

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

RENAN CELIÃO ARAÚJO



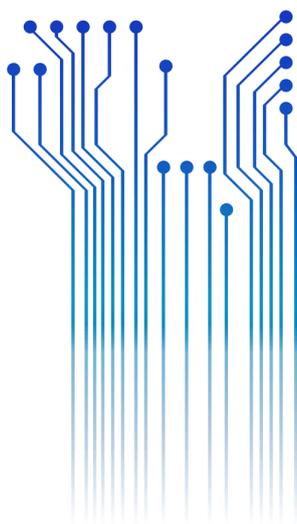
Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS ALUNOS DA  
DISCIPLINA LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE  
POTÊNCIA UTILIZANDO MÓDULOS TESTES DOS  
CONVERSORES CA/CC E CC/CC.**



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2017



RENAN CELIÃO ARAÚJO

**PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS ALUNOS DA  
DISCIPLINA LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO MÓDULOS TESTES DOS CONVERSORES CA/CC E  
CC/CC.**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Cunha Oliveira.

Campina Grande  
2017

RENAN CELÍAO ARAÚJO

**PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS ALUNOS DA  
DISCIPLINA LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO MÓDULOS TESTES DOS CONVERSORES CA/CC E  
CC/CC.**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Alexandre Cunha Oliveira**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou em mim e sempre esteve ao meu lado.

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço ao Senhor Deus por estar presente em minha vida e me proporcionar o discernimento necessário para agir de maneira justa e honesta nas atividades que desenvolvo.

Agradeço também à minha mãe, Vânia Celião Araújo, por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, e por sempre está ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje. Em especial aos meus colegas da graduação Julio G. Galdino, Marlius Aguiar, João Rubens e aos meus amigos de faculdade que sempre me ajudaram e apoiaram.

*“Eu poderia viver recluso numa casca de noz e me considerar rei do espaço infinito...”*  
Willian Shakespeare.

## RESUMO

O trabalho de conclusão de curso em questão apresenta uma breve abordagem da revisão bibliográfica dos conversores monofásicos, vistos na disciplina Eletrônica de Potência: retificadores CA/CC (meia ponte e ponte completa), conversores não isolados CC/CC (Buck, Boost e Buck-Boost), dando uma abordagem especial nos temas que serão cobrados nos guias propostos e uma descrição dos materiais utilizados na bancada de teste.

A realização de diversos experimentos com os conversores CA/CC, nas suas diversas topologias e a realização dos experimentos para os conversores CC/CC. Confecção dos guias para a disciplina Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP), para as diversas topologias dos conversores onde os mesmos constam com os resultados experimentais e uma análise detalhada do procedimento experimental e dos resultados experimentais, pois os guias serviram de modelo para os alunos da disciplina.

**Palavras-chave:** Conversores e Eletrônica de Potência.

# ABSTRACT

The work of conclusion of the course in question presents a brief approach to the bibliographic review of the single-phase converters, seen in the Electronic Power discipline: AC / DC rectifiers (half bridge and full bridge), non-isolated DC / DC converters (Buck, Boost and Buck -Boost), giving a special focus on the themes that will be charged in the proposed guides and a description of the materials used in the test bench.

The realization of several experiments with the AC / DC converters, in their various topologies and the realization of the experiments for the DC / DC converters. Preparation of the guides for the discipline Power Electronics Laboratory (LEP), for the various topologies of the converters where they are presented with the experimental results and a detailed analysis of the experimental procedure and the experimental results, since the guides served as a model for the students Of discipline.

**Keywords:** Converters and Power Electronics.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Retificador de meia onda.....	15
Figura 2 – Retificador de meia onda carga resistiva.....	16
Figura 3- Retificador de meia onda .....	17
Figura 4-Formas de onda de ( $V_L$ e $I_L$ ) e dos sinais de gatilho respectivamente.....	17
Figura 5-Retificador de onda completa.....	20
Figura 6 – Forma de onda da tensão e da corrente na carga.....	22
Figura 7 – Forma de onda de corrente e tensão na carga. ....	22
Figura 8 – Topologia do conversor Buck.....	28
Figura 9 – Forma de onda chave IGBT.....	29
Figura 10- Forma de onda da tensão no indutor, $V_L$ . ....	29
Figura 11–Forma de onda de corrente ( $i_L$ ) na chave IGBT .....	31
Figura 12 – Forma de onda da tensão ( $V_L$ ) na carga.....	31
Figura 13 – Forma de onda de corrente ( $i_C$ ) no capacitor.....	33
Figura 14 – Topologia do conversor Boost. ....	34
Figura 15 – Forma de onda da Tensão ( $v_L$ ) no indutor.....	35
Figura 16 – Conversor Buck-Boost .....	37
Figura 17 – Forma de onda tensão no indutor .....	38
Figura 18 – Tensão na carga do conversor.....	39
Figura 19 – Forma de onda da tensão no capacitor.....	40
Figura 20- Modulo teste dos retificadores.....	42
Figura 21 – Indutor, com indutância variável de acordo com o terminal conectado.....	42
Figura 22 – Modulo teste para os conversores CC/CC .....	43
Figura 23 – Indutores com núcleo de ferrite. ....	43
Figura 24 – Drive de circuito de comando.....	44
Figura 25 – Transformador abaixador 220V/36+36V 6A.....	45
Figura 26 – Transformador abaixador 220V/24+24V 6A.....	46
Figura 27 - Retificador de meia ponte carga RL .....	48
Figura 28 – Esboço da forma de onda da tensão .....	48
Figura 29 – Ângulo de disparo ( $\Delta X = 4.20ms = \alpha$ ) dado em milissegundos. ....	49
Figura 30 – Retificador de meia ponte carga RL.....	50
Figura 31–Ângulo de extinção ( $\Delta X = 9.36ms = \beta$ ). ....	51
Figura 32 – Uso da função acompanha do osciloscópio (ângulo de extinção) .....	51
Figura 33 – Retificador de meia onda com carga RL e diodo de roda livre. ....	53
Figura 34–Desenhe a curva da tensão na carga RL, retificador controlado meia ponte diodo de roda livre. ....	54
Figura 35 – Retificador com transformador de tap. Central de onda completa com carga resistiva .....	55
Figura 36 – Desenhe a forma de onda da tensão na carga R, Retificador onda completa. ....	55
Figura 37–Retificador de onda completa com transformador de derivação central com carga RL .....	56
Figura 38 – Retificador com transformador de derivação central de carga RL e diodo de roda livre. ....	58
Figura 39 – Desenhe a forma de onda da tensão na carga RL, Retificador onda completa.....	58
Figura 40 – Retificador de onda completa .....	59
Figura 41 – Esquemático para o retificador ponte-H, com diodo de roda livre ( <i>Resposta</i> ).....	61
Figura 42 – Conversor Buck. ....	62
Figura 43 – Tensão média carga x Duty-cycle .....	63
Figura 44 – Tensão Média na Carga X Duty-Cycle.....	64
Figura 45 – Topologia Buck-Boost .....	67
Figura 46 – Corrente no IGBT. ....	68

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados das medições obtidos .....	47
Tabela 2–Retificador meia ponte carga R.....	49
Tabela 3 – Retificador controlado meia ponte carga RL.( $\alpha = 90^\circ$ ).....	52
Tabela 4–Retificador controlado meia ponte .....	53
Tabela 5 - Retificador onda completa Tensão, ângulo de disparo e Tensão média.....	55
Tabela 6 – Ângulo de Disparo e extinção, tensão média e eficaz.....	57
Tabela 7 – ângulo de extinção, tensão média e eficaz, corrente média, potência média. ....	60
Tabela 8 – variação do duty-cycle versus tensão.....	62
Tabela 9 – Variação da frequência versus tensão .....	62
Tabela 10 – Duty-cycle versus Tensão, BUCK.....	63
Tabela 11 - Duty-cycle versus Tensão, BUCK com L = 1.47mH .....	64
Tabela 12 – Variação da frequência de chaveamento D = 50%. ....	65
Tabela 13 – Duty-cycle versus Tensão, BUCK-BOOST .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amperes
AC	Corrente alternada
CC/CA	Corrente Continuar para Corrente Alternada
CC/CC	Corrente Continua para Corrente Continuar
CC	Corrente continuar
D	Relação cíclica
HI	Hight Input
Hz	Frequência ciclo por segundos
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
I <sub>b</sub>	Corrente de base
K	Quilo
LIN	Low input
M	Mega
ms	Milissegundos
PIC	Programmable intelligent Computer
PWM	Pulse width modulation
s	Segundos
SCR	Silicion Controlled Recteifer
V	Volts
V <sub>cc</sub>	Tensão de alimentação de 5 volts
W	Watts
V <sub>p</sub>	Tensão de Pico
V <sub>med</sub>	Tensão Média
I <sub>med</sub>	Corrente Média
V <sub>rms</sub>	Tensão eficaz
I <sub>rms</sub>	Corrente eficaz

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\Omega$	Ohm
$\mu$	Micro

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	14
1.1	Motivação.....	14
1.2	Objetivos .....	14
1.2.1	Retificadores CA/CC.....	14
1.2.2	Conversores CC/CC (Buck, Buck-Boost e Boost).....	14
2	Fundamentação teórica.....	14
2.1	Retificador Monofásico Controlado.....	14
2.2	Retificador controlado de meia-onda .....	15
2.2.1	Retificador de meia onda com carga resistiva .....	15
2.2.2	Retificador controlado de carga indutiva .....	17
2.3	Retificadores controlados monofásico de onda completa.....	20
2.3.1	Retificador de onda completa carga resistiva .....	21
2.3.2	Retificador controlado de onda completa carga indutiva .....	21
2.3.3	Modo descontínuo. ....	22
2.3.4	Modo contínuo .....	22
2.4	Desempenho do retificador.....	26
2.5	Conversores CC/CC.....	27
2.6	Modo de Operação do conversor CC/CC .....	27
2.7	Conversor Buck. ....	28
2.7.1	Modo Contínuo para o conversor Buck .....	29
2.7.2	Modo descontínuo para o conversor Buck. ....	31
2.7.3	Desempenho do conversor buck.....	32
2.8	Conversor boost.....	34
2.8.1	Condução contínua .....	35
2.8.2	Modo de operação descontínua .....	35
2.8.3	Desempenho do conversor boost .....	36
2.9	Conversor Buck-Boost .....	37
2.9.1	Condução contínua .....	37
2.9.2	Condução descontínua .....	38
2.9.3	Desempenho do conversor buck-boost .....	39
3	Materiais e métodos .....	41
3.1	Módulos de potência dos conversores.....	41
3.1.1	Modulo dos retificadores.....	41
3.2	Circuitos de comando (drivers para acionamento das chaves) .....	44
3.3	Osciloscópio digital .....	44
3.4	Transformador abaixador .....	45
3.4.1	Transformador abaixador para o módulo teste dos retificadores .....	45

3.4.2	Transformador abaixador para o módulo teste dos conversores CC-CC.....	46
4	Execução dos experimentos e análise dos resultados obtidos .....	47
4.1	Experimento retificador controlado de meia ponte .....	48
4.1.1	Carga Resistiva.....	48
4.1.2	Carga rl. ....	50
4.1.3	Retificador de meia onda carga (RL) com diodo de roda livre.....	53
4.2	Experimento retificador de onda completa.....	54
4.2.1	Com o transformador de derivação central e carga resistiva .....	54
4.2.2	Com transformador de derivação central e carga (RL) .....	56
4.2.3	Com transformador de derivação central e carga (RL) com diodo de roda livre .....	58
4.2.4	Retificador de onda completa com ponte-H.....	59
4.2.5	Retificador de onda completa com ponte-H, semi-controlados .....	60
4.3	Experimento conversores CC/CC.....	61
4.3.1	Conversor Buck.....	62
5	Problemas enfrentados .....	66
5.1	Buck-boost .....	66
6	Conclusão.....	69
	Bibliografia .....	70
	Anexo .....	71

# 1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho serão propostos experimentos práticos dos conversores monofásicos, retificadores em diversas topologias e os conversores CC/CC não isolados nas topologias; abaixador, elevador e abaixador-elevador, para o laboratório de Eletrônica de Potência.

A elaboração de um modelo de guia para os alunos da disciplina, da maneira mais didática possível, sendo exposta a melhor maneira de se utilizar as “ferramentas”; instrumentos de medição, a IHM dos drivers de acionamento das “chaves” e os módulos testes dos conversores da melhor maneira, obtendo os resultados de maneira satisfatória e após isso ser feito uma análise dos resultados obtidos.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Com a implantação dos módulos testes dos conversores monofásicos no laboratório de Eletrônica de Potência, o aluno poderá contar com mais essa ferramenta para auxiliar seu aprendizado, ferramenta essa de grande importância, pois o aluno terá contato direto com as topologias dos conversores, e com os instrumentos de medição. O aluno poderá montar o conversor de acordo com a topologia sugerida e observar os resultados experimentais a medida que alteram seus parâmetros, esse contato direto do aluno com a bancada de teste, tornara o aprendizado mais intuitivo.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo o desenvolvimento e a elaboração dos guias experimentais dos conversores CA/CC e CC/CC. As tarefas realizadas foram divididas nas seguintes etapas:

### 1.2.1 RETIFICADORES CA/CC

- Bancada de testes;
- Execução dos experimentos;
- Confecção dos guias;
- Análise dos resultados obtidos.

### 1.2.2 CONVERSORES CC/CC (BUCK, BUCK-BOOST E BOOST)

- Bancada de testes;
- Execução dos experimentos;
- Confecção dos guias;
- Análise dos resultados obtidos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

A finalidade de um circuito eletrônico de potência é a de corresponder às condições da tensão e da corrente da carga em função da fonte de alimentação. Circuitos de eletrônica de potência convertem um tipo ou nível de uma forma de onda de tensão ou corrente em outra e por essa razão são chamados de conversores, os quais funcionam como uma interface entre a fonte e a carga. (Hart, 2012)

No decorrer deste Capítulo serão apresentadas as topologias dos conversores: retificadores (CA/CC) controlados de meia onda e onda completa, conversores (CC/CC) na topologia Buck, Boost e Buck-Boost. Assim como suas aplicações, o funcionamento dos mesmos, a fundamentação teórica necessária para o entendimento das atividades propostas nos experimentos.

### 2.1 RETIFICADOR MONOFÁSICO CONTROLADO

São conversores (CA/CC), circuitos que convertem um sinal tensão ou corrente alternada (CA) em um sinal contínuo (CC), onde a saída é controlada, pelo sinal de controle dos SCR's. "Ao contrário do que ocorre com um diodo, um SCR não conduzirá automaticamente quando a tensão ânodo-cátodo ficar positiva, um pulso devera ser aplicado à porta." (Ashfaq-Ahmed, ano 2000, p.182).

Como foi exposto por Ashfaq-Ahmed os SCR's só entram em condução se for aplicada uma corrente no terminal do "gate" (suficiente para dispará-lo) e o mesmo estiver diretamente polarizado. E entram em bloqueio quando estiverem reversamente polarizado e não passar mais corrente pelo mesmo. Com isso pode-se ajustar o valor da potência transferida à carga. Os retificadores controlados podem ser classificados em dois grupos, os completamente controlados que utilizam apenas SCR como elementos de retificação e os semi-controlados que utilizam SCR e diodos na sua configuração.

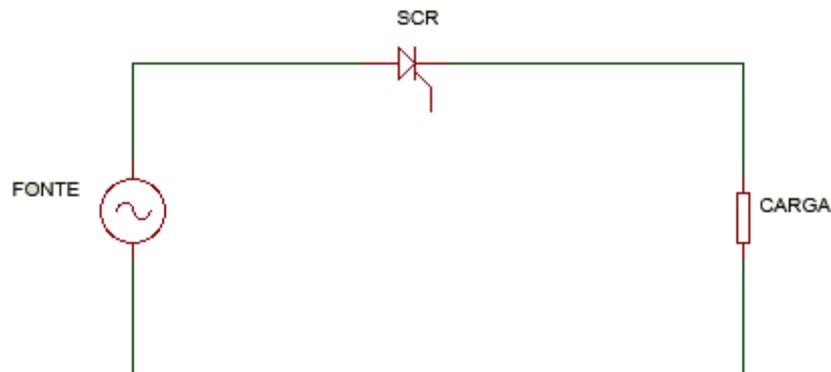
Eles são muito utilizados nas indústrias e em aplicações que necessitam de acionamentos de velocidade variável. São várias as aplicações, pois muitas são as cargas que necessitam de uma alimentação contínua. Um exemplo do uso dos retificadores se

dá no processo de transmissão de energia elétrica, onde estações retificadoras, fazendo a conexão entre a rede de transmissão alternada e a transmissão contínua ou como intermediária em redes que utilizam frequências diferentes.

