170	0,8	0,01	0,3	0,03

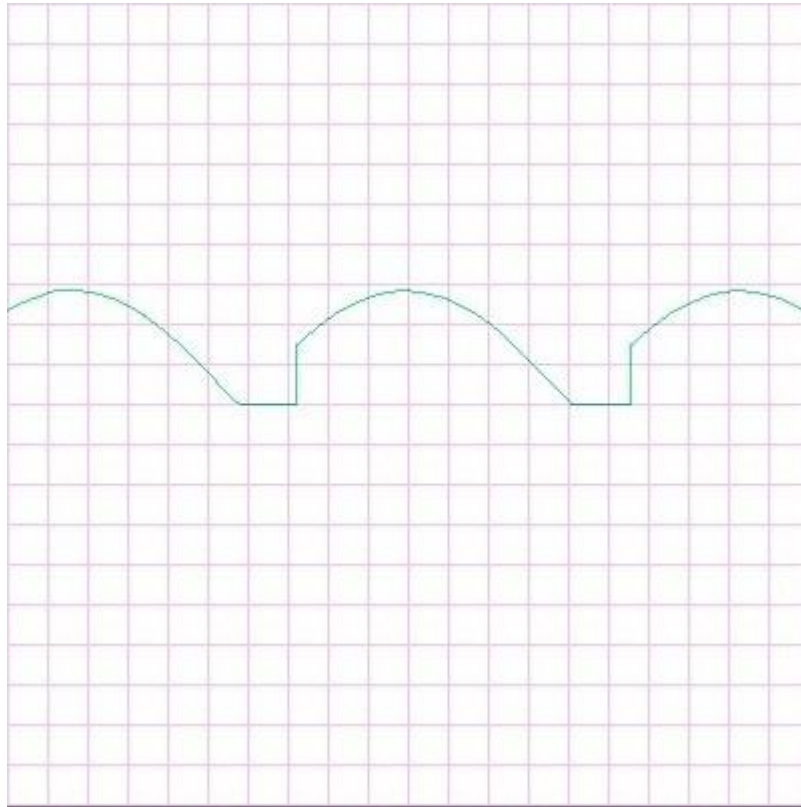


Figura 26 - Forma de onda da tensão na carga para o retificador híbrido com  $\alpha=30^\circ$ .



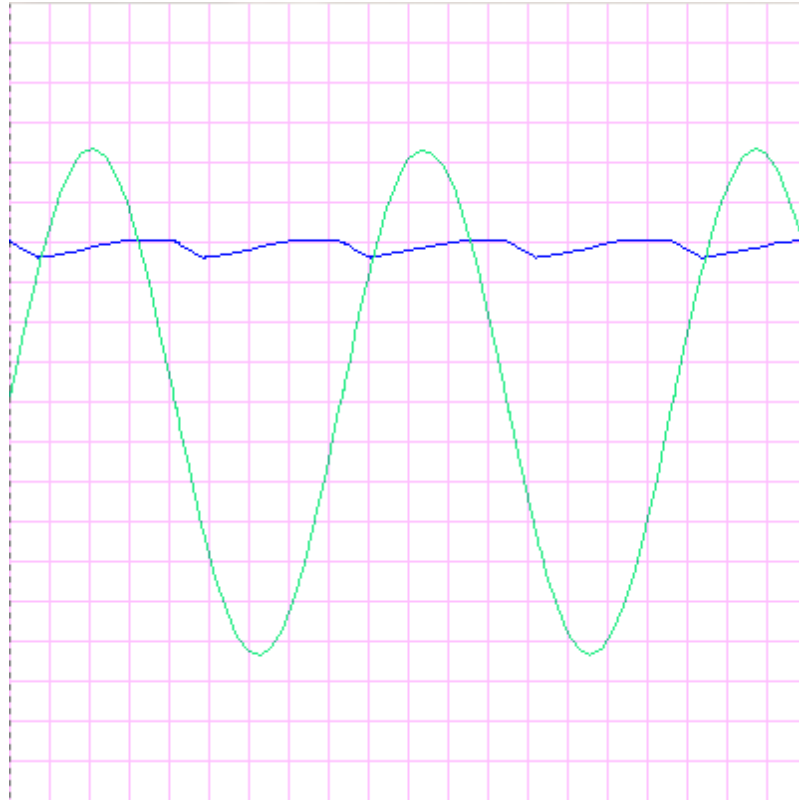


Figura 27 - Forma de onda da corrente na carga para o retificador híbrido com  $\alpha=30^\circ$ .

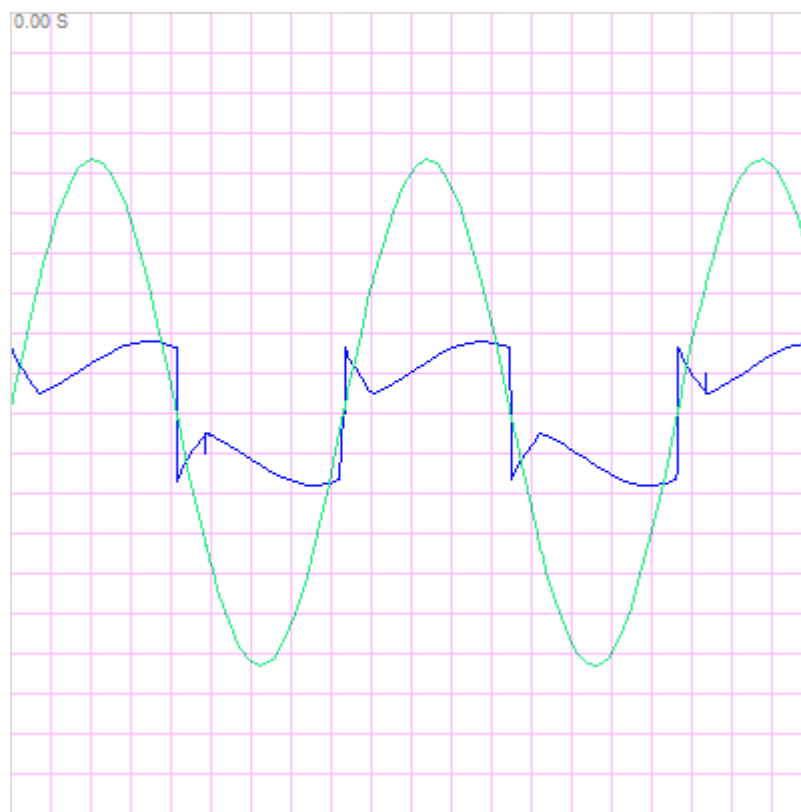


Figura 28 - Forma de onda da corrente de linha CA para o retificador híbrido com  $\alpha=30^\circ$ .

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para o retificador PWM regular com um filtro indutivo de aproximadamente 3mH. (obtido através da função  $f_{\alpha}$ ) para um *ripple* máximo de 10%.

Tabela 3 - Resultados práticos para o retificador PWM regular.

Largura de pulso (°)	Tensão média da carga (V)	Potência ativa (W)	Potência aparente (VA)	Fator de potência
4,8	30	2	2,3	0,87
10,8	66	220	250	0,88
16,2	102	285	327	0,87
18	115	300	337	0,89

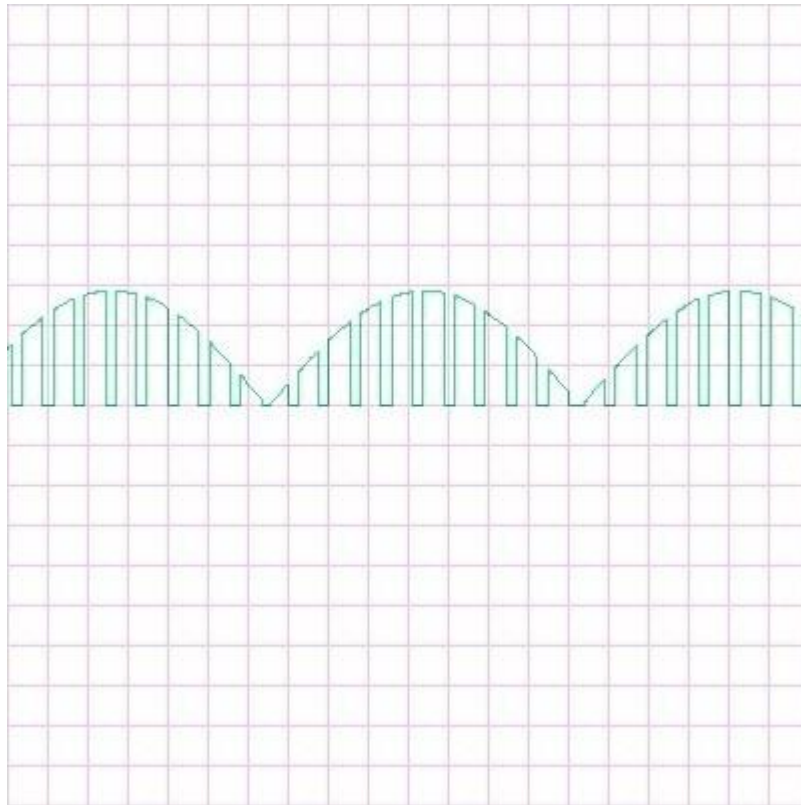


Figura 29 - Forma de onda da tensão na carga para o retificador PWM regular de 10 pulsos e largura de pulso de 10°.

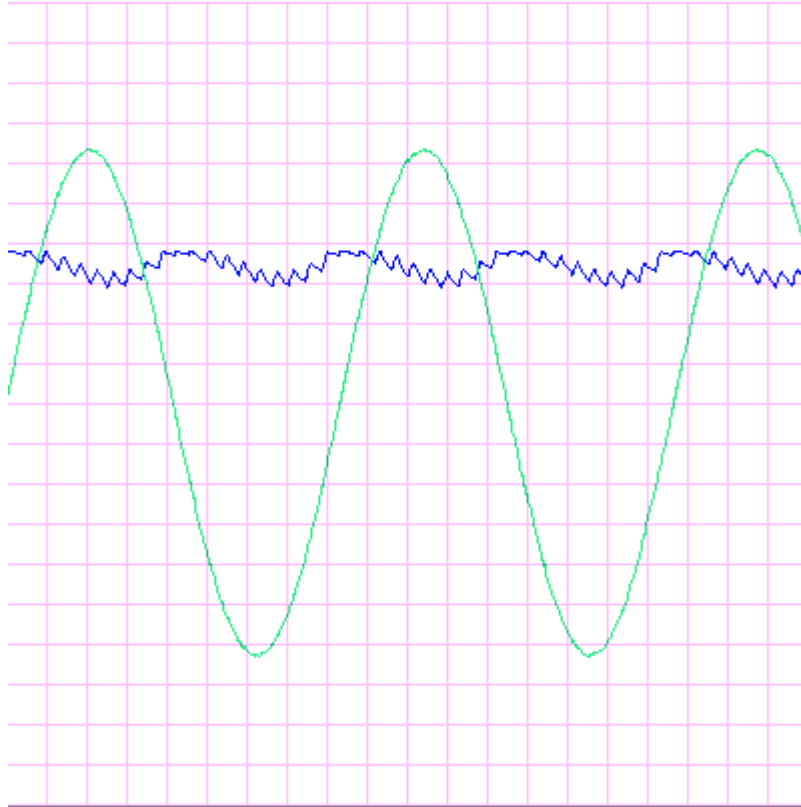


Figura 30 - Forma de onda da corrente na carga para o retificador PWM regular de 10 pulsos e largura de pulso de 10°.

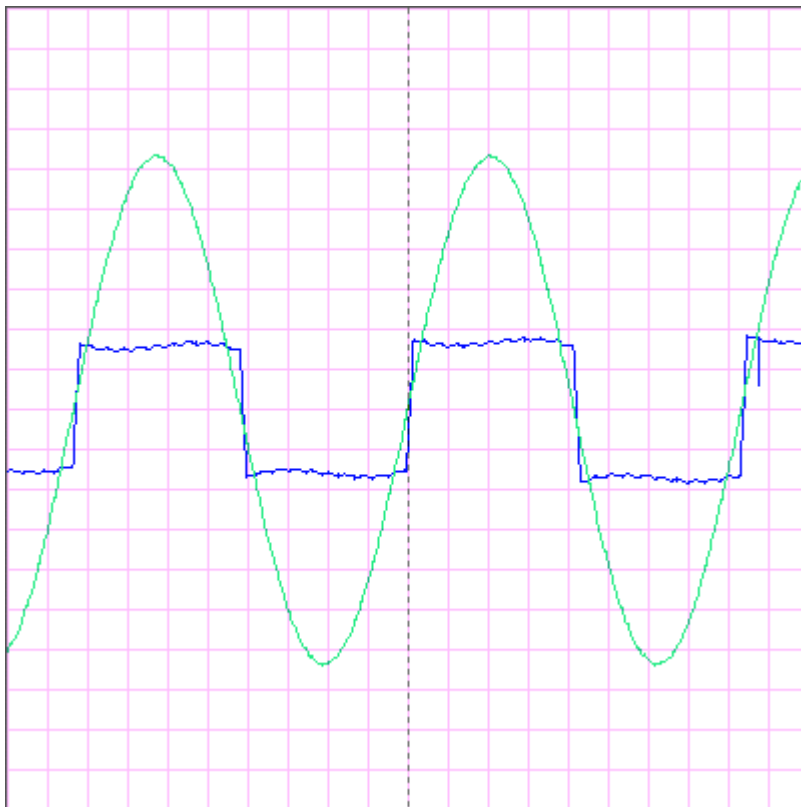


Figura 31 - Forma de onda da corrente de linha CA para o retificador PWM regular de 10 pulsos e largura de pulso de 10°.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para o retificador PWM senoidal com um filtro indutivo de aproximadamente 3mH. (obtido através da função *fialpha*)

Tabela 4 - Resultados práticos para o retificador PWM senoidal.