## 2.2 RETIFICADOR CONTROLADO DE MEIA-ONDA

É uma configuração mais simples do conversor CA/CC, onde se retifica apenas meio ciclo do sinal senoidal, Figura 1. Não é muito utilizado devido às altas variações no sinal de saída, porém é de fundamental importância o estudo do mesmo, pois ajudará a compreender o funcionamento do retificador em ponte completa.

Figura 1 Retificador de meia onda

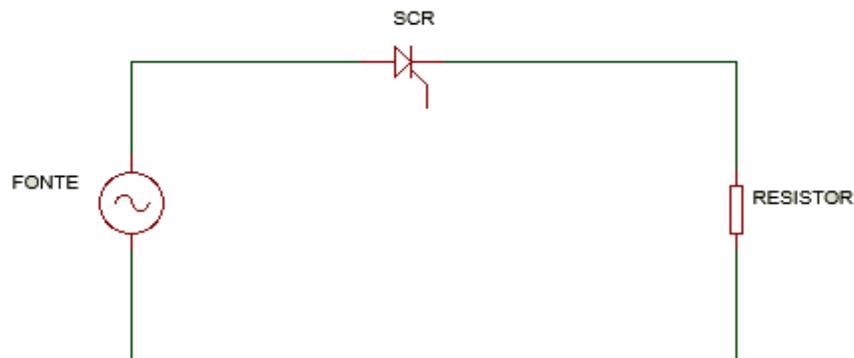


Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

### 2.2.1 RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RESISTIVA

É a configuração mais simples do retificador monofásico controlado, Figura 2, porém seu estudo é importante, pois é a base para a análise das configurações mais complexas do retificador monofásico controlado.

Figura 2 – Retificador de meia onda carga resistiva



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Durante o semi-ciclo positivo da fonte de alimentação o SCR estará diretamente polarizado e, no momento em que for aplicado a corrente de gatilho no mesmo ( $\omega t = \alpha$ ), onde  $\alpha$  é o ângulo de disparo do tiristor, entrará em condução, fazendo com que a carga seja alimentada por uma tensão média de período  $2\pi$ , equação(1) que por definição.

$$V_{med} = \frac{1}{\omega T} \times \int_{\omega_i}^{\omega_f} v(\omega t) d\omega t \quad (1)$$

Onde T é o período da forma de onda da tensão,  $\omega_i$  e  $\omega_f$  são os pontos onde se inicia a condução do e o bloqueio do SCR, respectivamente e  $v(\omega t)$  é a tensão da fonte de alimentação, substituindo os valores temos,

$$V_{med} = \frac{1}{2\pi} \times \int_{\alpha}^{\pi} V_p \sin(\omega t) d\omega t \quad (2)$$

$$V_{med} = \frac{V_p}{2\pi} \times (1 + \cos \alpha) \quad (3)$$

E a corrente média na carga é dada pela Equação (4),

$$I_{med} = \frac{V_p}{2\pi R} \times (1 + \cos \alpha) \quad (4)$$

Os valores eficazes de tensão e corrente podem ser calculados usando as equações (3) respectivamente,

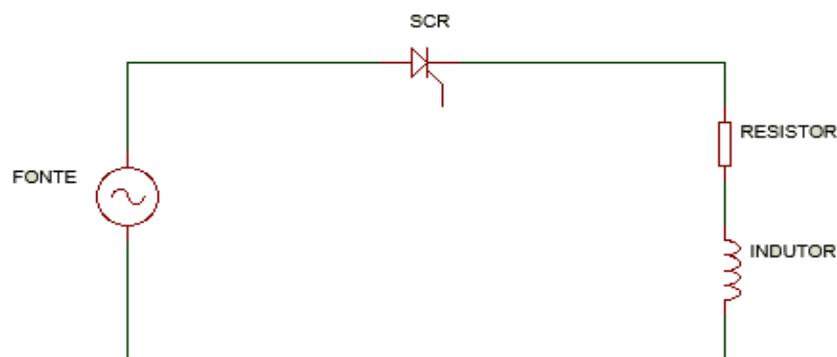
$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}} \quad (5)$$

$$I_{rms} = \frac{V_p}{R\sqrt{2}} \times \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}} \quad (6)$$

### 2.2.2 RETIFICADOR CONTROLADO DE CARGA INDUTIVA

O retificador de meia onda controlado com carga RL é ilustrado na Figura 3. “Se o SCR for acionado com ângulo de disparo igual a  $\alpha$ , a corrente na carga aumentará devagar, uma vez que a indutância forçará a corrente a se atrasar em relação á tensão” (Ashfaq-Ahmed, pag.188, ano 2000).

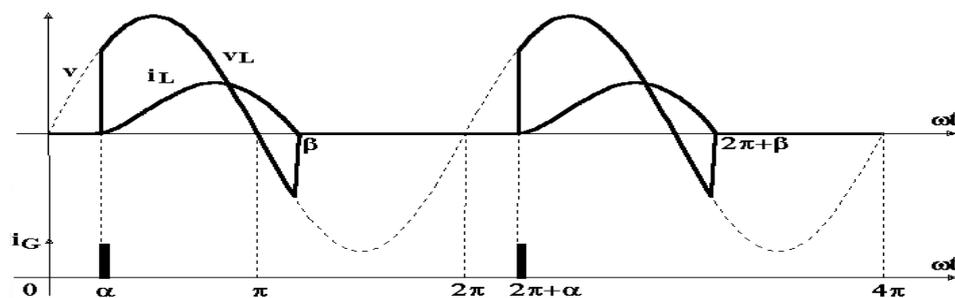
Figura 3- Retificador de meia onda



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

A análise do funcionamento do conversor permite obter as formas de onda da tensão e da corrente aplicada na carga RL, ver Figura 4.

Figura 4-Formas de onda de ( $V_L$  e  $I_L$ ) e dos sinais de gatilho respectivamente.



Fonte: Própria modificada

Como mencionado por Ashfaq-Ahmed, pode-se verificar que de fato a corrente está atrasada em relação à tensão, pois o indutor é um componente que não permite a variação instantânea de corrente. O ângulo de condução é definido por,  $\gamma = \beta - \alpha$ , representa o período que o SCR esta em condução. Diferentemente do que acontece no retificador com carga puramente resistiva.

Quando o SCR estiver inversamente polarizado, o indutor ainda terá energia armazenada na forma de campo magnético e manterá uma corrente direta através da carga, forçando o SCR a conduzir até o ponto em que a energia no indutor chegue ao valor zero, ponto esse conhecido como ângulo de extinção ( $\beta$ ). Porém a tensão na carga é negativa, como-se observou na ver Figura 4.

Figura 4 Uma consequência desse fato é que a tensão média na carga se torna menor do que para uma carga puramente resistiva. As tensões médias e eficazes (RMS) da carga são dadas pelas equações a seguir respectivamente.

$$V_{med} = \frac{1}{2\pi} \times \int_{\alpha}^{\beta} V_p \times \sin(\omega t) d\omega t \quad (7)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times \int_{\alpha}^{\beta} (V_p \times \sin(\omega t))^2 d\omega t} \quad (8)$$

$$V_{rms} = \frac{V_p}{2} \times \sqrt{\frac{\beta - \alpha + \cos(\alpha) \times \sin(\alpha) - \cos(\beta) \times \sin(\beta)}{\pi}} \quad (9)$$

Para o cálculo da corrente na carga (RL), utiliza-se os procedimentos, usado por Daniel W. Hart em seu livro (Eletrônica de Potência análise e projetos de circuitos) logo: aplicando a lei de kirchhoff na malha do circuito quando o tiristor esta em condução é obtido a equação(10).

$$V_p \times \sin(\omega t) = R \times I(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (10)$$

Resolvendo a equação (10), e considerando o indutor inicialmente descarregado, ou seja,  $I(\alpha) = 0$  e utilizando transformada de laplace, obtém-se :

$$I_{(\omega t)} = \frac{V_p}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \times \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \times e^{\frac{(\alpha - \omega t)}{\omega \times \tau}} \right], \text{ para } \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (11)$$

$$I_{(\omega t)} = 0, \text{ para outro valor diferente de } \alpha \leq \omega t \leq \beta.$$

Onde,  $X_L$  é a reatância indutiva da carga,  $\theta$  é o ângulo de fase, formado entre a componente real e imaginária da carga RL,  $\tau$  é a constante de tempo do circuito,  $V_p$  é a tensão de pico da fonte de alimentação do retificador e  $\beta$  é definido como sendo o ângulo de extinção, que corresponde ao ponto no qual o tiristor deixa de conduzir,

$$V_p = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

$$X_L = \omega \times L \quad (13)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (14)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} \quad (15)$$

Quando  $\omega t = \beta$ , substituindo na equação (11) a corrente na carga pode ser calculada pela equação (16),

$$I_{(\beta)} = \frac{V_p}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \times \left[ \sin(\beta - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \times e^{\frac{(\alpha - \beta)}{\omega \times \tau}} \right] \quad (16)$$

Calculando a corrente eficaz (RMS), substituindo na equação (11) temos a equação (17),

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times \int_{\alpha}^{\beta} I_{(\omega t)}^2 dt} \quad (17)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times \int_{\alpha}^{\beta} \left\{ \frac{V_p}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \times \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \times e^{\frac{-R}{\omega \times L}(\omega t - \alpha)} \right] \right\}^2 d\omega t} \quad (18)$$

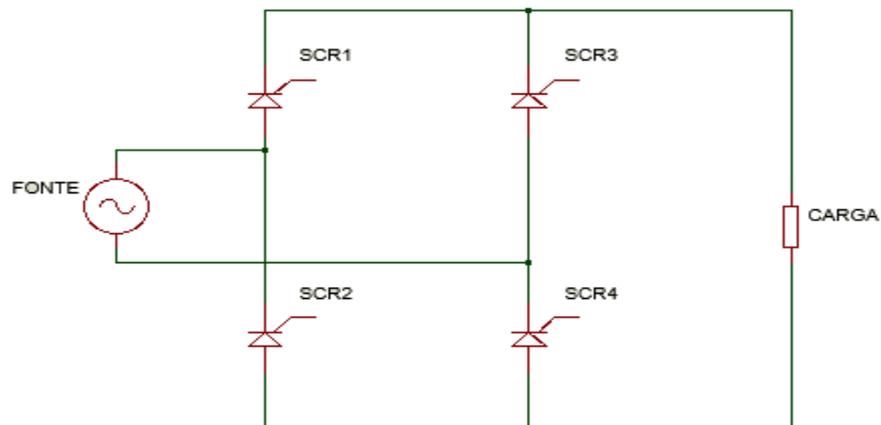
## 2.3 RETIFICADORES CONTROLADOS MONOFÁSICO DE ONDA

### COMPLETA

“O objetivo de um retificador de onda completa é produzir uma tensão ou corrente que seja puramente CC ou que tenha alguma componente CC específica.”(HART, ano 2012 , p. 111).

É a topologia mais utilizada dentre os retificadores, devido a sua alta confiabilidade e eficiência, pois é verificada baixa ondulação na sua saída e aumento na tensão em cima da carga comparado ao retificador em meia onda. Eles podem ser encontrados na topologia retificadora de onda completa com derivação central e retificador de onda completa com ponte-H, Figura 5.

Figura 5-Retificador de onda completa



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Utiliza-se tiristores que acionados com pulsos de corrente no terminal do “gate”, permitem o controle da tensão aplicada a carga do conversor, diferente dos retificadores de meia onda, onde só operavam no semi-ciclo positivo, tem-se agora dois sinais de controle para os SCR, um defasado 180° do outro, tornando assim possível o controle dos dois semi-ciclo. De acordo com o número de fases alternadas, que estão ligados na

sua entrada, estes são classificados em (monofásicos, trifásicos, hexafásico e etc...). Quanto a quantidade de tiristores utilizados em sua configuração, estes podem ser totalmente controlados ou semi-controlados.

### 2.3.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA CARGA RESISTIVA

Para um retificador de onda completa com carga puramente resistiva, o comportamento é bem semelhante ao comportamento do retificador de meia onda com carga resistiva, mudando apenas o período do sinal da tensão na carga onde este é  $T = \pi$ . Aplicando nas expressões para calcular o valor médio da tensão e da corrente na carga tem-se,

$$V_{med} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_p \times \sin(\omega t) d\omega t \quad (19)$$

$$V_{med} = \frac{V_p}{\pi} (\cos \alpha + 1) \quad (20)$$

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R} \quad (21)$$

Para o calculo dos valores eficazes, seguiu-se o mesmo procedimento utilizado no retificador de meia onda, onde.

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \times \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (22)$$

$$I_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}R} \times \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (23)$$

### 2.3.2 RETIFICADOR CONTROLADO DE ONDA COMPLETA CARGA INDUTIVA

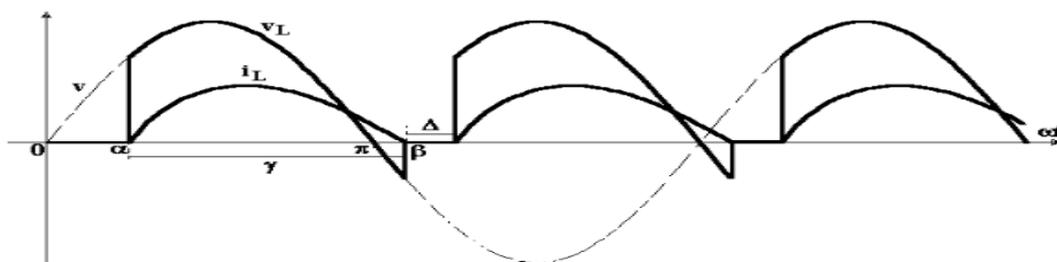
Para a carga de caráter indutivo o retificador pode operar em dois modos, dependendo do comportamento da corrente na carga, sendo estes o modo de operação

descontínuo onde a corrente assume valores zeros e o modo de operação continua onde a corrente é sempre maior que zero.

### 2.3.3 MODO DESCONTÍNUO.

A corrente na carga assume valor zero, para valores em que o SCR está em estado de bloqueio, seu modo de funcionamento é bem semelhante ao retificador de meia onda controlado com carga RL, porém como já foi mencionado no retificador controlado de onda completa com carga resistiva o período do sinal de saída é  $\pi$  em vez de  $2\pi$  rad. As formas de onda da corrente e da tensão na carga para o modo descontínuo são ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Forma de onda da tensão e da corrente na carga.



Fonte: Própria modificada

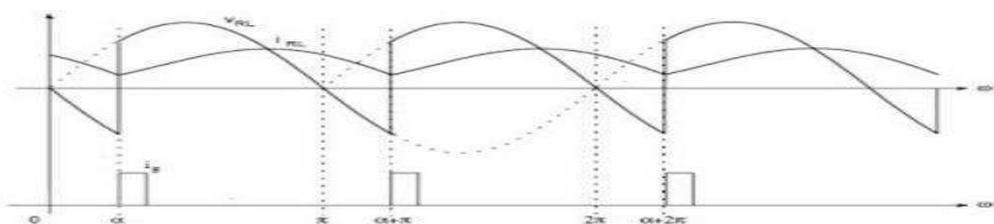
Observou-se no gráfico da corrente na carga, que o retificador funciona no modo descontínuo quando o ângulo de extinção é  $\beta < (\alpha + \pi)$ .

### 2.3.4 MODO CONTÍNUO

A corrente na carga não assume valor zero, para o ponto  $\omega t = \alpha + \pi$ , tem-se  $I_{(\alpha+\pi)} > 0$ , como pode ser observado no gráfico da corrente na carga na,

Figura 7.

Figura 7 – Forma de onda de corrente e tensão na carga.