Índice de modulação	Tensão média da carga (V)	Potência ativa (W)	Potência aparente (VA)	Fator de potência
0,3	27	92	98	0,94
0,6	53	183	197	0,93
0,9	92	264	281	0,94
1	115	300	315	0,95
1,1	97	287	315	0,91

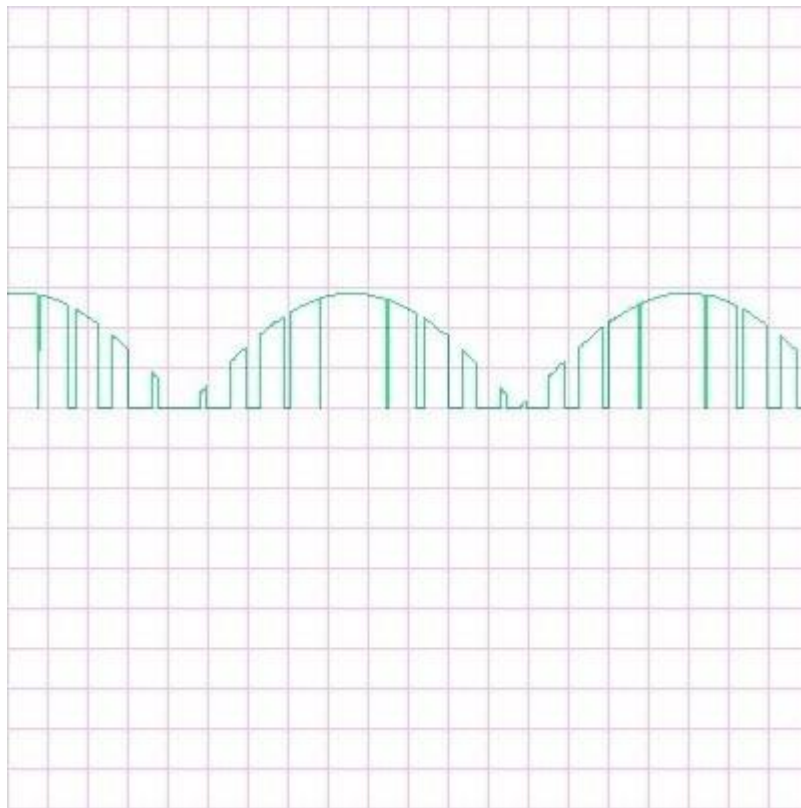


Figura 32 - Forma de onda da tensão na carga para o retificador PWM senoidal de 10 pulsos e  $M=1$ .

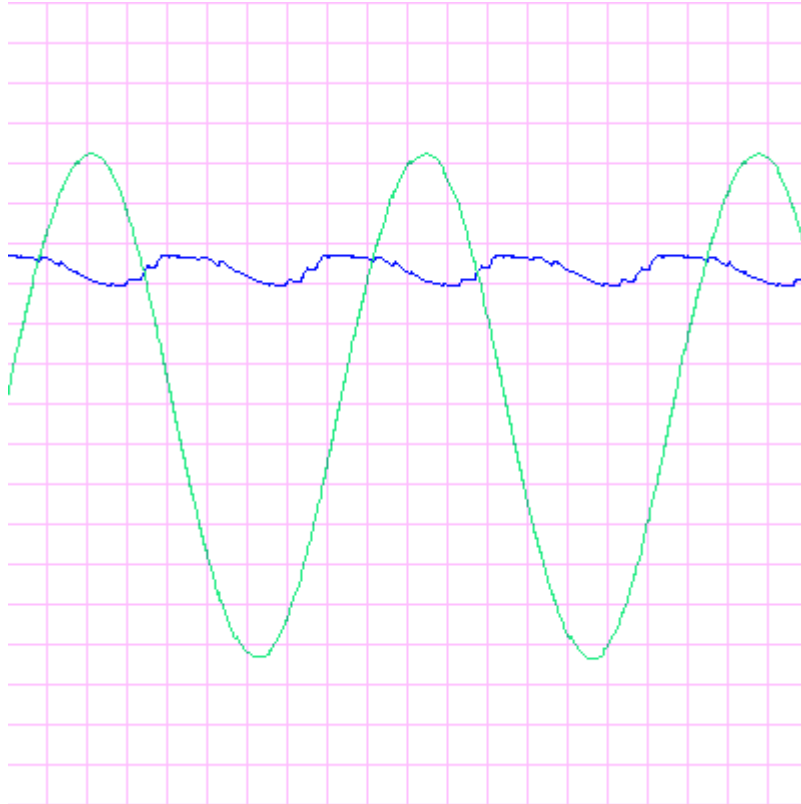


Figura 33 - Forma de onda da corrente na carga para retificador PWM senoidal de 10 pulsos e  $M=1$ .

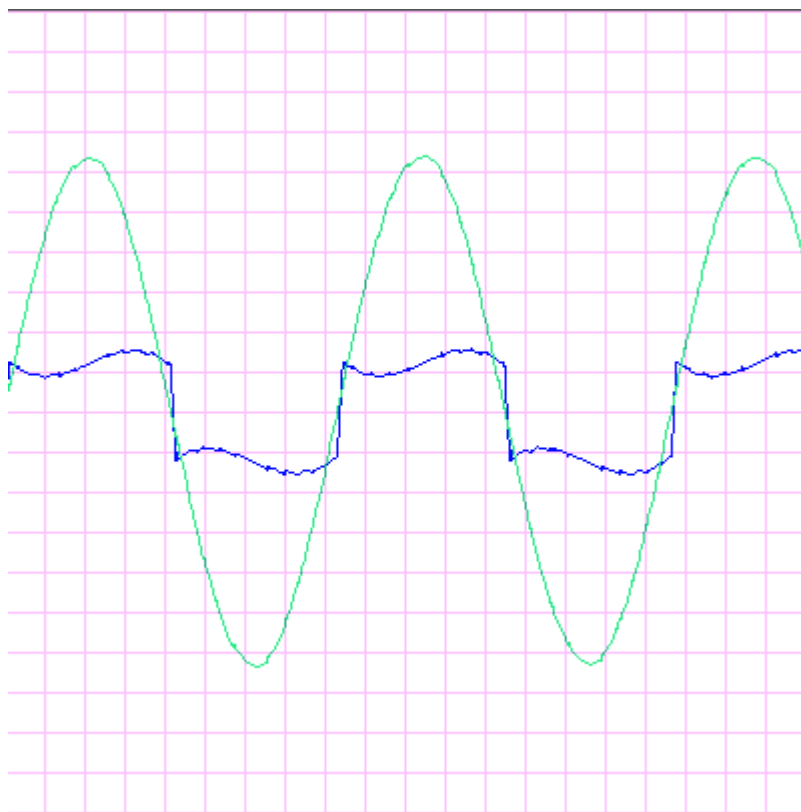


Figura 34 - Forma de onda da corrente de linha CA para o retificador PWM senoidal de 10 pulsos e  $M=1$ .

Observando os resultados apresentados na Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 e as curvas da Figura 3, Figura 6, Figura 10 e Figura 11, é possível concluir que o estudo teórico esta totalmente de acordo com o experimento prático, toma-se o fator de potência como parâmetro de comparação, que é nosso objetivo principal. Este apresenta valor muito similares aos obtidos na prática.