Fonte Própria modificada

No limiar entre os modos contínuos e descontínuos da corrente na carga do retificador ocorre quando  $\beta = (\pi + \alpha)$ , quando a corrente nesse ponto é maior que zero o conversor está no modo de operação contínua, tem-se;

$$I(\pi + \alpha) > 0 \quad (24)$$

$$\sin(\pi + \alpha - \theta) - \sin(\pi + \alpha - \theta) \times e^{\frac{-(\pi + \alpha - \alpha)}{\omega\tau}} > 0 \quad (25)$$

Fazendo as devidas considerações e simplificações respectivamente,

$$\sin(\pi + \alpha - \theta) = \sin(\theta - \alpha) \quad (26)$$

$$\sin(\theta - \alpha) \times (1 - e^{\frac{-\pi}{\omega\tau}}) \geq 0 \quad (27)$$

Para o ângulo de disparo menor igual ao ângulo de fase  $\theta$ , tem-se,

$$\alpha \leq \tan^{-1}\left(\frac{\omega \times L}{\theta}\right). \quad (28)$$

Uma vez que,  $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega \times L}{\theta}\right)$ , logo pode-se utilizar a equação (24) para verificar o modo da operação da corrente na carga. Devido às harmônicas no sinal de saída, utiliza-se a serie de Fourier uma vez que o sinal não é uma senoide pura, mas é constante e periódico. Para calcula a tensão e corrente média e eficaz na carga RL. Aplicando a série de Fourier nas funções tensão e corrente tem-se,

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \times \cos(nt) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \times \sin(nt) \quad (29)$$

Para calcular os coeficientes da série  $a_0, a_n$  e  $b_n$  nos intervalos de condução do SCR ( $\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \pi$ ) utilizando as formulas para os cálculos dos coeficientes da série,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} f(t) dt \quad (30)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} f(t) \times \cos(nt) dt \quad (31)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} f(t) \times \sin(nt) dt \quad (32)$$

Substituindo a função  $f(t)$  pela função da tensão em cima da carga, ou seja,  $f(t) = V_p \times \sin(\omega t)$  é calculado os coeficientes da série de Fourier para a tensão na carga RL no modo contínuo,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \times \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_p \times \sin(\omega t) d\omega t = \frac{(2 \times V_p)}{\pi} \times \cos(\alpha) \quad (33)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} [V_p \times \sin(\omega t) \times \cos(n\omega t)] d\omega t \quad (34)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} [V_p \times \sin(\omega t) \times \sin(n\omega t)] d\omega t \quad (35)$$

Utilizando as identidades trigonométricas,

$$a_n = \frac{V_p}{2\pi} \left[ \left( \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} [\sin(n+1)\omega t] d\omega t + \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} [\sin(n-1)\omega t] d\omega t \right) \right] \quad (36)$$

$$a_n = \frac{2V_p}{\pi} \left[ \left( \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right) \right] \quad (37)$$

$$n = 2, 4, 6 \dots$$

$$b_n = \frac{V_p}{2\pi} \left[ \left( \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} [\cos(n+1)\omega t] d\omega t - \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} [\cos(n-1)\omega t] d\omega t \right) \right] \quad (38)$$

$$b_n = \frac{2V_p}{\pi} \left[ \left( \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \right) \right] \quad (39)$$

$$n = 2, 4, 6 \dots$$

Para os senos e cossenos na mesma frequência, pode-se utilizar uma expressão alternativa para a série de Fourier,

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \times \cos(n\omega_0 + \theta_n) \quad (40)$$

O coeficiente  $a_0$  da série de Fourier representa a parte CC do sinal e as amplitudes dos termos CA do sinal são representados pelo coeficiente  $c_n$ , usando a equação (40) para representar a tensão na carga RL tem-se,

$$v(\omega t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \times \cos(n\omega_0 + \theta_n) \quad (41)$$

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \times \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_p \times \sin(\omega t) d\omega t = \frac{(2 \times V_p)}{\pi} \times \cos(\alpha) \quad (42)$$

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (43)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (44)$$

Para obter a corrente na carga, precisa-se de maneira análoga ao realizado para a tensão, onde

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (45)$$

E,

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (46)$$

Para,

$$Z_n = R + j(n \times \omega_0 \times L) \quad (47)$$

## 2.4 DESEMPENHO DO RETIFICADOR

Os retificadores não são ideais, apresentam perdas no processo de retificação e limitações quanto ao sinal de saída, onde as ondulações não são nulas. São cargas não lineares que geram harmônicas no sistema, logo é de fundamental importância à análise detalhada das suas medidas elétricas para assim verificar se o conversor em questão está dentro dos padrões especificados pelas normas elétricas brasileiras.

É possível qualificar quantitativamente o desempenho de um conversor, calculando-se a taxa de distorção harmônica total (THD), o fator de potência dentre outros indicadores de desempenho que podem ser analisados. A distorção harmônica total é muito utilizada para quantificar harmônicos no circuito e é utilizada tanto para tensão quanto para corrente as equações (48) e (49) respectivamente.

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,RMS}^2}{V_{1,RMS}^2}} \quad (48)$$

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,RMS}^2}{I_{1,RMS}^2}} \quad (49)$$

O retificador controlado comporta-se como uma carga indutiva para a rede elétrica, apesar de alimentar uma carga em corrente contínua. Isso ocorre mesmo para cargas puramente resistivas (para ângulos de disparo maior que zero). O circuito absorve potência reativa. Observando-se as formas de onda, verificar-se essa característica, a defasagem entre o sinal da tensão e corrente é o que se chama de ângulo de fator de potencia ( $\varphi_{f.p} = \cos^{-1}(\theta_i - \theta_v)$ ), o calculo do fator de potência para uma fonte senoidal e carga não linear pode ser feito da seguinte maneira, onde o índice (n) representa a ordem da harmônica,

$$f.p = \frac{P_{(ativa)}}{S_{(aparente)}} \quad (50)$$

$$P = (V_{1,rms} \times I_{1,rms}) \times \cos(\varphi_{f.p}) \quad (51)$$

$$S = V_{1,RMS} \times I_{n,RMS} \quad (52)$$

$$F.P = \frac{(V_{1,rms} \times I_{1,rms}) \times \cos(\varphi_{f.p})}{V_{1,rms} \times I_{n,rms}} \quad (53)$$

## 2.5 CONVERSORES CC/CC

O conversor CC/CC realiza a conversão de um sinal contínuo (CC) em outro sinal CC de amplitude ajustável. Podem ser classificados como isolados (apresentam isolamento elétrica entre a entrada e a saída) e não isolados. No trabalho desenvolvido em questão serão abordadas as topologias de conversores não isolados (Buck, Boost e Buck-Boost). São formados por elementos lineares (capacitores e indutores) que estão conectados de formas diferentes para cada topologia de conversor, tornando possível a função de cada tipo de conversor. Eles são constituídos também por elementos não lineares (transistores, TBJ e IGBT's), que exercem o controle do sinal da saída através do seu chaveamento. O disparo e bloqueio da “chave” é feito de forma periódica por um sinal (PWM), onde a frequência de chaveamento  $f_s$  é fixa e varia-se o tempo de condução e bloqueio. O disparo da chave também pode ser feito por um sinal (PWM), em que a frequência de chaveamento é variável, mantendo-se fixo o tempo de condução ou o tempo de bloqueio da chave.

Em geral, conversores CC-CC são aplicados no controle de velocidade de motores CC, no processo de aquisição de energias alternativas, fontes chaveadas, carregadores de bateria, aplicações veiculares dentre outras aplicações.

## 2.6 MODO DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR CC/CC

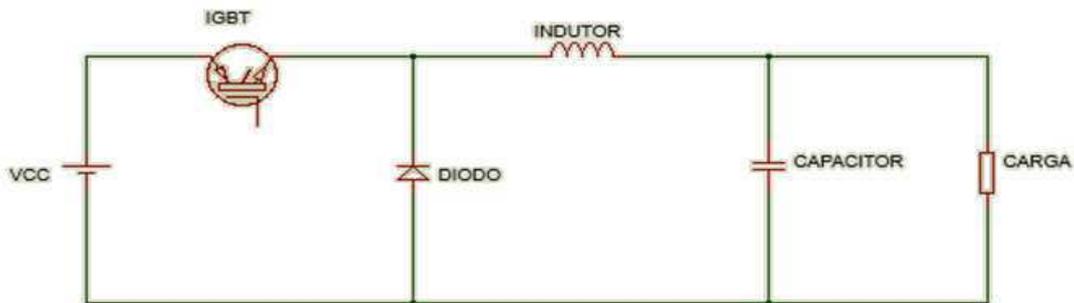
Assim como os retificadores os conversores não isolados (Buck, Boost e Buck-Boost), também operam em dois modos, modo contínuo e modo descontínuo. Uma maneira de analisar a região de operação em que o conversor está operando, é calcular a corrente mínima que passa pelo indutor. Para o modo de condução contínua a corrente

no indutor é sempre existente e positiva já no modo de operação descontinua a corrente volta para zero a cada período de chaveamento.

## 2.7 CONVERSOR BUCK.

Conhecido também como abaixador, pois a tensão da saída apresenta valor mais baixo que a tensão de alimentação. Ele é formado, por um conversor básico ligado a um filtro LC (passa baixa), que tem a função de limitar as ondulações na saída tornando o sinal o mais estável possível e um diodo para permitir que a corrente tenha um caminho para circular, após o carregamento do indutor e a abertura da chave, Figura 8.

Figura 8 – Topologia do conversor Buck



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

O seu chaveamento é feito de forma periódica seguindo uma taxa de trabalho, razão entre o período que a “chave” permanece fechada, sobre o período que a “chave” permanece fechada mais aberta, equação (54).

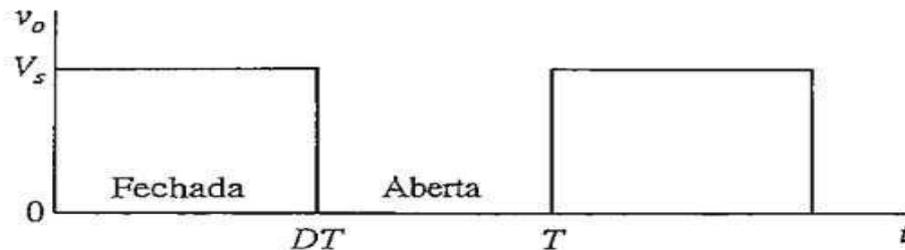
$$D = \frac{T_{ON}}{(T_{ON} + T_{OFF})} \quad (54)$$

Onde  $D$  é a taxa de trabalho (duty cycle),  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  são os períodos que “chave” permanece fechada e aberta respectivamente, tendo que o período da onda  $T = (T_{ON} + T_{OFF})$  logo a frequência de chaveamento é  $f_s = \frac{1}{T}$ . O conversor pode operar no modo contínuo ou descontinuo, dependendo do comportamento da corrente no indutor.

### 2.7.1 MODO CONTÍNUO PARA O CONVERSOR BUCK

Considerando que a chave permanece fechada por um tempo  $T_{on}$  ( $DT$ ) de um período ( $T$ ), Figura 9.

Figura 9 – Forma de onda chave IGBT.

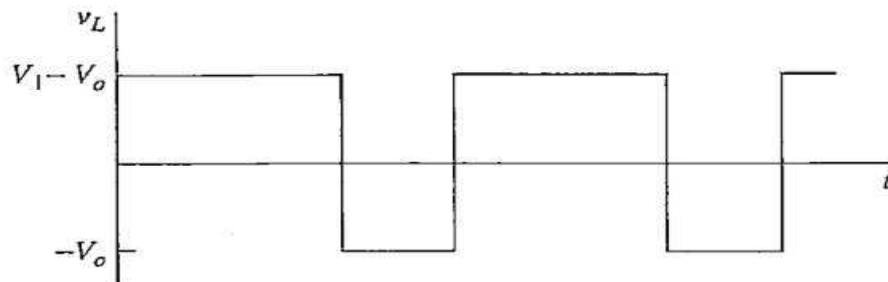


Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

Analisando o comportamento da tensão no indutor do conversor buck, para as duas situações, é possível encontrar a relação existente entre as tensões de entrada e saída do conversor. Quando a chave está em condução o diodo fica reversamente polarizado, implicando em uma nova topologia para o circuito. Aplicando a lei de LKT para o circuito em  $T_{on}$ , tem-se,  $V_L = V_I - V_O$ .

Para a chave em aberto o diodo entra em condução, fornecendo um caminho para a passagem da corrente do indutor (descarregamento do indutor), aplicando novamente a lei de LKC, tem-se,  $V_L = -V_O$ , Figura 10.

Figura 10- Forma de onda da tensão no indutor,  $V_L$ .



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

A análise da curva da Figura 10, permite determina a tensão média no indutor, uma vez que aplicado um sinal periódico em um indutor, tem-se que a tensão média é zero, comportamento esse característico do indutor logo,

$$V_{L(med.)} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT} (V_i - V_0) dt + \int_{DT}^T (-V_0) dt \right] = 0 \quad (55)$$

Resolvendo a equação (56),

$$V_0 = DV_i \quad (56)$$

Para o capacitor, uma vez aplicado uma corrente periódica no mesmo a corrente média é zero, caracterizando seu comportamento quando se aplica um sinal periódico. Logo aplicando a lei de LKC tem-se:

$$I_{L(med.)} = I_{C(med.)} + I_{R(med.)} \quad (57)$$

$$I_{L(med.)} = I_{R(med.)} = \frac{V_0}{R} \quad (58)$$

Para o calculo da corrente máxima e mínima no indutor, pode ser usada as equações desenvolvidas no Daniel W. Hart.

$$I_{L(MAX.)} = I_{R(med.)} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (59)$$

$$I_{L(MAX.)} = V_0 \times \left( \frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (60)$$

$$I_{L(MIN.)} = I_{R(med.)} - \frac{\Delta I_L}{2} \quad (61)$$

$$I_{L(MIN.)} = V_0 \times \left( \frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (62)$$

Para o conversor operar no modo de condução contínua,  $I_{L(MIN.)} \geq 0$ , logo utiliza-se a equação (55). Para verificar o modo de operação do conversor Buck e considerando a região de limiar entre os dois modos de operação ( $I_{L(MIN.)} = 0$ ), é possível calcular o valor mínimo do indutor, para que se tenha o conversor operando no

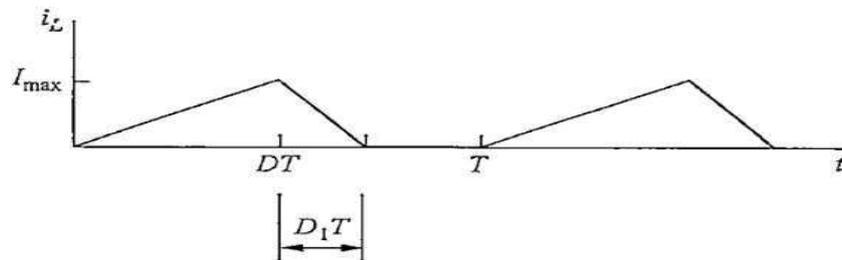
modo contínuo. Substituindo ( $I_{L(MIN.)} = 0$ ), na equação (55) obteve-se a seguinte relação.

$$L_{(min.)} = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (63)$$

### 2.7.2 MODO DESCONTÍNUO PARA O CONVERSOR BUCK.

Como já foi mencionado anteriormente, para o modo descontinuo a corrente no indutor retorna ao valor zero em cada ciclo de operação (Figura 11).

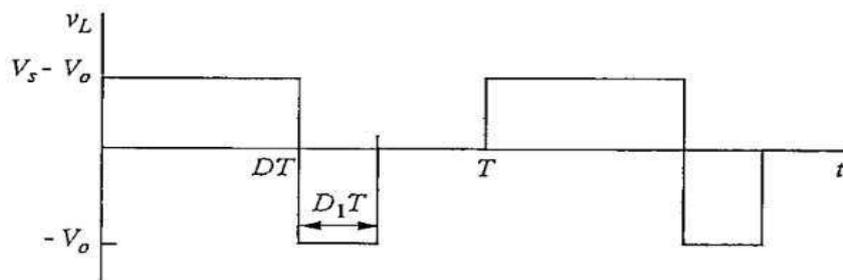
Figura 11–Forma de onda de corrente ( $i_L$ ) na chave IGBT



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

Conferindo um novo comportamento para a tensão de saída na carga (Figura 12).

Figura 12 – Forma de onda da tensão ( $V_L$ ) na carga



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

Como a tensão no indutor para uma forma de onda periódica é zero, pode-se obter a nova relação para as tensões de entrada e saída.

$$V_{L(med.)} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT} (V_I - V_o) dt + \int_{DT}^{D_1T} (-V_o) dt \right] \quad (64)$$

Resolvendo a equação (64), e substituindo  $V_{L(\text{med.})} = 0$ , chega-se a nova relação para a tensão de saída do conversor.

$$V_0 = V_s \times \left( \frac{D}{D + D_1} \right) \quad (65)$$

De maneira análoga, ao modo de condução contínua para obtenção da corrente média no indutor e analisando a Figura 10, tem-se:

$$I_{L(\text{med.})} = I_{R(\text{med.})} = \frac{V_0}{R} \quad (66)$$

$$I_{L(\text{med.})} = \frac{V_0}{R} = \frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} \times I_{MAX} \times DT + \frac{1}{2} \times I_{MAX} \times D_1 T \right) \quad (67)$$

Seguindo o procedimento proposto por Daniel W. HART em seu livro (Eletrônica de Potência análise e projeto de circuitos).

Tem-se:

$$D_1 = \frac{-D + \sqrt{D^2 + \frac{8 \times L}{R \times T}}}{2} \quad (68)$$

$$V_0 = V_s \left[ \frac{2 \times D}{D + \sqrt{D^2 + \frac{8 \times L}{R \times T}}} \right] \quad (69)$$

### 2.7.3 DESEMPENHO DO CONVERSOR BUCK.

Pode ser medido de maneira quantitativa, fazendo-se o cálculo da ondulação (ripple) da tensão de saída, ou seja, a tensão no capacitor e do rendimento do conversor. O cálculo da ondulação no sinal de saída se dá pela relação tensão corrente no capacitor do filtro L-C onde, aplicando a lei de Kirchhoff para corrente;

$$I_C = I_L + I_R \quad (70)$$

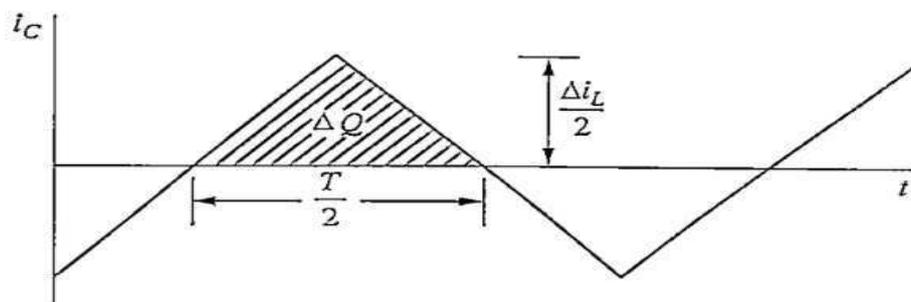
Para calcular a variação da tensão na carga, tem-se pela definição de capacitância,  $Q = (C \times V_0)$ , logo usa-se a relação,

$$\Delta Q = (C \times \Delta V_0) \quad (71)$$

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} \quad (72)$$

Analisando a forma de onda da corrente no capacitor, Figura 13, calcula-se a variação da carga  $\Delta Q$ , fazendo o cálculo da área sob a curva.

Figura 13 – Forma de onda de corrente ( $i_c$ ) no capacitor



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \times \frac{T}{2} \times \frac{\Delta I_L}{2} \quad (73)$$

$$\Delta Q = \frac{T \Delta I_L}{8} \quad (74)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_0 T (1 - D)}{L} \quad (75)$$

Substituindo a Equação (75) em (74) e depois substituindo em (75):

$$\Delta V_0 = \frac{T \times T (1 - D) V_0}{8LC} \quad (76)$$

$$\Delta V_0 = \frac{(1 - D) V_0}{(8LC) \times f^2} \quad (77)$$

Para o cálculo do rendimento ( $n_{\%}$ ) tem-se a relação entre a potência de saída sobre a potência de entrada,

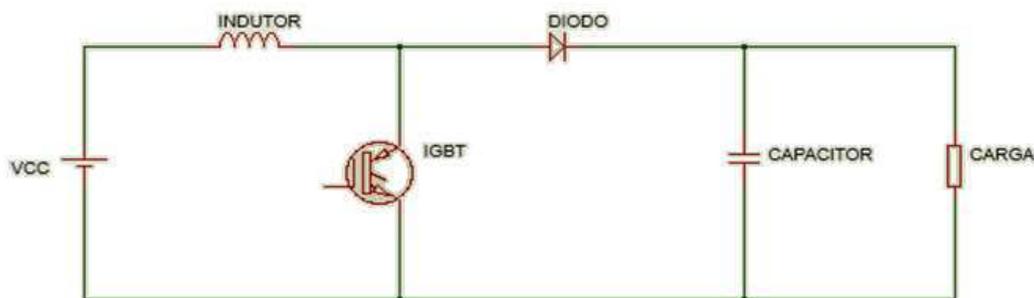
$$n_{\%} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{V_i \times I_i}{V_0 \times I_0} \quad (78)$$

## 2.8 CONVERSOR BOOST

Conhecido também como elevador de tensão, pois opera elevando a tensão média de saída para um valor maior que a tensão de entrada, sua topologia é ilustrada na,

Figura 14.

Figura 14 – Topologia do conversor Boost.



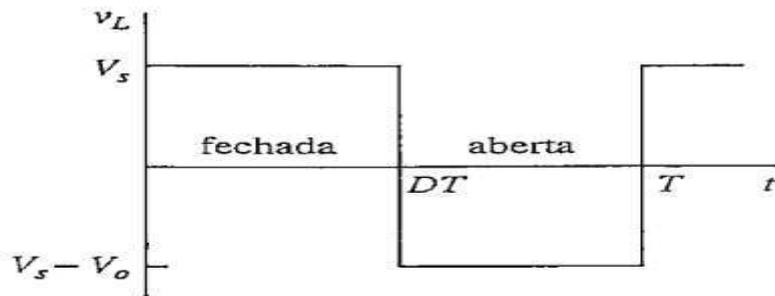
Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Pela topologia do circuito, observa-se que durante o período de condução da chave, o indutor que está em série com a fonte de entrada é carregado funcionando como uma fonte de corrente, o diodo durante esse processo fica inversamente polarizado e isola a corrente do indutor do restante do circuito, porém no momento em que a chave entra em bloqueio (corte), toda a energia armazenada no indutor e a energia da fonte é transferida para a carga fazendo com que a tensão média de saída apresente um valor mais alto na saída do que na entrada.

### 2.8.1 CONDUÇÃO CONTÍNUA

Fazendo as devidas considerações, o período de chaveamento é  $T$  e a chave está conduzindo por um período  $DT$ . Analisando quando a chave está fechada, como já foi mencionado antes o diodo fica reversamente polarizado dividindo o circuito em dois, observando a forma de onda da tensão no indutor, Figura 15.

Figura 15 – Forma de onda da Tensão ( $v_L$ ) no indutor.



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

A tensão média no indutor é,

$$V_{L(\text{med.})} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT} (V_I) dt + \int_{DT}^T (V_I - V_o) dt \right] \quad (79)$$

$$V_{L(\text{med.})} = 0,$$

Logo:

$$V_o = \frac{V_I}{(1 - D)} \quad (80)$$

### 2.8.2 MODO DE OPERAÇÃO DESCONTÍNUA

O indutor é totalmente descarregado (antes do acionamento da chave) e a corrente do mesmo se anula no ponto ( $D_1T$ ), Analisando a forma de onda da tensão na saída tem-se,

$$V_{L(\text{med.})} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT} (V_I) dt + \int_{DT}^{D_1T} (V_I - V_o) dt \right] = 0 \quad (81)$$

Resolvendo a equação (82), tem-se,

$$V_0 = V_I \left( \frac{D + D_I}{D_I} \right) \quad (82)$$

De acordo com Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos,

$$D_1 = \frac{V_0}{V_I} \times \left( \frac{2L}{RDT} \right) \quad (83)$$

$$V_0 = V_I \times \frac{1}{2} \times \left( 1 + \sqrt{\left( 1 + \frac{2D^2RT}{L} \right)} \right) \quad (84)$$

### 2.8.3 DESEMPENHO DO CONVERSOR BOOST

O cálculo da ondulação no sinal de saída, tensão pico a pico pode ser calculada analisando a formada de onda da corrente no capacitor, pois o mesmo está em paralelo com a carga da saída, como pode ser verificar na equação(85) e (86):

$$|\Delta Q| = \frac{V_0}{R} DT = C \Delta V_0 \quad (85)$$

$$\Delta V_0 = \frac{V_0 DT}{RC} = \frac{V_0 D}{RCf} \quad (86)$$

Para o valor o lavor da capacitância tem-se,

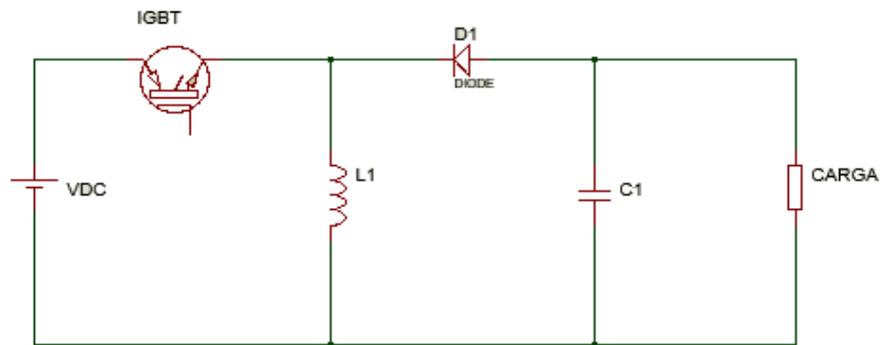
$$C = \frac{D}{R \left( \frac{\Delta V_0}{V_0} \right) f} \quad (87)$$

O cálculo do rendimento é feito de maneira análoga ao procedimento realizado para o conversor Buck.

## 2.9 CONVERSOR BUCK-BOOST

“A tensão na saída do conversor Buck-Boost pode ser maior ou menor que a tensão de entrada” (Hart, 2012). A topologia do circuito é ilustrada na Figura 16

Figura 16 – Conversor Buck-Boost



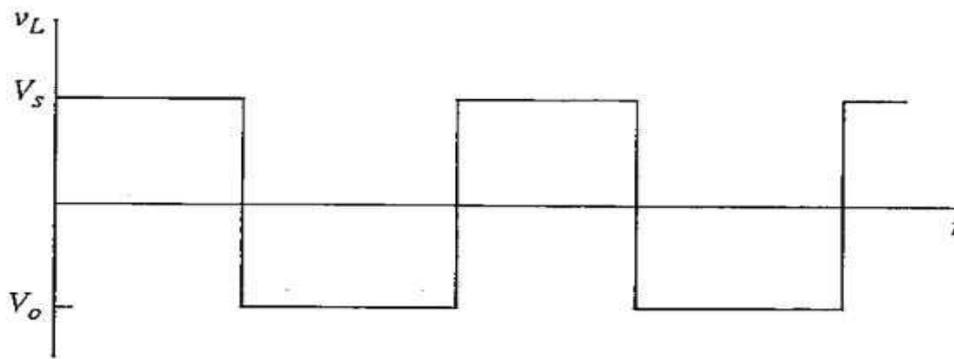
Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Como observado na configuração do circuito o conversor Buck-Boost é a combinação das características de um conversor Buck na entrada e um conversor Boost na saída. É amplamente utilizado no controle de tração de motores CC, com aplicações nos guindastes, empilhadeiras, controle de intensidade de iluminação e automóveis dentre outras aplicações no processo de energias alternativas.

### 2.9.1 CONDUÇÃO CONTINUA

Fazendo as considerações, em que o período de chaveamento é  $T$  e a chave está conduzindo por um período  $DT$ . Observando a forma de onda da tensão no indutor, como na Figura 17.

Figura 17 – Forma de onda tensão no indutor



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

Como já dito anteriormente a tensão média no indutor é zero para o funcionamento periódico, logo-se tem:

$$V_{L(\text{med.})} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT} (V_I) dt + \int_{DT}^T (-V_O) dt \right] = 0 \quad (88)$$

$$V_O = -V_I \left( \frac{D}{1-D} \right) \quad (89)$$

Seguindo ainda o procedimento proposto por Hart, tem-se

$$I_{MAX} = \frac{V_I D}{R(1-D)^2} + \frac{V_I DT}{2L} \quad (90)$$

$$I_{MIN} = \frac{V_I D}{R(1-D)^2} - \frac{V_I DT}{2L} \quad (91)$$

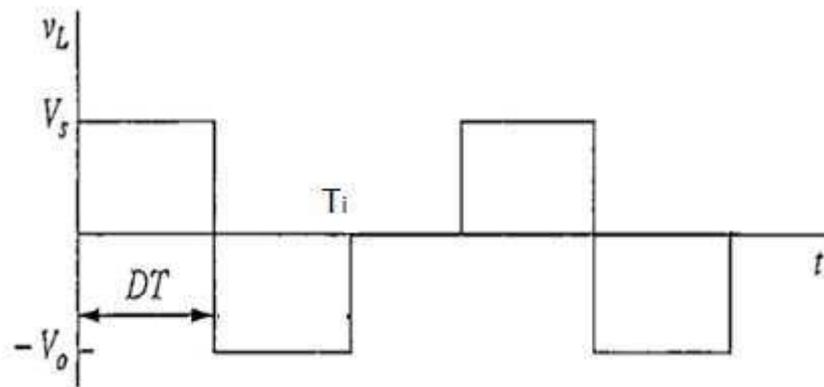
O calculo da indutância mínima para o conversor operar no modo de condução continua se da pela equação (92).

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \quad (92)$$

### 2.9.2 CONDUÇÃO DESCONTÍNUA

Observando a forma de onda da tensão na saída, para o modo descontínuo, visto na Figura 18.

Figura 18 – Tensão na carga do conversor



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

Onde a tensão na saída é a mesma aplicada aos terminais do indutor,

$$V_{L(med)} = \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_{sdt} + \frac{1}{T} \int_{DT}^{T_i} (-V_o) dt \quad (93)$$

Para determina o instante em que a corrente se anula,

$$T_i = \frac{V_o + V_i}{V_o} DT = 0 \quad (94)$$

$$I_{L(max)} = \frac{V_s}{L} DT \quad (95)$$

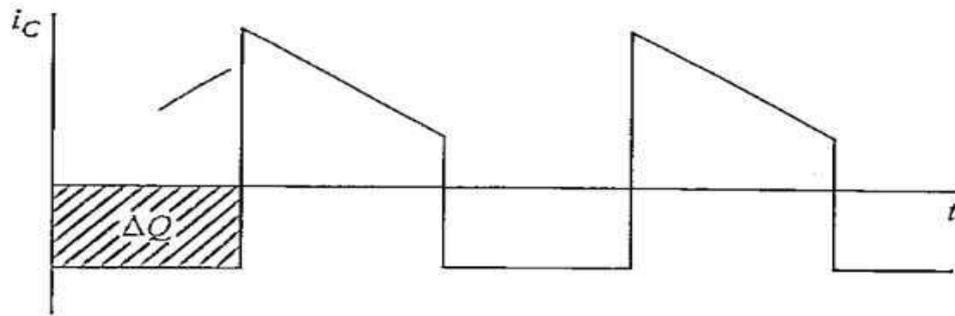
$$T_i = \frac{2(I_s + I_i)}{I_{L(max)}} T \quad (96)$$

$$V_o = V_i D \sqrt{\frac{R}{2fL}} \quad (97)$$

### 2.9.3 DESEMPENHO DO CONVERSOR BUCK-BOOST

Observando a forma de onda da tensão no capacitor é possível calcular a ondulação na tensão de saída na carga, como na Figura 19.

Figura 19 – Forma de onda da tensão no capacitor



Fonte: Hart D.W.- Eletrônica de potência - análise de projetos.

Analisando a forma de onda, tem-se:

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_0}{R}\right) DT = C \Delta V_0 \quad (98)$$

$$\Delta V_0 = \frac{V_0 DT}{RC} = \frac{V_0 D}{RCf} \quad (99)$$

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução dos experimentos foi utilizado os módulos testes de potência dos conversores; retificadores (conversor CA-CC) e conversores não isolados Buck, Boost e Buck-Boost (conversores CC-CC), os circuitos de comando e drives auxiliares desenvolvidos durante o estagio, transformadores abaixador, funcionando como fonte, a interface IHM, osciloscópio, multímetro, e cabos para fazer as conexões necessárias nas placas de potência de acordo com a topologia utilizada no experimento do conversor.