## 6. Conclusões

É possível concluir que o protótipo desenvolvido atende às necessidades exigidas de forma satisfatória obtendo resultados esperados na teoria. Pelos gráficos é possível notar uma total concordância para todos os casos estudados.

As formas de onda apresentadas no capítulo 5 demonstram as diferenças entre os modos de operação de cada retificador, cabe ao projetista escolher o tipo de operação que atenda às necessidades do projeto.

Percebe-se que o valor do filtro indutivo é reduzido em até 10 vezes quando comparados o retificador totalmente controlado e o híbrido com acionamento PWM regular ou senoidal. Foi considerada a hipótese de que a corrente na carga seria contínua e constante, utilizando um filtro indutivo com indutância infinita, no entanto, sabe-se que na prática foi utilizada uma carga RL, porém o projetista consegue estabelecer um valor adequado de *ripple* máximo de corrente na carga, de acordo com este *ripple* é possível determinar um valor adequado de filtro indutivo.

O retificador que apresenta maior fator de potência é o PWM senoidal devido às propriedades de eliminação de harmônicos de baixa ordem.

O que determina o uso de um retificador ou outro é o tipo de aplicação, a qualidade exigida e o orçamento do projeto. Este estudo contemplou, de forma clara e objetiva, os principais aspectos de cada retificador proposto.

Como proposta para a continuação deste estudo sugere-se a realização de um estudo envolvendo cargas ativas, estudo de desempenho energético do retificador, um estudo sobre inversores utilizando este mesmo hardware e também podemos verificar o funcionamento de retificadores PWM totalmente controlado.





## 7. Referências bibliográficas

Atmel Corporation. (2003). *AVR182: Zero Cross Detector*. Acesso em Junho de 2009, disponível em [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2508.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2508.pdf)

Del Bianco, H. S., Otani, H., & Quini, R. A. (2005). *Determinação de filtro indutivo de corrente contínua para retificadores controlados*. FIEL - Faculdades Integradas Einstein de Limeira, Limeira, SP.

Dewan, S. B., & Straughen, A. (1975). *Power semiconductor circuits*. New York: Wiley.

Rashid, M. H. (1999). *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. São Paulo: Makron Books.

Spiegel, M. R., Liu, J. X., & Lipschutz, S. (2008). *Schaum'S Outline Of Mathematical Handbook Of Formulas And Tables*. MCGRAW-HILL EDUCATION - EUROPE.



## Apêndices

### Apêndice A – Resultados teóricos para a tensão de carga CC

O estudo da tensão de carga CC foi verificado através de um trabalho anterior (Del Bianco, Otani, & Quini, 2005).

A seguir se encontram os principais resultados obtidos.

A partir das equações de tensão média na carga CC (equações 9, 17 e 25) pôde-se plotar os gráficos da Figura 35.

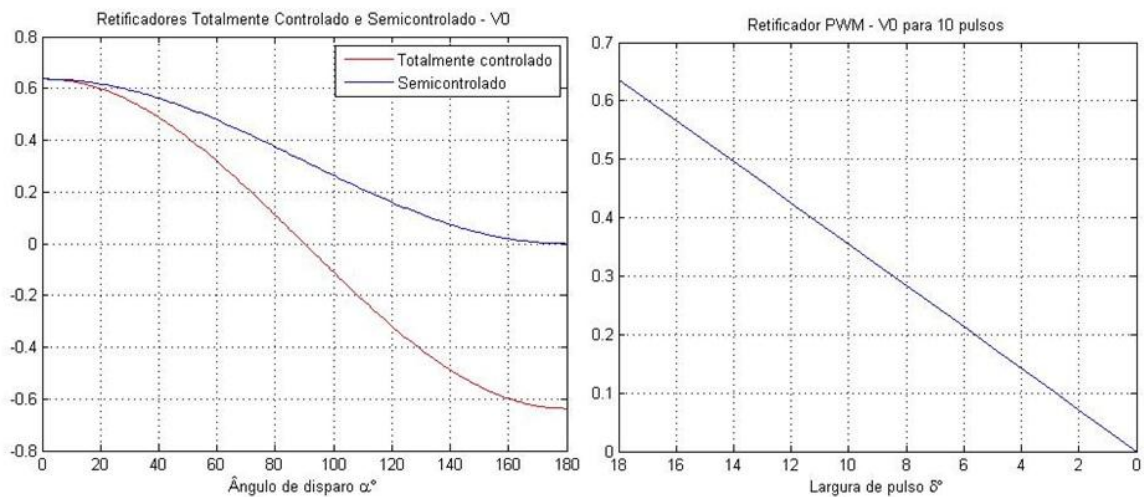


Figura 35 - Tensão média na carga.