Neste capítulo será abordado de maneira resumida às características de cada componente utilizado para a execução dos experimentos assim como suas funções na realização dos mesmos.

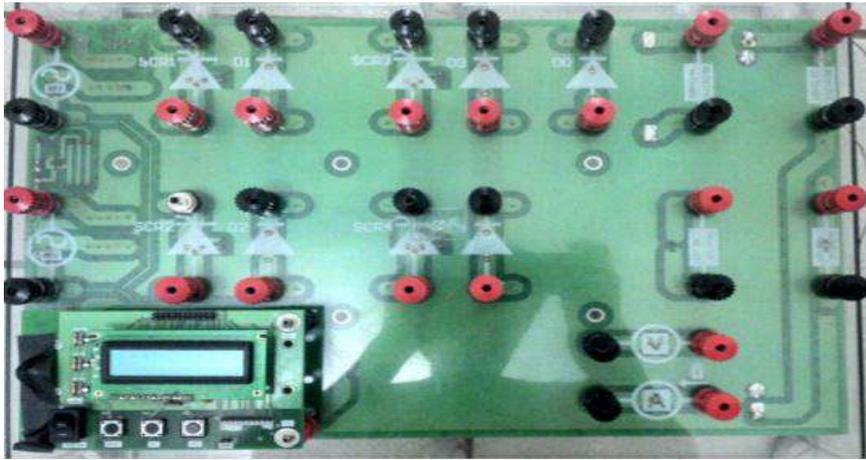
### 3.1 MÓDULOS DE POTÊNCIA DOS CONVERSORES

Como já mencionado na introdução, os módulos testes fazem parte de um projeto de modernização da disciplina laboratório de eletrônica de potência, onde os mesmos já estavam desenvolvidos.

#### 3.1.1 MÓDULO DOS RETIFICADORES.

O módulo para os experimentos dos retificadores é composto por quatro tiristores (TIC126D) e cinco diodos (IN5400), resistores de potência de 10  $\Omega$  e 50W, e 50  $\Omega$  e 200w, e os conectores para a entrada da tensão de alimentação e para a conexão da interface IHM bem como conectores para conectar os fios de acordo com a topologia do conversor a ser executado no experimento, como na Figura 20.

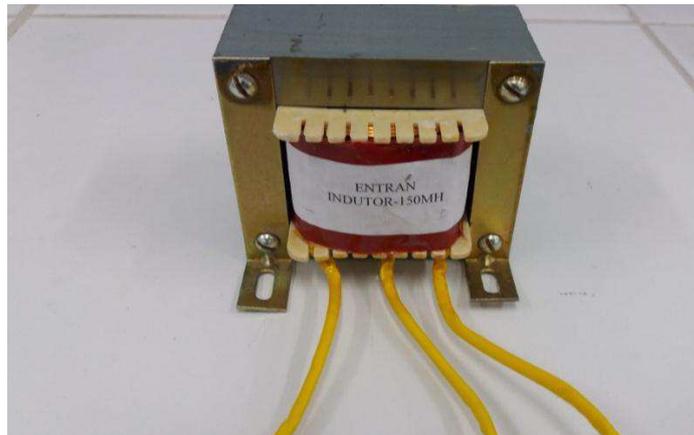
Figura 20- Modulo teste dos retificadores



Fonte: Própria do autor

Como os módulos testes estavam sem o indutor integrado a placa, foi utilizado um indutor com três terminais, onde de acordo com os terminais conectados é obtido um valor específico da indutância, Figura 21.

Figura 21 – Indutor, com indutância variável de acordo com o terminal conectado.



Fonte: Própria do autor

Com o indutor em posse foi feito as medições do valor da indutância, ajustando a frequência de medição para a mais próxima da rede elétrica (60Hz). Foi observado os seguintes valores de indutância. Do segundo para o terceiro terminal, uma indutância de 26,8mH ( $L_{2 \rightarrow 3} = 26,8mH$ ), do primeiro para o segundo, uma indutância ( $L_{1 \rightarrow 2} = 50,8mH$ ), e do primeiro para o terceiro terminal, tem-se o valor de indutância de ( $L_{1 \rightarrow 3} = 151,8mH$ ).

O modulo para os experimentos dos conversores CC-CC, é composto por dois IGBT (G4BC20UD), dois diodos (MUR420), dois capacitores ( 4,7uF e 47uF), circuito

retificador para a entrada alternada do sinal (fonte de alimentação), resistores de potência ( $10\Omega$  e  $50W$ ,  $100\Omega$  e  $250W$ ), Figura 22.

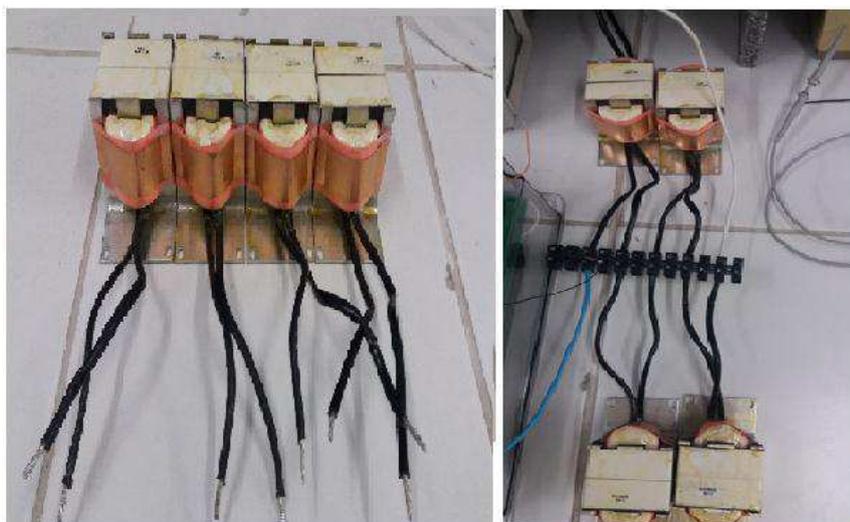
Figura 22 – Modulo teste para os conversores CC/CC



Fonte: própria do autor

Como os indutores acoplados a placa teste dos conversores CC/CC estavam defeituosos, foi utilizado quatro indutores ( $470\mu H$ ), com núcleo de ferrite, pois esses trabalham em altas frequências. Os indutores podem ser associados em série para atender as necessidades da topologia do conversor utilizado e assim conectados a placa, como pode-se ver na Figura 23.

Figura 23 – Indutores com núcleo de ferrite.

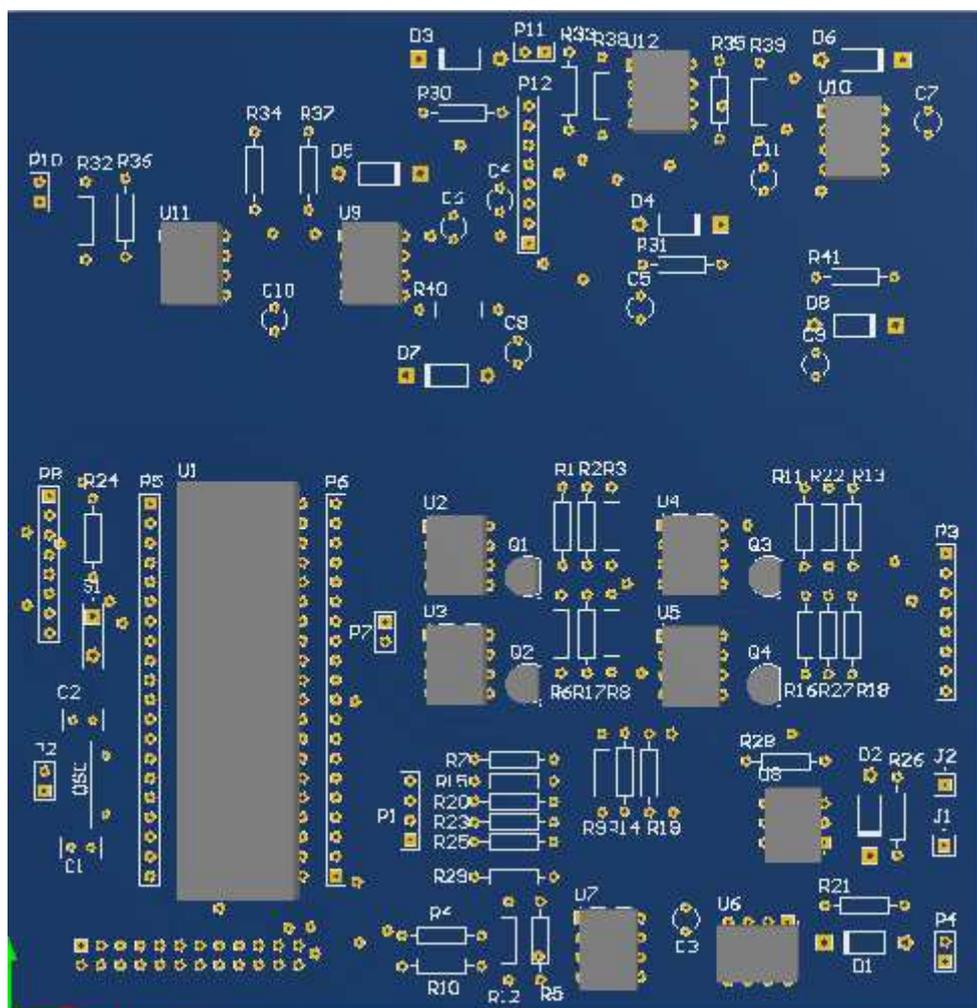


Fonte: Própria do autor

## 3.2 CIRCUITOS DE COMANDO (DRIVERS PARA ACIONAMENTO DAS CHAVES)

Os Drivers, confeccionados anteriormente, são responsáveis pela isolamento e comando dos disparos dos SCR (retificadores) e IGBT's (conversores CC-CC) como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Drive de circuito de comando



Fonte: Própria do autor

## 3.3 OSCILOSCÓPIO DIGITAL

Para análise dos experimentos realizados, foi utilizado o osciloscópio digital da marca (Agilent Technologies). O osciloscópio conta com várias funções dentre as quais

serão citadas as mais importantes para a execução dos experimentos. Na opção *menu* do *trigger* é possível ajustar na opção *fonteemlinha CA*, o que implica em referência o terra do osciloscópio (GND), ao terra da rede elétrica. As medições das tensões podem ser visualizadas no osciloscópio, usando as funções da opção *measure*, onde é possível selecionar a tensão eficaz (RMS), média (AVG), máxima (MAX), dentre outras.

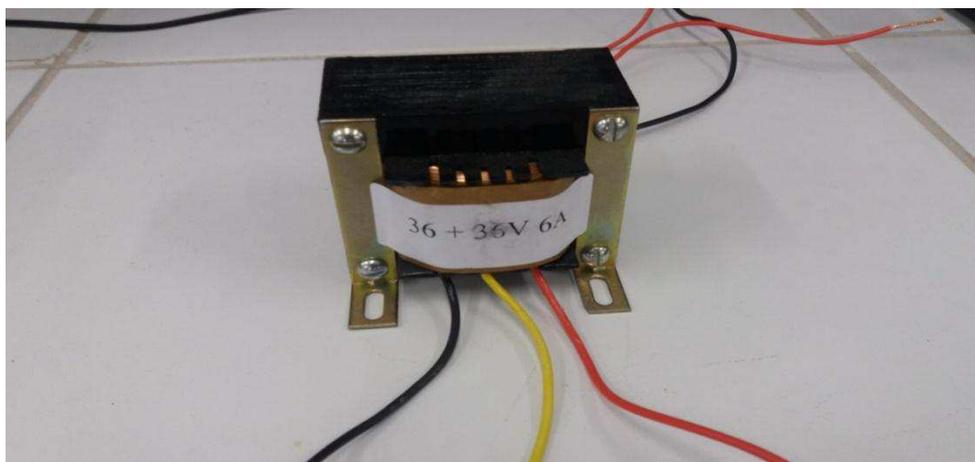
A opção *cursor* permite analisar o eixo do tempo do osciloscópio, onde é possível verificar o valor dos intervalos de tempo, que caracterizam um dado fenômeno no sinal elétrico. O período da forma de onda pode ser ajustado na opção *Push for zoom*, a amplitude dos quadrantes do canal utilizado podem ser ajustadas pela opção *Push for vernie*. Com um pendrive em mãos pode se obter o “print” da tela do osciloscópio usando a opção *print*→*primir*.

## 3.4 TRANSFORMADOR ABAIXADOR

### 3.4.1 TRANSFORMADOR ABAIXADOR PARA O MÓDULO TESTE DOS RETIFICADORES

Foi utilizado um transformador abaixador com derivação central, entrada 220V, saída 36V + 36V, corrente do secundário de 6A, como fonte de alimentação para os retificadores controlados. Na topologia meia ponte carga resistiva e indutiva e ponte completa com carga resistiva e indutiva, Figura 25.

Figura 25 – Transformador abaixador 220V/36+36V 6A



Fonte: Próprio do autor

### 3.4.2 TRANSFORMADOR ABAIXADOR PARA O MÓDULO TESTE DOS CONVERSORES CC-CC

Foi utilizado um transformador abaixador com derivação central, entrada 220V, saída 24V + 24V, corrente do secundário de 6A, como fonte de alimentação para os conversores CC-CC, na topologia Buck, Buck-Boost e Boost, Figura 26.

Figura 26 – Transformador abaixador 220V/24+24V 6A



Fonte: próprio do autor

## 4 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os guias propostos seguem um padrão de execução para obtenção dos valores experimentais, dividido nas seguintes etapas;

- Montagem do conversor de acordo com sua topologia, utilizando as conexões do módulo teste para conectar os cabos.
- Análise do funcionamento do conversor: Utilizando a IHM, ajuste do ângulo de disparo e variação do valor da indutância de acordo com os terminais conectados ao módulo teste.
- Uso do osciloscópio: Obtenção dos valores experimentais, tensão (RMS) e tensão (AVG), ângulo de disparo e ângulo de extinção.

Tabela 1 – Resultados das medições obtidos

Indutância (L)	$L_{(2 \rightarrow 3)} = 26.8mH$	$L_{(1 \rightarrow 2)} = 50.3mH$	$L_{(1 \rightarrow 3)}$ $= 150.8mH$
$(\alpha^\circ)$	$0^\circ < \alpha^\circ < 180^\circ$	$0^\circ < \alpha^\circ < 180^\circ$	$0^\circ < \alpha^\circ < 180^\circ$
Tensão Eficaz (RMS)			
Tensão Media (avg)			

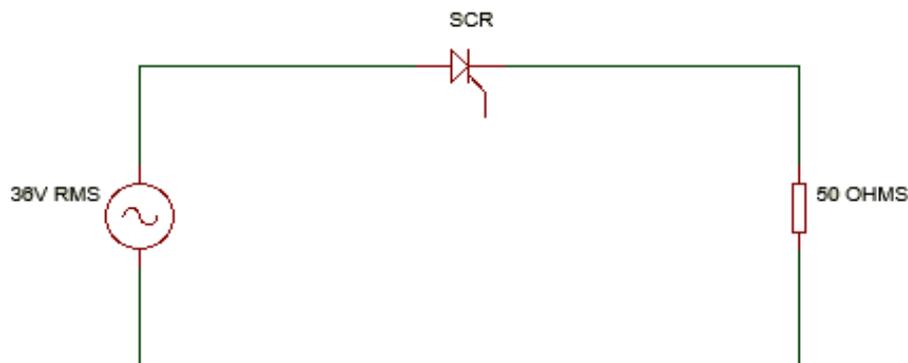
- Discussão dos resultados obtidos experimentalmente.

## 4.1 EXPERIMENTO RETIFICADOR CONTROLADO DE MEIA PONTE

### 4.1.1 CARGA RESISTIVA

Faça a montagem do retificador de meia ponte, conectando os cabos aos conectores do módulo teste do retificador Figura 27.

Figura 27 - Retificador de meia ponte carga RL

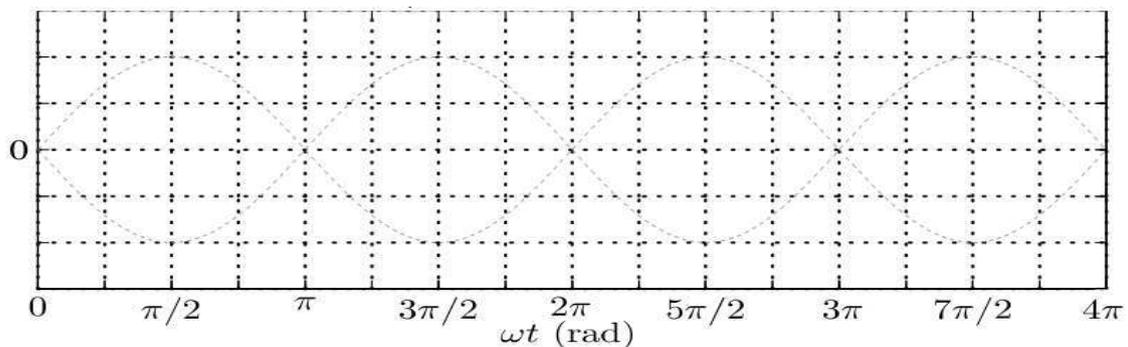


Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Com o auxílio do osciloscópio e ajustando o ângulo de disparo na IHM, observe as formas de onda da tensão na carga ( $R = 50\Omega$ ) para diferentes ângulos de disparo do SCR, conectando o canal do osciloscópio aos terminais da carga e aos terminais da fonte de alimentação é possível verificar o funcionamento do circuito.

Esboce as formas de onda da tensão da fonte de alimentação e da tensão na carga para o ângulo de disparo ( $\alpha = 30^\circ$ ), utilizando a IHM ajuste o ângulo de disparo para o valor especificado e esboce o gráfico na Figura 28.

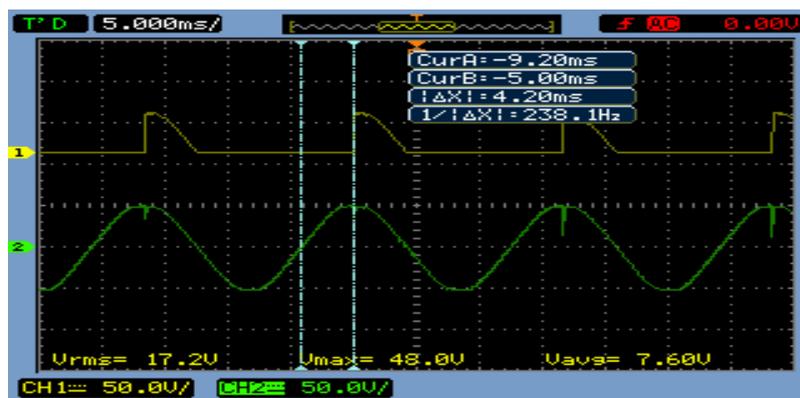
Figura 28 – Esboço da forma de onda da tensão



Fonte: Guia dos experimentos (LEP-UFCG).

Utilizando o osciloscópio, verifique o valor do ângulo de disparo ( $\alpha$ ), lembrando que  $16,66\text{ms} \rightarrow 360^\circ$ , com o auxílio das opções *cursor*  $\rightarrow$  *pushselect*  $\rightarrow$  *modo manual*, ajuste os cursores A e B com o auxílio do botão *push select*, posicionando o mesmo nos pontos onde a variação entre os dois corresponde ao ângulo de disparo dado em segundos, conforme podemos ver na Figura 29.

Figura 29 – Ângulo de disparo ( $\Delta X = 4.20\text{ms} = \alpha$ ) dado em milissegundos.



Fonte: Print do Osciloscópio

Preencha a Tabela 2, com os valores dos ângulos de disparo observado no osciloscópio e utilizando as opções *measure*  $\rightarrow$  *tensão*  $\rightarrow$  *pushtoselect*  $\rightarrow$   $V_{RMS}$  e *measure*  $\rightarrow$  *tensão*  $\rightarrow$  *push select*  $\rightarrow$   $V_{avg}$ , obtenha os valores RMS e médios para a tensão na carga.

Tabela 2–Retificador meia ponte carga R

Ângulo de disparo	Teórico ( $\alpha^\circ$ )	30°	90°	150°
	Experimental Osciloscópio ( $\alpha^\circ$ )		30,24°	90,72°
Tensão Eficaz (RMS)	Teórico ( $V_{RMS}$ )	25,0V	17,9V	4,32V
	Experimental Osciloscópio ( $V_{RMS}$ )		24,9V	17,7V
Tensão Media (avg)	Teórico ( $V_{avg}$ )	15,12V	8,1V	1,08V
	Experimental Osciloscópio ( $V_{RMS}$ )		15,2V	7,7V

Fonte: Própria do autor.

Comparando os resultados experimentais com os valores teóricos, analise o quanto os resultados experimentais se aproximam dos valores ideais.

Resposta1.: *Calcular o erro relativo, para cada parâmetro obtido experimentalmente,*

$$ER(\%) = \frac{(X_{TEÓRICO} - X_{EXPERIMENTAL}) * 100\%}{X_{TEÓRICO}}$$

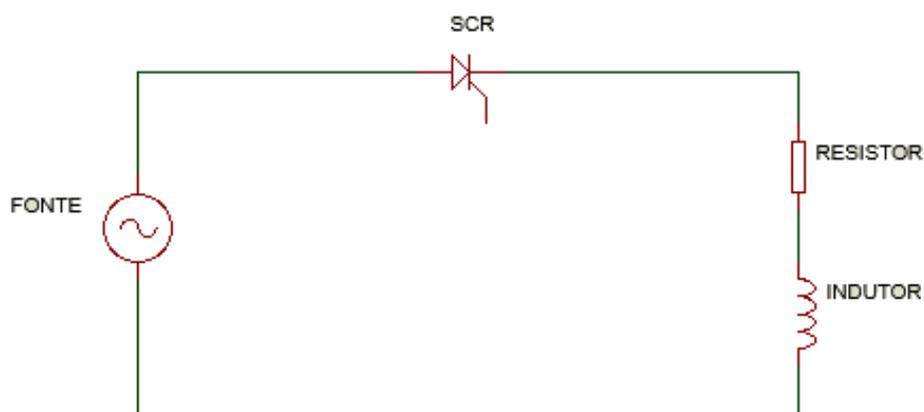
Observando os resultados, explique o que acontece quando aumentamos o valor do ângulo de disparo:

Resposta 2: *Os valores da tensão RMS e AVG na carga, diminui a medida que aumentamos o ângulo de disparo, o que era de se esperar, pois a tensão só é aplicada na carga quando os tiristores entram em condução, momento este em que é aplicado o ângulo de disparo.*

#### 4.1.2 CARGA RL.

Agora conectando o indutor, ao modulo teste do retificador, faça as devidas conexões montando o circuito mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Retificador de meia ponte carga RL

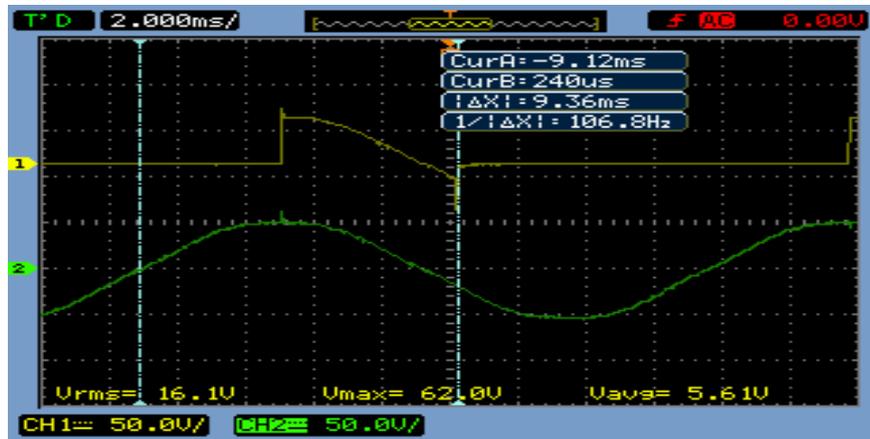


Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Para a análise do retificador controlado de meia onda com carga indutiva, prossiga da seguinte maneira, analise a forma de onda da tensão na carga RL, para diferentes valores de indutância, observando com auxílio do osciloscópio o ângulo de

extinção ( $\beta^\circ$ ) e os valores da tensão eficaz (RMS) e da tensão média (AVG) na carga RL. Lembrando que o ângulo de extinção é o ângulo em que o tiristor volta a entrar em bloqueio (corrente na carga volta a ser zero), Figura 31.

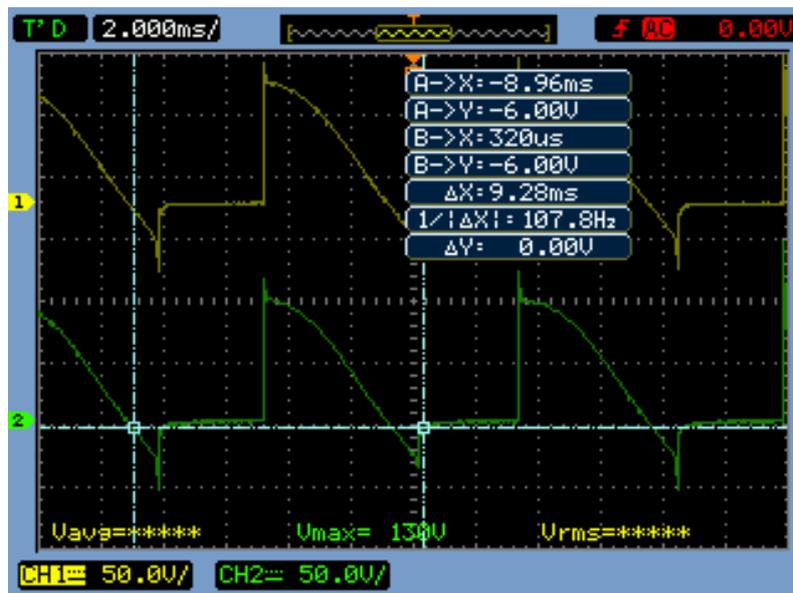
Figura 31–Ângulo de extinção ( $\Delta X = 9.36ms = \beta$ ).



Fonte: Print do Osciloscópio.

O procedimento para obtenção desses parâmetros é o mesmo utilizado no retificador de meia onda com carga resistiva, valendo salientar que para uma melhor obtenção do valor do ângulo de extinção é utilizado a função acompanha, (*cursor*→*modo*→*push to select*→*acompanha*), para uma melhor visualização da forma de onda utilize a opção *push for zoom* (aumentando o período da forma de onda), como ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Uso da função acompanha do osciloscópio (ângulo de extinção)



Fonte: Print do osciloscópio

Com os valores da tensão (RMS) e (AVG) obtidos com o osciloscópio para o ângulo de disparo de  $90^\circ$  e com os valores calculados utilizando o Ábaco de Pushlowky, preencha a Tabela 3.

Tabela 3 – Retificador controlado meia ponte carga RL. ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Indutância (L)		$L_{(2 \rightarrow 3)}$ $= 26.8mH$	$L_{(1 \rightarrow 2)}$ $= 50.3mH$	$L_{(1 \rightarrow 3)} = 150.8mH$
Ângulo de extinção ( $\beta^\circ$ )	Experimental ( $\beta^\circ$ )	195.26°	205.63°	224.64°
	Ábaco ( $\beta^\circ$ )	180°	204°	228°
Tensão Eficaz (RMS)		16,5V	17.0V	19,5V
Tensão Média (avg)		5,3V	4,9V	3,11V

Fonte: Própria do autor

Compare os valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos com auxílio do Ábaco, para verificar a veracidade do experimento.

Resposta.: *Calcular o erro relativo, para cada parâmetro obtido experimentalmente,*

$$ER(\%) = \frac{(X_{TEÓRICO} - X_{EXPERIMENTAL}) * 100\%}{X_{TEÓRICO}}$$

Após preenchido a tabela que conclusão se pode tomar, observando a variação no ângulo de extinção e nos valores da tensão média comparados aos valores observados no retificador de meia onda de carga resistiva.

Resposta: *O ângulo de extinção aumenta a medida que a carga se torna mais indutiva, como era de se esperar, pois quanto maior o valor da indutância mais energia o mesmo acumula em forma de campo magnético, levando assim mais tempo para dissipar toda essa energia e descarregar por completo.*

*Os valores médios (AVG) da tensão na carga RL são menores, pois a energia armazenada no indutor impõe uma corrente direta através da carga, implicando numa tensão negativa na mesma, tornando a tensão média na saída menor.*

Com os valores obtidos experimentalmente calcule os valores da corrente eficaz para cada valor de indutância, calcule a potência ativa e o fator de potência respectivamente, com os valores obtidos preencha a Tabela 4.

Tabela 4–Retificador controlado meia ponte

Indutância (L)	$L_{(2 \rightarrow 3)} = 26.8mH$	$L_{(1 \rightarrow 2)} = 50.3mH$	$L_{(1 \rightarrow 3)} = 151.8mH$
$I_{(AVG)}$	0.106	0.098	0.062
$P_{(AVG)}$	0.56W	0.52W	0.2W

Fonte: Própria do autor.

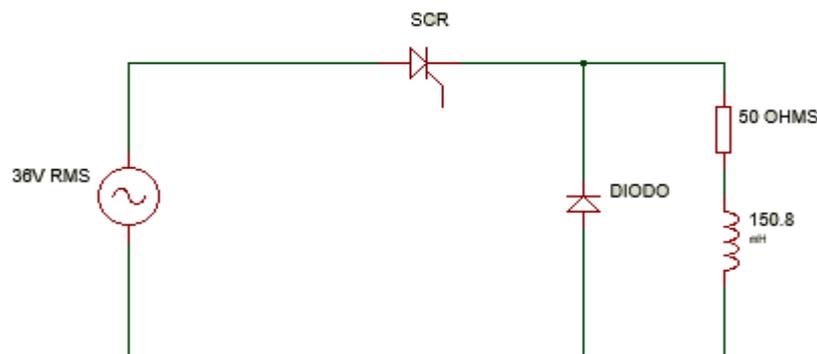
Quais são as conclusões que podem ser tiradas observando a variação na potência média para as diferentes indutâncias.

Resposta.: *A média que a carga se torna mais indutiva menor é a potencia média fornecida pelo conversor, uma vez que a tensão média também é mais baixa a medida que o valor do indutor se torna mais alto, devido as características do indutor que impõem uma tensão negativa na carga.*

#### 4.1.3 RETIFICADOR DE MEIA ONDA CARGA (RL) COM DIODO DE RODA LIVRE

Conectando um diodo em paralelo com a carga RL, com o indutor de valor  $L_{(1 \rightarrow 2)} = 50.3mH$ , monte a nova topologia do retificador Figura 33, e observe novamente as tensões na fonte e na carga, utilizando as pontas de prova do osciloscópio.

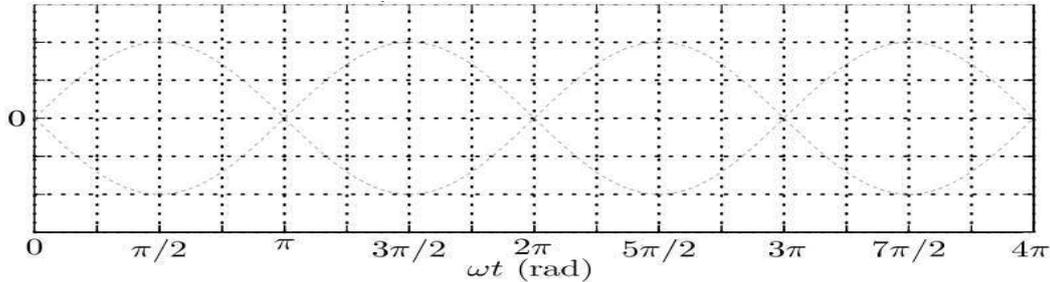
Figura 33 – Retificador de meia onda com carga RL e diodo de roda livre.



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Desenhe a forma de onda da tensão na carga para o ângulo de disparo igual a  $90^\circ$ , observado no osciloscópio, na Figura 34.

Figura 34—Desenhe a curva da tensão na carga RL, retificador controlado meia ponte diodo de roda livre.



Fonte: Guia dos experimentos (LEP-UFCG).

Analise a forma de onda da tensão na carga, comparando com a forma de onda do circuito anterior, explique esse novo comportamento da tensão na carga RL, e observando o valor experimental da tensão média, usando o procedimento explicado nos experimentos anteriores, compare os valores obtidos com os valores obtidos no experimento do retificador de meia onda com carga (RL), explique também o motivo dessa leitura diferente nos valores.