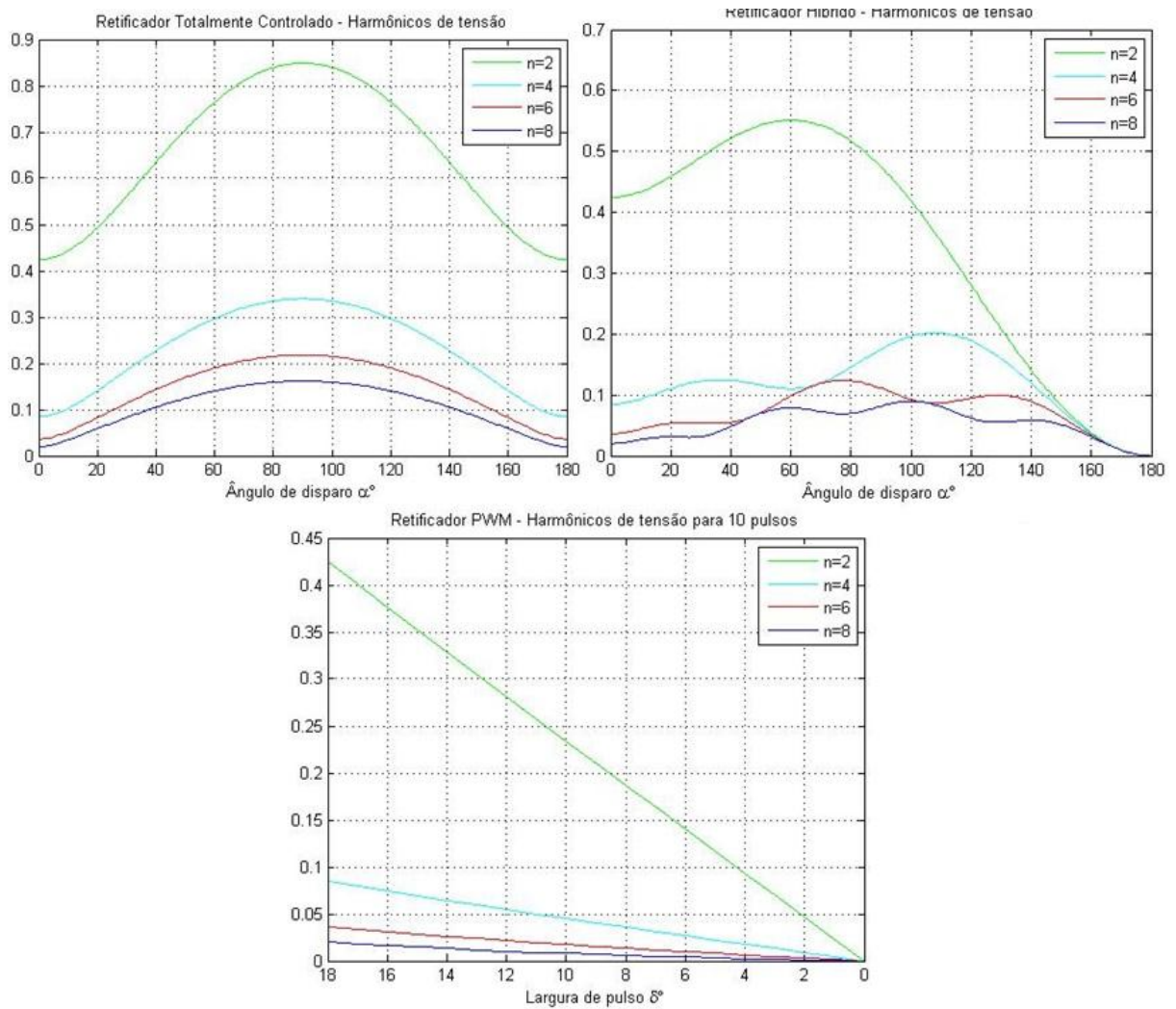


Figura 36 - Harmônicos de tensão na carga.

Estes gráficos de harmônicos de tensão (Figura 36) e corrente (Figura 37) e *ripple* de corrente (Figura 38) na carga CC foram obtidos através das equações de tensão (termos  $a_n$  e  $b_n$ ) na carga CC (equações 10, 11, 18, 19, 26 e 27).

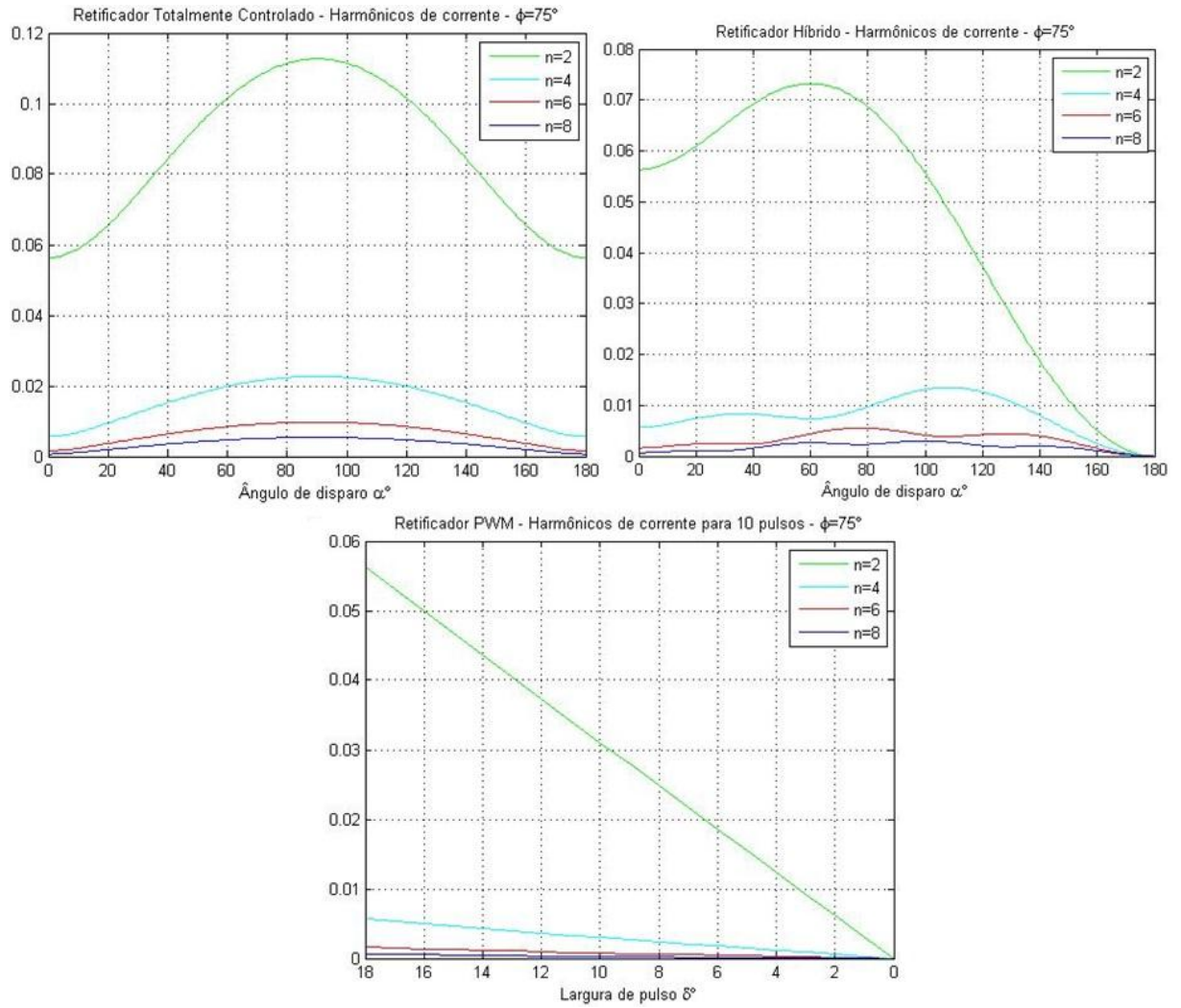


Figura 37 - Harmônicos de corrente na carga.

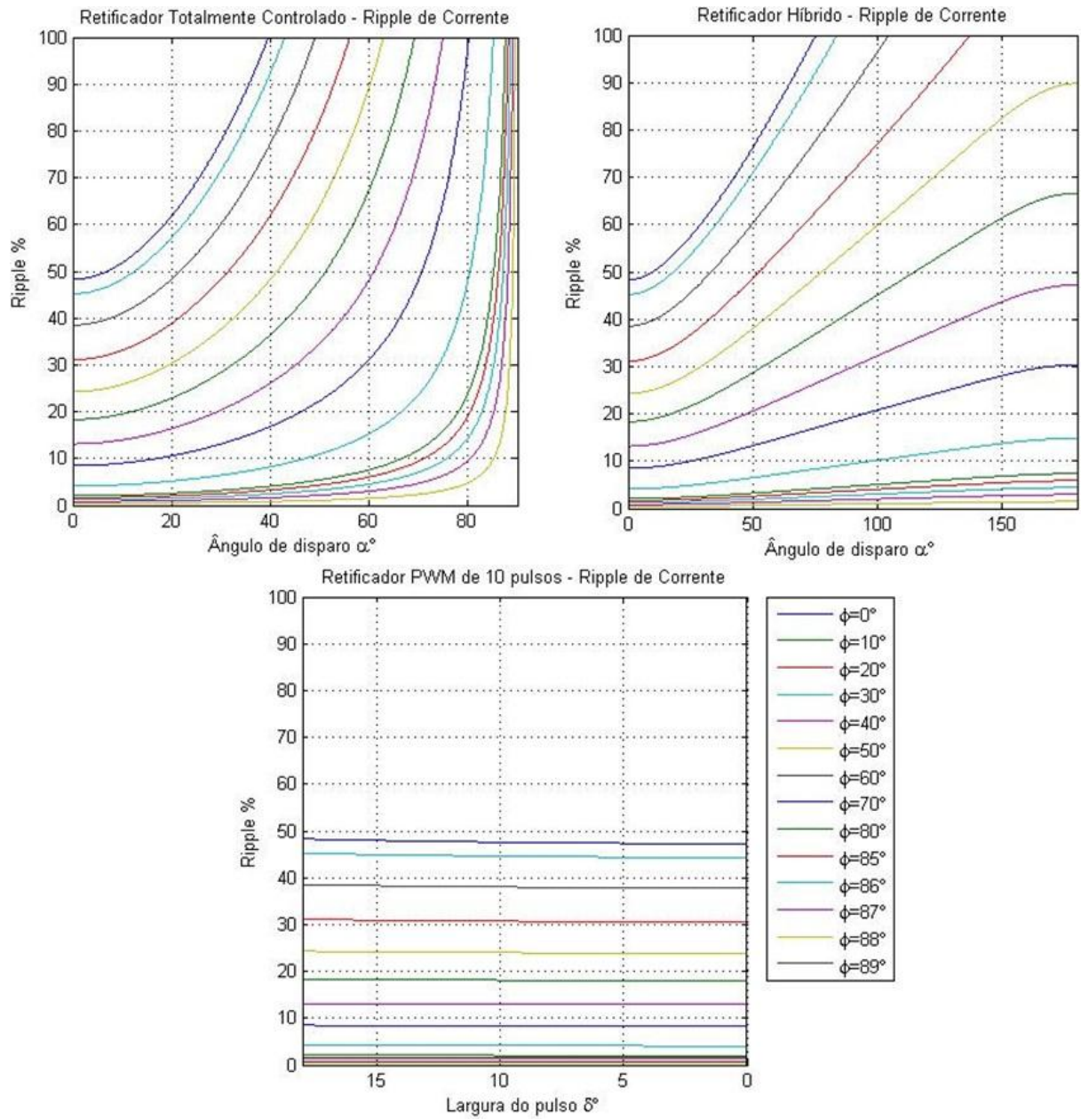


Figura 38 - *Ripple* de corrente.

## Apêndice B – Códigos fonte das funções implementadas

### Função grafthd

Essa função gera os gráficos de componentes harmônicas de corrente, distorção harmônica total e fator de potência para os retificadores estudados. Basta informar o tipo de retificador, o número de pulsos (para PWM) e o ângulo de carga  $\phi$ .

```
%function[text]=grafthd(tipo,p,fi);
close all;
clear all;
clc;
tipo=input('Escolha o tipo do conversor:\n0 - Totalmente controlado;\n1 -
Semi-controlado;\n2 - PWM;\n3 - SPWM.\n');
if tipo==2
    p=input('Digite o número de pulsos por semi-ciclo: ');
end
fi=input('Digite o valor do ângulo de carga \phi em graus: ');
nmax=input('Digite a ordem máxima de harmônicos a ser considerada: ');
text='O gráfico foi gerado com sucesso';

if tipo==0
    for n=1:2:nmax
        cont=0;
        soma_v0=0;soma_an=0;soma_bn=0;an=0;bn=0;
        for alpha=0:pi/180:pi/2
            cont=cont+1;
            an=2*inv(n*pi)*(sin(n*(alpha+pi))-sin(n*alpha));
            bn=2*inv(n*pi)*(cos(n*alpha)-cos(n*(alpha+pi)));
            i(cont,n)=sqrt(an.^2+bn.^2)./zn(n,fi);
            disp(cont)=alpha*180/pi;
            cosfi(cont)=cos(alpha);
        end
    end
    imax=max(max(i));
    inorm=i./imax;
    subplot(2,2,[1 3]);
    plot(disp,inorm);
    title('Gráfico das componentes harmônicas de corrente na fonte');
    xlabel('Ângulo de disparo \alpha \circ');
    ylabel('Relação i/i máxima');
    YLim([0 1.1]);
    grid;

    legend('n=1','n=2','n=3','n=4','n=5','n=6','n=7','n=8','n=9','n=10','n=11',
'n=12','n=13'...
        , 'n=14','n=15','n=16','n=17','n=18','n=19','n=20','n=21');
    thd=sqrt(sum(i(:,3:nmax).^2,2))./i(:,1);
%Distorção harmônica total
    subplot(2,2,2);
    plot(disp,thd);
    title('Gráfico da distorção harmônica total');
    xlabel('Ângulo de disparo \alpha \circ');
    ylabel('Distorção harmônica total na fonte');
```

```

    YLim([0 1]);
    grid;
    fp=cosfi'./sqrt(1+thd.^2);
    subplot(2,2,4);
    plot(dispatch,fp);
    title('Gráfico do fator de potência na fonte');
    xlabel('Ângulo de disparo \alpha \circ');
    ylabel('Fator de Potência');
    YLim([0 1]);
    grid;
end

if tipo==1
    for n=1:2:nmax
        cont=0;
        soma_v0=0;soma_an=0;soma_bn=0;an=0;bn=0;
        for alpha=0:pi/180:pi
            cont=cont+1;
            an=2*inv(n*pi)*(sin(n*pi)-sin(n*alpha));
            bn=2*inv(n*pi)*(cos(n*alpha)-cos(n*pi));
            i(cont,n)=sqrt(an.^2+bn.^2)./zn(n,fi);
            disp(cont)=alpha*180/pi;
            cosfi(cont)=cos(alpha/2);
        end
    end
    imax=max(max(i));
    inorm=i./imax;
    subplot(2,2,[1 3]);
    plot(dispatch,inorm);
    title('Gráfico das componentes harmônicas de corrente na fonte');
    xlabel('Ângulo de disparo \alpha \circ');
    ylabel('Relação i/i máxima');
    YLim([0 1.1]);
    grid;

    legend('n=1','n=2','n=3','n=4','n=5','n=6','n=7','n=8','n=9','n=10','n=11',
        'n=12','n=13'...
        , 'n=14','n=15','n=16','n=17','n=18','n=19','n=20','n=21');
    thd=sqrt(sum(inorm(:,3:nmax).^2,2))./inorm(:,1);
    %Distorção harmônica total
    subplot(2,2,2);
    plot(dispatch,thd);
    title('Gráfico da distorção harmônica total');
    xlabel('Ângulo de disparo \alpha \circ');
    ylabel('Distorção harmônica total na fonte');
    grid;
    fp=cosfi'./sqrt(1+thd.^2);
    subplot(2,2,4);
    plot(dispatch,fp);
    title('Gráfico do fator de potência na fonte');
    xlabel('Ângulo de disparo \alpha \circ');
    ylabel('Fator de Potência');
    YLim([0 1]);
    grid;
end

if tipo==2
    for n=1:2:nmax
        cont=0;
        for l=0:pi/18000:pi/p
            cont=cont+1;