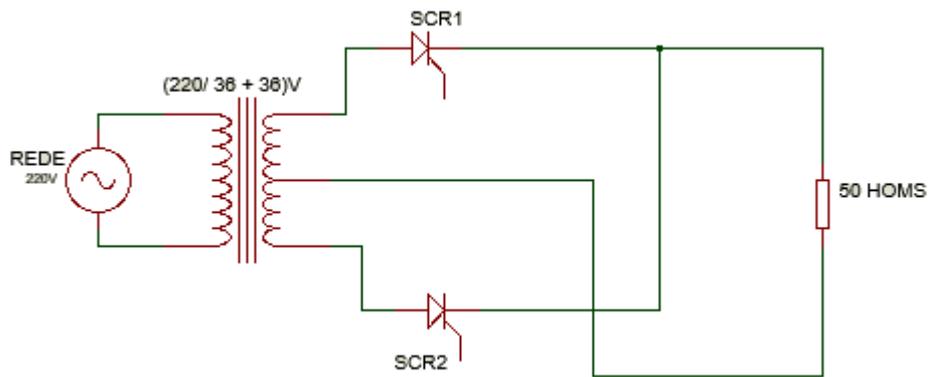
Resposta: *Após a realização do experimento, foi verificada, uma tensão sempre maior do que zero na carga RL, onde o diodo de roda livre fornece um caminho para a corrente presente no indutor no momento em que o SCR entra em bloqueio. De maneira direta o diodo de roda livre elimina a tensão negativa na saída da carga, logo a tensão média (AVG) na carga RL, volta a apresentar o mesmo comportamento de uma carga puramente resistiva.*

## 4.2 EXPERIMENTO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

### 4.2.1 COM O TRANSFORMADOR DE DERIVAÇÃO CENTRAL E CARGA RESISTIVA

Faça a montagem do circuito, seguindo a topologia ilustrada na Figura 35.

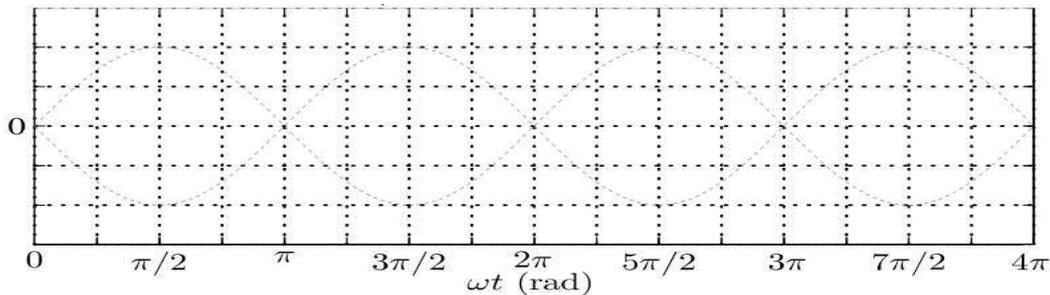
Figura 35 – Retificador com transformador de tap. Central de onda completa com carga resistiva



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Observe a forma de onda da tensão na carga ( $R = 50\Omega$ ), para diferentes ângulos de disparo, ajustando os valores com auxílio da IHM. Desenhe a forma de onda da tensão na carga para ( $\alpha = 90^\circ$ ) na Figura 36.

Figura 36 – Desenhe a forma de onda da tensão na carga R, Retificador onda completa.



Fonte: Guia dos experimentos (LEP-UFCG).

Utilizando o mesmo procedimento analisado anteriormente, obtenha os valores eficazes (RMS) e médios (AVG) da tensão na carga, usando a função *measure* do osciloscópio. Com os valores obtidos preencha a Tabela 5 - Retificador onda completa Tensão, ângulo de disparo e Tensão média.

Tabela 5 - Retificador onda completa Tensão, ângulo de disparo e Tensão média.

Ângulo de disparo ( $\alpha^\circ$ )	$30^\circ$	$90^\circ$	$150^\circ$
Tensão eficaz (RMS)	34,9V	25,2V	5,12V
Tensão média (AVG)	29,5V	16,0V	1,75V

Fonte: própria do autor.

Comparando os resultados obtidos para a tensão média (AVG) na carga com os valores obtidos no retificador de meia onda, explique o aumento nos valores médios da tensão na carga do retificador de onda completa.

Resposta.: Como é observado durante os experimentos o período para a forma de onda da tensão de saída na carga para o retificador de onda completa e o retificador de meia onda é respectivamente  $(T = \pi)$  e  $(T = 2\pi)$ , logo observando a equação da tensão média na saída do retificador para ambas as topologias,

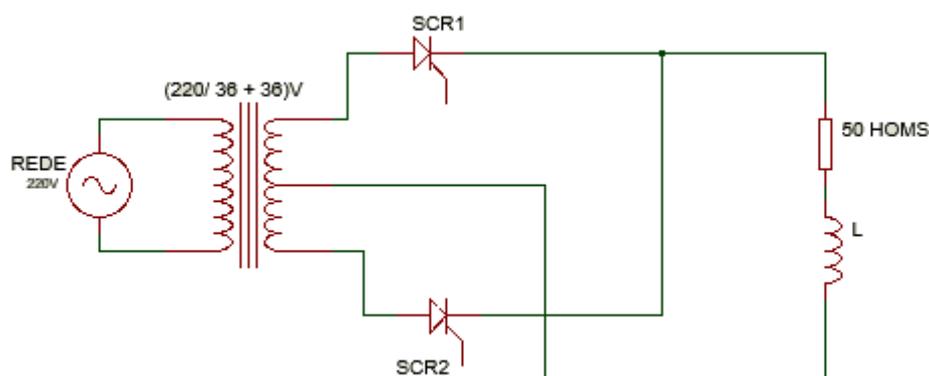
$$V_{AVG} = \frac{V_p}{T} (1 + \cos(\alpha)) \quad (100)$$

*Justificando o fato do aumento na tensão de saída da carga.*

#### 4.2.2 COM TRANSFORMADOR DE DERIVAÇÃO CENTRAL E CARGA (RL)

Insira um indutor na carga, conectando o indutor ao módulo teste, faça as devidas conexões conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37–Retificador de onda completa com transformador de derivação central com carga RL



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Utilizando o osciloscópio, encontre o ângulo de disparo, em que o conversor opere na região de limiar entre o modo de operação descontinua e continua. Onde temos,  $\beta = \pi + \alpha$  e a corrente no indutor é  $I_{(\omega t)} = 0$ ,  $\omega t = \beta$ . É conhecido com modo

de condução crítica, faça o mesmo procedimento para os três indutores, para uma melhor visualização do ângulo de disparo, em que ocorre a condução crítica, ajuste o período do osciloscópio na opção *push for zoom*.

E com o auxílio do *Ábaco de Pushlowky*, encontre o valor do ângulo de extinção para cada valor de indutância do retificador, anote todos os valores encontrados e calculados na .

Tabela 6.

Tabela 6 – Ângulo de Disparo e extinção, tensão média e eficaz.

Indutância (L)	26,8mH	50,3mH	151,8mH
Ângulo de disparo ( $\alpha^\circ$ )	12°	22°	50°
Ângulo de extinção ( $\beta^\circ$ )	192°	202°	230°
Ângulo de extinção ( $\beta^\circ$ ), <i>Ábaco</i>	180°	204°	234°
Tensão média ( $V_{avg}$ )	29.4V	28.2V	19.9V
Tensão eficaz ( $V_{rms}$ )	31.7V	30.0V	36.9V

Fonte: Própria do autor

Compare os resultados obtidos pelo osciloscópio com os valores obtidos pelo *Ábaco de Pushlowky*, e analise a veracidade do experimento.

*Ábaco em Anexo A.*

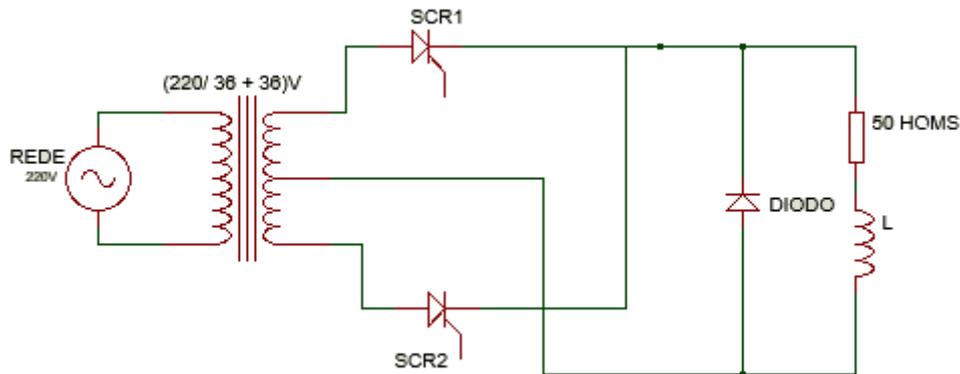
Com a variação da indutância na carga, observamos uma variação também no valor do ângulo de disparo em que o conversor opera no modo de condução crítica, explique esse fenômeno.

Resposta: *Como era de se esperar, quanto maior o valor da indutância maior é a quantidade energia armazenada pelo mesmo, logo quanto maior o valor do indutor maior será o tempo para o indutor descarregar por completo e sua corrente ir para zero. O que é provado nos experimentos, uma vez que quanto maior o valor do indutor maior o valor do ângulo de disparo para o conversor operar na região de limiar ( $\omega t = \beta, I_{(\omega t)} = 0$ ).*

### 4.2.3 COM TRANSFORMADOR DE DERIVAÇÃO CENTRAL E CARGA (RL) COM DIODO DE RODA LIVRE

Faça as conexões no módulo teste, conectando um diodo em paralelo com a carga (RL) conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Retificador com transformador de derivação central de carga RL e diodo de roda livre.

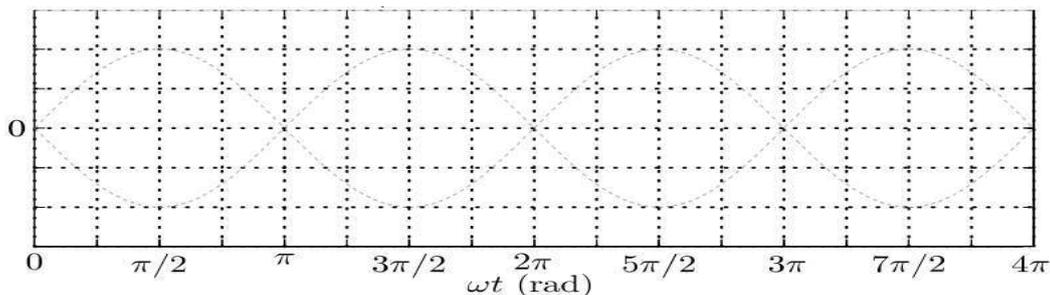


Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Observe a forma de onda da tensão na carga (RL) para diferentes ângulos de disparo, ajustando os valores do ângulo de disparo por meio da IHM.

Esboce a forma de onda da tensão na carga para o ângulo de disparo de  $90^\circ$  na Figura 39.

Figura 39 – Desenhe a forma de onda da tensão na carga RL, Retificador onda completa.



Fonte: Guia dos experimentos (LEP-UFCG).

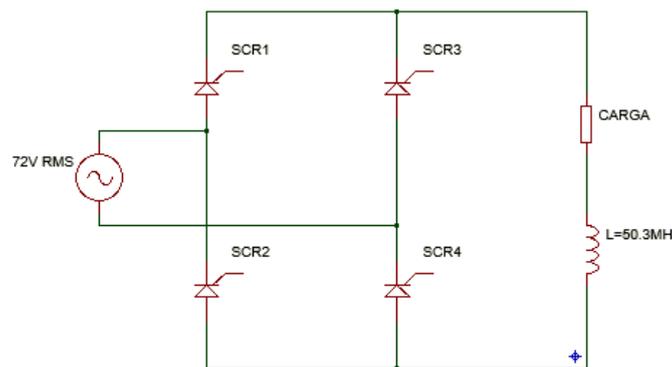
Observe agora a forma de onda da tensão em cima do resistor ( $V_R$ ), e esboce a forma de onda no mesmo gráfico da tensão ( $V_{RL}$ ), para uma melhor análise de ( $V_R$ ), utilize a opção (*cursor→modo→pushtoselect→acompanha*). Explique o comportamento das formas de onda das tensões ( $V_{RL}$  e  $V_R$ ).

Resposta.: A corrente continua a percorrer a carga após o SCR ficar inversamente polarizado, uma vez que o indutor ainda tem energia armazenada, a corrente fica circulando entre a carga e o diodo de roda livre, gerando tensão no resistor mesmo após o bloqueio do tiristor. Mas para a tensão de saída na carga RL, o comportamento é o mesmo apresentado nos retificadores com carga puramente resistiva, onde o diodo de roda livre tem a função de eliminar a tensão negativa na saída do conversor.

#### 4.2.4 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM PONTE-H

Outra topologia do retificador de onda completa é ilustrada na Figura 40, conhecida como ponte-H.

Figura 40 – Retificador de onda completa



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Essa configuração é a escolhida para aplicações onde a tensão requerida na carga é alta, pois a tensão de pico no SCR é menor. Para essa configuração dois tiristores são disparados no instante  $\omega t = \alpha$ , como podemos observar pela sua topologia, esse disparo precisa ocorrer de forma diagonal, para que se tenha um caminho satisfatório de condução para a corrente fluir, e os outros dois são disparados no momento  $\omega t = \alpha + \pi$ .

Variando os valores da indutância e do ângulo de disparo de acordo com a Tabela 7, faça as devidas medições, ângulo de extinção, valor médio da tensão na carga e tensão eficaz, após obter esses valores calcule a corrente média na carga e sua potência média.

Tabela 7 – ângulo de extinção, tensão média e eficaz, corrente média, potência média.

Indutância (L)	26,8mH	50,3mH	151,8mH
Ângulo de extinção ( $\beta^\circ$ )	8.96ms 187.78°	9.36ms 202.25°	10.3ms 222.57°
Ângulo de disparo ( $\alpha^\circ$ )	90°	90°	90°
Tensão média ( $V_{avg}$ )	27.3V	26.9V	22.3V
Tensão eficaz ( $V_{rms}$ )	46V	48.2V	54.8V
Corrente média ( $I_{avg}$ )	0.546A	0.538A	0.446A
Potência média ( $P_{avg}$ )	15W	14.47W	9.945W

Fonte: Própria do autor.

Compare os resultados obtidos para essa configuração com os resultados obtidos na montagem anterior, e analise os resultados obtidos.

Resposta.: *Observando os valores da tensão na carga, é verificado que, um mesmo valor de tensão de alimentação para ambas as topologias confere um valor bem mais alto na tensão de saída na topologia em ponte-H, como era esperado uma vez que na topologia em ponte-H toda a tensão do secundário do transformador é aplicada a carga.*

Analise o comportamento da potência ativa quanto a variação da indutância.

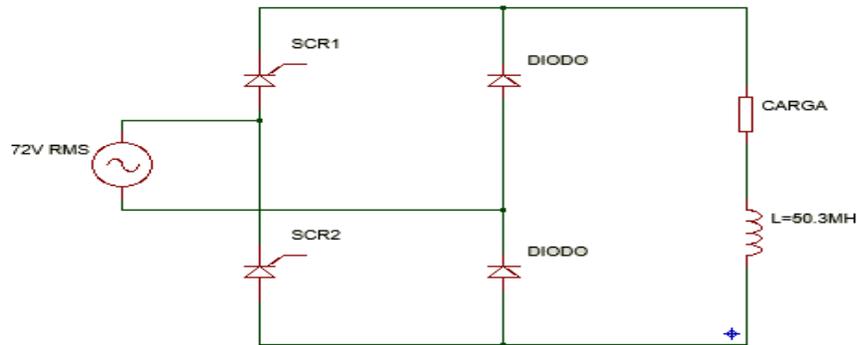
Resposta: *Como era esperado, pois quanto maior a indutância maior a potencia reativa e conseqüentemente menor a potência ativa.*

#### 4.2.5 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM PONTE-H, SEMI-CONTROLADOS

Faça as conexões necessárias para garantir um diodo de roda livre na topologia em ponte-H sem aumentar o numero de componentes, monte o esquemático do circuito, antes de fazer as conexões no módulo teste.