```



```

alpha_1=(pi-1*p)*inv(2*p);
soma_an=0;soma_bn=0;an=0;bn=0;
for k=1:1:p
    alpha_k=alpha_1+(pi/p)*(k-1);
    an=2*inv(n*pi)*(cos(n*alpha_k)-cos(n*(alpha_k+1)));
    bn=2*inv(n*pi)*(sin(n*(alpha_k+1))-sin(n*alpha_k));
    soma_an=soma_an+an;
    soma_bn=soma_bn+bn;
end
i(cont,n)=sqrt(soma_an.^2+soma_bn.^2)./zn(n,fi);
disp(cont)=1*p/pi;
end
end
imax=max(max(i));
inorm=i./imax;
subplot(2,2,[1 3]);
plot(disp,inorm);
title('Gráfico das componentes harmônicas de corrente na fonte');
xlabel('Largura de pulso \delta dada em pi/n\circ de pulsos');
ylabel('Relação i/i máxima');
YLim([0 1.1]);
grid;

legend('n=1','n=2','n=3','n=4','n=5','n=6','n=7','n=8','n=9','n=10','n=11',
'n=12','n=13'...
    , 'n=14','n=15','n=16','n=17','n=18','n=19','n=20','n=21');
thd=sqrt(sum(inorm(:,3:nmax).^2,2))./inorm(:,1);
%Distorção harmônica total
subplot(2,2,2);
plot(disp,thd);
axis([0 1 0 2]);
title('Gráfico da distorção harmônica total');
xlabel('Largura de pulso \delta dada em pi/n\circ de pulsos');
ylabel('Distorção harmônica total na fonte');
grid;
fp=1./((1+thd.^2).^0.5);
subplot(2,2,4);
plot(disp,fp);
axis([0 1 0 1]);
title('Gráfico do fator de potência na fonte');
xlabel('Largura de pulso \delta dada em pi/n\circ de pulsos');
ylabel('Fator de Potência');
YLim([0 1]);
grid;
end

if tipo==3
    % f é a frequência da rede elétrica.
    f=input('A frequência do sinal de entrada em hertz, f = ');
    % Q é o número de pulsos por semi-ciclo.
    Q=input('O número de pulsos por semi-ciclo = ');
    N=2*Q;
    for n=1:2:nmax
        cont=0;
        for ma=0.1:0.01:1.1
            cont=cont+1;
            soma_bn=0;
            % Gerador de onda triangular Vt para sinal de referência
            % senoidal Vin.
            % Descoberta do ângulo inicial (alpha) e o final (beta) para
            % cada pulso

```

```

% Para cada ciclo da onda triangular, há um incremento e um
% decremento do sinal, esse período é dividido em 2N
% sub-períodos, k é utilizado como um contador destes sub-
períodos.

% Para efeito de cálculo, cada sub-período é dividido em 50
% pontos, isto é, o período do sinal de entrada é dividido em
% 100N pontos.
% j é um contador dentro deste sub-período
% i é um contador de tempo generalizado.
for k=1:2*N
    for j=1:50
        % Buscando o contador de tempo generalizado
        i=j+(k-1)*50;
        % Buscando o passo
        wt(i)=i*pi/(N*50);
        % Calculando a forma de onda triangular
        if rem(k,2)==0
            Vt(i)=0.02*j;
            if abs(Vt(i)-ma*abs(sin(wt(i))))<0.011
                m=j;
                beta(fix(k/2)+1)=(pi/180)*3.6*((k-1)*50+m)/N;
            else
                j=j;
            end
        else
            Vt(i)=1-0.02*j;
            if abs(Vt(i)-ma*abs(sin(wt(i))))<0.011
                l=j;
                alpha(fix(k/2)+1)=(pi/180)*3.6*((k-1)*50+l)/N;
            else
                j=j;
            end
        end
    end
end
end
%beta(1)=[];
if size(beta,2) > size(alpha,2)
    beta(1)=[];
end
if size(beta,2) < size(alpha,2)
    alpha(size(alpha,2))=[];
end
largura=abs(beta-alpha);
for o=1:Q
    lm=largura(o);
    alpha_m=alpha(o);
    %bn=4*inv(n*pi)*sin(n*lm/4)*(sin(n*(alpha_m+3*lm/4))-
sin(n*(pi+alpha_m+lm/4)));
    bn=2*inv(n*pi)*sin(n*lm/2)*(sin(n*(alpha_m+lm/2))-
sin(n*(pi+alpha_m+lm/2)));
    soma_bn=soma_bn+bn;
end
cor(cont,n)=sqrt(soma_bn.^2)./zn(n,fi);
disp(cont)=ma;
end
end
imax=max(max(cor));
inorm=cor./imax;
subplot(2,2,[1 3]);
plot(disp,inorm);
title('Gráfico das componentes harmônicas de corrente na fonte');

```

```

xlabel('Modulação Vsin/Vt');
ylabel('Relação i/i máxima');
YLim([0 1]);
grid;

legend('n=1','n=2','n=3','n=4','n=5','n=6','n=7','n=8','n=9','n=10','n=11',
'n=12','n=13'...
      , 'n=14','n=15','n=16','n=17','n=18','n=19','n=20','n=21');
thd=sqrt(sum(inorm(:,3:nmax).^2,2))./inorm(:,1);
subplot(2,2,2);
plot(displ,thd);
title('Gráfico da distorção harmônica total');
xlabel('Modulação Vsin/Vt');
ylabel('Distorção harmônica total na fonte');
grid;
fp=1./((1+thd.^2).^0.5);
subplot(2,2,4);
plot(displ,fp);
axis([0.1 1.1 0 1]);
title('Gráfico do fator de potência na fonte');
xlabel('Modulação Vsin/Vt');
ylabel('Fator de Potência');
YLim([0 1]);
grid;
end

```

## Função spwm

Essa função calcula os ângulos  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  para a modulação PWM senoidal. Basta o usuário informar a frequência da rede elétrica (60Hz para o Brasil), o índice de modulação e o número de pulsos por semi-ciclo.

```
%Esta função calcula os ângulos para o retificador PWM senoidal
%USO: spwm(f,ma, p)
%f=frequencia da rede eletrica
%ma=indice de modulacao, razao entre senoide e triangular
%p=numero de pulsos por semi-ciclo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all
disp('PWM senoidal de um sinal AC')
disp(' ')

ma=input('o índice de modulação,ma, (0<ma<1), ma = ');

fi=input('o ângulo de fase da carga em graus = ');

p=input('O número de pulsos por semi-ciclo = ');

%N é o numero de pulsos por ciclo completo
N=2*p;
%
%PART V
% Construindo uma onda triangular, Vt , a tensão de entrada da onda, Vin,
% a tensão de saída da onda, Vout, e encontrando o angulo inicial (alpha)
% e final (beta) de cada pulso.
% Para cada periodo da onda trinagular, há uma rampa crescente e
decrecente,
% assim o periodo da fonte de entrada é dividido em 2N sub-periodos, k é
% usado como um contador destes sub-periodos.
% A propósito de cálculo cada um destes sub-períodos é dividido em 50
pontos,
% ou seja, o periodo da fonte de entrada é dividido em 100N pontos.
% j é um contador dentro do subperiodo.
% i é um contador genérico de tempo.

for k=1:2*N
    for j=1:50
        % Encontrando o contador genérico de tempo
        i=j+(k-1)*50;
        % Encontrando o passo temporal
        wt(i)=i*pi/(N*50);
        % Calculando a tensão da fonte de entrada.
        Vin(i)=sqrt(2)*1*sin(wt(i));
        mal(i)=ma*abs(sin(wt(i)));
        % Calculando a forma de onda triangular.
        if rem(k,2)==0
            Vt(i)=0.02*j;
            if abs(Vt(i)-ma*abs(sin(wt(i))))<=0.011
                m=j;
                beta(fix(k/2)+1)=3.6*((k-1)*50+m)/N;
            end
        end
    end
end
```

```

        else
            j=j;
        end

        else
            Vt(i)=1-0.02*j;
            if abs(Vt(i)-ma*abs(sin(wt(i))))<0.011
                l=j;
                alpha(fix(k/2)+1)=3.6*((k-1)*50+1)/N;
            else
                j=j;
            end

        end

        if Vt(i)>ma*abs(sin(wt(i)))
            Vout(i)=0;
        else
            Vout(i)=Vin(i);
        end

    end
end
beta(1)=[];

disp(' ')
disp('.....')
disp('alpha    beta    largura')
[alpha' beta' (beta-alpha)']

```

## Função grafspwm

Essa função gera os gráficos da modulação PWM senoidal. Basta o usuário informar a frequência da rede elétrica (60Hz para o Brasil), o índice de modulação e o número de pulsos por semi-ciclo.

```
%Esta função gera o gráfico das formas de onda do PWM senoidal
%USO: grafspwm(f,ma,p)
%f=frequencia da rede eletrica
%ma=indice de modulacao, razao entre senoide e triangular
%fi=ângulo da carga em graus
%p=numero de pulsos por semi-ciclo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all
disp('PWM senoidal de um sinal AC')
disp(' ')

Vrin=1;
f=input('A frequência do sinal de entrada em hertz, f = ');
Z=1;
ma=input('o índice de modulação,ma, (0<ma<1), ma = ');
fi=input('o ângulo de fase da carga em graus = ');
p=input('O número de pulsos por semi-ciclo = ');

%N é o numero de pulsos por ciclo completo
N=2*p;
%
% Construindo uma onda triangular, Vt , a tensão de entrada da onda, Vin,
% a tensão de saída da onda, Vout, e encontrando o angulo inicial (alpha)
% e final (beta) de cada pulso.
% Para cada periodo da onda trinagular, há uma rampa crescente e
decrecente,
% assim o periodo da fonte de entrada é dividido em 2N sub-periodos, k é
% usado como um contador destes sub-periodos.
% A propósito de cálculo cada um destes sub-periodos é dividido em 50
pontos,
% ou seja, o periodo da fonte de entrada é dividido em 100N pontos.
% j é um contador dentro do subperiodo.
% i é um contador genérico de tempo.
for k=1:2*N
for j=1:50
    % Encontrando o contador genérico de tempo
    i=j+(k-1)*50;
    % Encontrando o passo temporal
    wt(i)=i*pi/(N*50);
    % Calculando a tensão da fonte de entrada.
    Vin(i)=sqrt(2)*Vrin*sin(wt(i));
    mal(i)=ma*abs(sin(wt(i)));
    % Calculando a forma de onda triangular.
    if rem(k,2)==0
        Vt(i)=0.02*j;
        if abs(Vt(i)-ma*abs(sin(wt(i))))<=0.0055
            m=j;
            beta(fix(k/2)+1)=3.6*((k-1)*50+m)/N;
```

```

        else
            j=j;
        end
    else
        Vt(i)=1-0.02*j;
        if abs(Vt(i)-ma*abs(sin(wt(i))))<0.0055
            l=j;
            alpha(fix(k/2)+1)=3.6*((k-1)*50+1)/N;
        else
            j=j;
        end
    end
end
if Vt(i)>ma*abs(sin(wt(i)))
    Vout(i)=0;
else
    Vout(i)=Vin(i);
end
end
end
beta(1)=[];

disp(' ')
disp('.....
.')
disp('alpha    beta    largura')
[alpha' beta' (beta-alpha)']

a=0;
subplot(3,1,1)
plot(wt,Vin,wt,a)
axis([0,2*pi,-2,2])
title('Geração da saída dos pulsos de tensão ')
ylabel('Vin (pu)');
subplot(3,1,2)
plot(wt,Vt,wt,ma1,wt,a)
axis([0,2*pi,-2,2])
ylabel('Vt, m (pu)');
subplot(3,1,3)
plot(wt,Vout,wt,a)
axis([0,2*pi,-2,2])
ylabel('Vo (pu)');
xlabel('Radianos ');

```

## Função fialphal

Essa função retorna os valores de ângulo de disparo (retificadores convencionais) ou largura de pulso (PWM), ângulo de carga real (caso real  $L \neq \infty$ ), indutância do filtro indutivo e *ripple* de corrente real.

O usuário precisa informar o tipo de retificador, a potência desejada, o *ripple* desejado e o valor da resistência da carga.

```
function[resp]=fialphal(tipo,p,pot,rip,r);
%Esta função retorna os valores de fi, alpha e L
%USO: fialfal(tipo,p,cap,rip,r)
%tipo=0-totalmente controlado 1-híbrido 2-pwm
%p=número de pulsos por semiciclo, para o pwm, 0 para outros
%pot=capacidade de potencia de 1 a 100 por cento
%rip=fator de ondulação de corrente desejado de 0 a 100 por cento
%r=resistencia da carga em ohms
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tipo=input('Digite o tipo do retificador\n 0 - Totalmente Controlado\n 1
- Híbrido\n 2 - PWM\n');
p=input('Digite o número de pulsos por semiciclo para o PWM ou 0 para
outros: ');
pot=input('Digite, em porcentagem, a capacidade de potência: ');
rip=input('Digite, em porcentagem, o fator de ondulação(ripple): ');
r=input('Digite, em ohms, o valor da resistência da carga: ');
v0=(2*sqrt(2)/pi)*pot/100;
if (tipo==0)
    for alpha=0:.01:90
        if ((vprtc(0,alpha)-v0)<0)
            break
        end
    end
end
if (tipo==1)
    for alpha=0:.01:180
        if ((vprh(0,alpha)-v0)<0)
            break
        end
    end
end
if (tipo==2)
    for alpha=180/p:-.01:0
        if ((vprpwm(0,p,alpha)-v0)<0)
            break
        end
    end
end
for fi=0:.01:90
    if ((ripple(tipo,8,alpha,p,fi)-rip)<0)
        break
    end
end
l=(tan(fi*pi/180)*r*10)/(2*pi*60);
```



```
varargout (1)={fi};  
varargout (2)={alpha};  
varargout (3)={1};  
varargout (4)={ripple (tipo,8,alpha,p,fi)};  
resp=['FI',varargout (1);'ALPHA',varargout (2);'INDUTOR',varargout (3);'RIPPLE'  
,varargout (4)];
```