Resposta.:

Figura 41 – Esquemático para o retificador ponte-H, com diodo de roda livre (*Resposta*)



Fonte: Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Analisando as formas de onda na carga para o circuito proposto, verifique se a nova configuração apresenta as características de um diodo de roda livre.

Resposta.: *Observando a forma de onda é verificado que o problema proposto foi solucionado.*

Topologias CA/CC possíveis de ser implementadas utilizando os módulos testes;

- Retificadores semi-controlados, em suas diversas topologias.
- Retificador bifásico meia onda.
- Retificador bifásico de onda completa.

### 4.3 EXPERIMENTO CONVERSORES CC/CC

Os guias propostos para os conversores CC/CC, seguem um padrão de execução para obtenção dos valores experimentais, dividido nas seguintes tarefas.

- Montagem do conversor de acordo com sua topologia, utilizando as conexões do módulo teste para conectar os cabos.
- Análise do funcionamento do conversor: Utilizando a IHM, escolha o conversor. Feito isto selecione uma das opções desejadas entre, ajustar o duty cycle (onde se pode ajustar o duty cycle entre os valores de 10% a

90% com uma frequência constante de 20KHz), ajustar a frequência (onde se pode variar os valores da frequência de 8KHz a 50KHz com um duty cycle fixo de 50%) e voltar ao menu principal (tendo assim a opção de realizar outros experimentos, reajustando os valores).

Uso do osciloscópio: Obtenção dos valores experimentais, e tensão média (AVG).

Tabela 8 – variação do duty-cycle versus tensão

DutyCycle (D)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Teórico $V_{AVG}$									
Experimental $V_{AVG}$									

Fonte: Própria do autor

Tabela 9 – Variação da frequência versus tensão

$f_s$ (Hz)	8.7K	9.15K	9.58K	10K	10.5K	11.1K	11.8K	12.6K	13.4K
$V_{AVG}$									
$f_s$ (Hz)	14.3K	15.5K	16.8K	18.3K	20K	22.3K	25.3K	28.7K	33.8K
$V_{AVG}$									

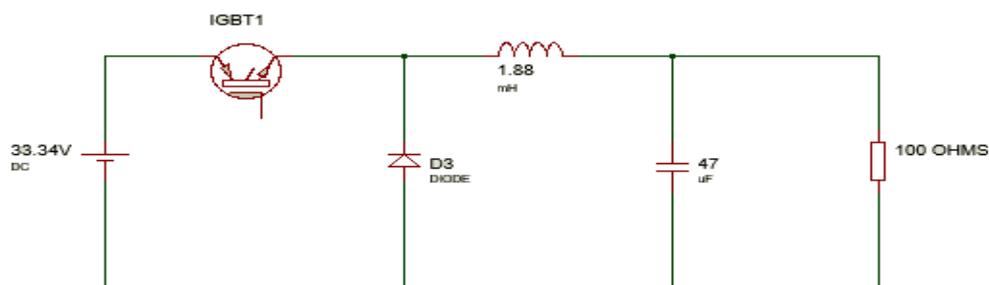
Fonte: Própria do autor

- Discussão dos resultados obtidos experimentalmente.

#### 4.3.1 CONVERSOR BUCK

Monte o circuito para a topologia do conversor Buck, com os parâmetros especificados na Figura 42.

Figura 42 – Conversor Buck.



Fonte- Própria do autor, gerada no Isis proteus8.

Observe o funcionamento do conversor Buck, utilizando a IHM, varie o valor do duty-cycle de 10% a 90% deixando fixo a frequência de 20KHz, preencha a Tabela 10.

Tabela 10 – Duty-cycle versus Tensão, BUCK.

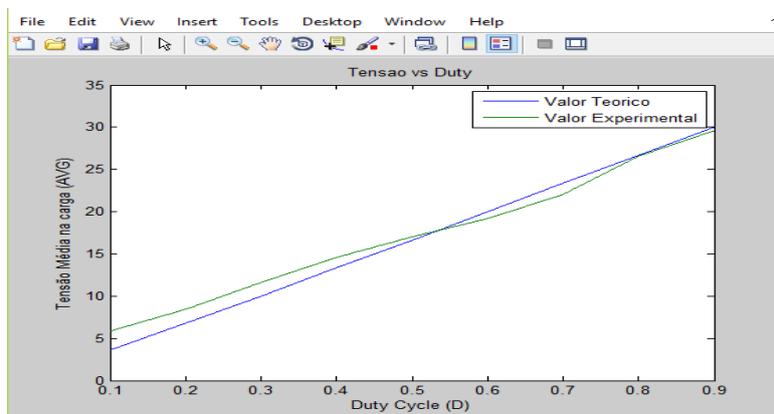
DutyCycle (D)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Teórico $V_{AVG}$	3.34V	6.67V	10V	13.34V	16.67V	20.0V	23.34V	26.67V	30.0V
Experimental $V_{AVG}$	5.86V	8.4V	11.6V	14.6V	17.0V	19.2V	22.1V	26.6V	29.6V

Fonte: Própria do autor

Analise os resultados obtidos experimentalmente, verificando se o experimento ocorreu de maneira satisfatória.

Resposta.:Comparando os resultados experimentais com o valores teóricos, utilizando a ferramenta *Matlab*, é possível verificar que o experimento ocorreu de maneira satisfatória, pois a variação entre os valores foi baixa, Figura 43.

Figura 43 – Tensão media carga x Duty-cycle



Fonte: Própria do autor, gerada no Matlab.

Vale ressaltar que para variação do Duty cycle entre 10% a 20% o conversor opera no modo descontínuo.

Para a mesma topologia, troque a penas o valor da indutância, conectando agora apenas 3 indutores em serie (  $L = 1.41\text{mH}$ ), fazendo o mesmo procedimento feito anteriormente anote os valores na Tabela 11.

Tabela 11 - Duty-cycle versus Tensão, BUCK com  $L = 1.47\text{mH}$ 

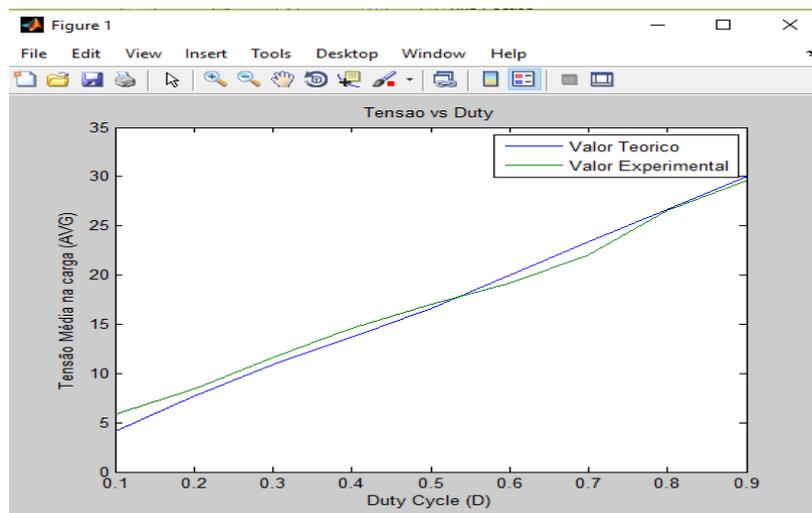
DutyCycle (D)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Teórico → $V_{AVG}$	4.15V	7.77V	10.92V	13.65V	16.67V	20.0V	23.34V	26.67V	30.0V
Experimental → $V_{AVG}$	6.5V	9.7V	12V	14.7V	17V	19.3V	22.3V	26.6V	28.2V

Fonte: Próprio do autor

Compare os resultados para os dois indutores, e analise quanto ao modo de operação.

Resposta.:

Figura 44 – Tensão Média na Carga X Duty-Cycle



Fonte: Própria do autor, gerada no Matlab.

*Para essa configuração tem-se que o conversor opera no modo descontínuo para Duty cycle entre 10% e 40%.*

Alterando apenas o valor do indutor para  $L = 1.88\text{mH}$ , varie o valor da frequência de chaveamento, deixando o duty cycle fixo em 50%, use a IHM, para ajustar realizar essa função.

Tabela 12 – Variação da frequência de chaveamento D = 50%.

$f_s$ (Hz)	<b>8.7K</b>	<b>9.15K</b>	<b>9.58K</b>	<b>10K</b>	<b>10.5K</b>	<b>11.1K</b>	<b>11.8K</b>	<b>12.6K</b>	<b>13.4K</b>
$V_{AVG}$	18.2V	18.0V	17.5V	17.4V	17.4V	17.2V	16.6V	16.4V	16.3V
$f_s$ (Hz)	<b>14.3K</b>	<b>15.5K</b>	<b>16.8K</b>	<b>18.3K</b>	<b>20K</b>	<b>22.3K</b>	<b>25.3K</b>	<b>28.7K</b>	<b>33.8K</b>
$V_{AVG}$	16.4V	16.5V	16.6V	16.8V	17.0V	17.2V	17.4V	17.6V	18.4V

Fonte: Própria do autor

Sabendo que teoricamente a tensão média de saída para um conversor Buck, utilizando um ciclo de trabalho de 50% é  $V_{AVG} = 0.5 \times V_S$ , onde  $V_S = 33.34V$ , comente os resultados obtido experimentalmente, explicando os porquês das variações.

Resposta: *Fazendo a análise quanto ao modo de operação do conversor, calculando o valor mínimo do indutor para garantir o modo de operação contínua para cada frequência utilizada no experimento e observou-se que a partir da frequência de 12.6KHz o conversor entrou no modo de operação descontínuo e assim continuou a medida que o valor de frequência baixava, isso explica o porquê dos resultados obtidos, a medida que a frequência baixa a tensão de saída distancia progressivamente do valor esperado, uma vez que, para determinar a tensão média de saída para o modo descontínuo o procedimento é diferente.*

*Em relação aos valores obtidos para as frequências mais altas, vale ressaltar que os IGBT's apesar de operarem com frequências de valores até 40KHz, não são indicados para altas frequências, pois é observado um atraso entre o modo de condução e bloqueio, resultando em um ciclo de trabalho maior que 50%, isso explica o fato da tensão média na saída ter sido maior que o valor esperado, apesar do mesmo está operando em modo contínua para essas frequências.*

## 5 PROBLEMAS ENFRENTADOS

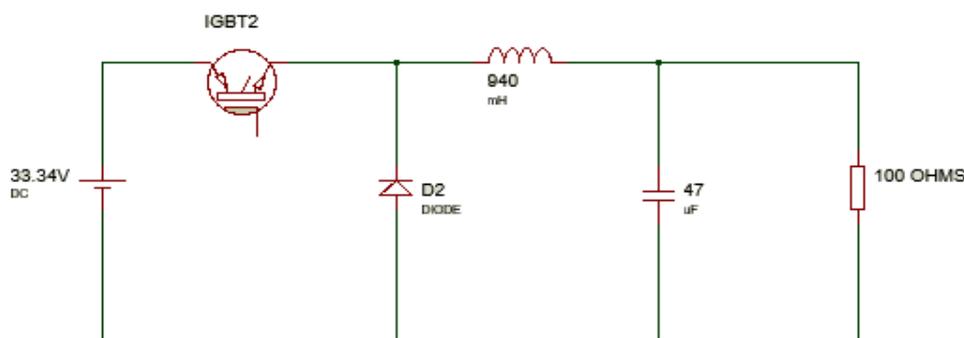
No decorrer do trabalho houve alguns problemas que precisaram ser solucionados para que fosse cumprida a execução dos guias, serão detalhados a seguir tais problemas.

- Módulos testes estavam sem os indutores, problema esse resolvido para os retificadores, mas não foi possível utilizar o mesmo indutor no modulo teste dos conversores CC-CC, pois trabalhavam em alta frequência, levando assim o indutor de núcleo de ferro magnético a saturação em pouco tempo.
- Indutores de núcleo de ferrita foram providenciados, solucionando o problema
- Falha na conexão entre o conector do modulo teste e o gate do IBGT, o que tornava a comunicação entre o drive de controle e o módulo teste impossível, problema esse também resolvido com a soldagem de um jumper, para conectar os dois terminais que estavam em aberto.

### 5.1 BUCK-BOOST

No andamento dos experimentos do conversor Buck-boost, foi calculado o valor da indutância para o limiar entre o modo de operação continua e descontinua onde também foi feito o calculo para as tensões de saída para o duty cyce de 10% a 90% com os valores em mão foi iniciada a montagem, como pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 – Topologia Buck-Boost



Fonte: Própria do autor gerado no Isis proteus 8

Com montagem foi possível obter os resultados experimentais e colocá-los na Tabela 13:

Tabela 13 – Duty-cycle versus Tensão, BUCK-BOOST

DutyCycle	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
<b>Teórico</b>	-3.7V	-8.3V	-14.2V	-22.2V	-33.34	-50V	-77.8V	-133V	-300V
<b>Experimental</b>	-7.22V	-11.6V	-16.2V	-23.5V	-24.4V	-26.7V			

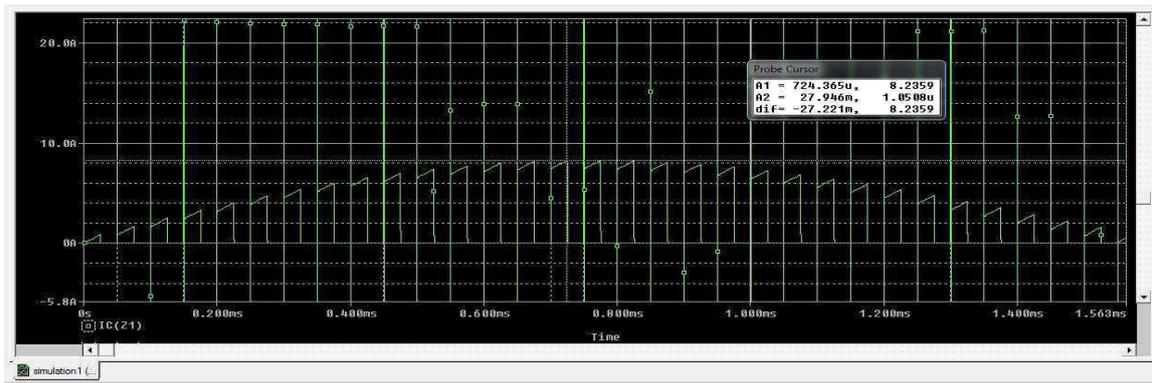
Fonte: Própria do autor

Como observado na tabela não foi possível obter todos os resultados experimentais para a tensão de saída.

Após o ocorrido, foi levantada uma suposição em torno do qual seria problema, levando em consideração a topologia do conversor, onde o mesmo é um abaixador e elevador de tensão, pensou-se que uma sobre-corrente aplicada na chave durante período do transitório pudesse danificá-la.

Logo então foi feito uma simulação no ORCAD para analisar o período de transitório na chave, como pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 – Corrente no IGBT.



Fonte: Própria do autor gerada no ORCAD 10.1

Como o período de transitório é de 1,563ms foi suficiente para danificar a chave, então não foi possível prosseguir o experimento prático.

## 6 CONCLUSÃO

Mesmo com os problemas enfrentados durante a realização dos experimentos dos conversores, em especial dos conversores CC-CC, o trabalho de conclusão de curso, foi bastante proveitoso, pois permitiu que o aluno coloca-se em teste muitos conhecimentos teóricos estudados no decorrer da graduação.

Ao concluir o trabalho fica evidente que a implantação dos módulos testes dos conversores na disciplina do laboratório de eletrônica de potência, tornará mais intuitivo o entendimento dos alunos da teoria abordada na disciplina eletrônica de potência e que é possível a execução dos guias de forma didática.

## BIBLIOGRAFIA

*Eletrônica de potência Circuitos, Dispositivos e aplicações* 1999 São Paulo MAKRON Books

Filho, J. M. (2002). *Instalações elétrica Industriais* (6ª ed., Vol. 1). Rio de Janeiro: LCT, livros Técnicos e Científico Editora.

Hart, D. W. (2012). *Eletrônica de Potência análise e projetos de circuitos*. São Paulo : ARTMED Editora S.A.

# ANEXO

$$\alpha = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot V_0} \quad , \quad \cos(\phi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$u = U$$

$$\cos \phi \approx 0,6$$

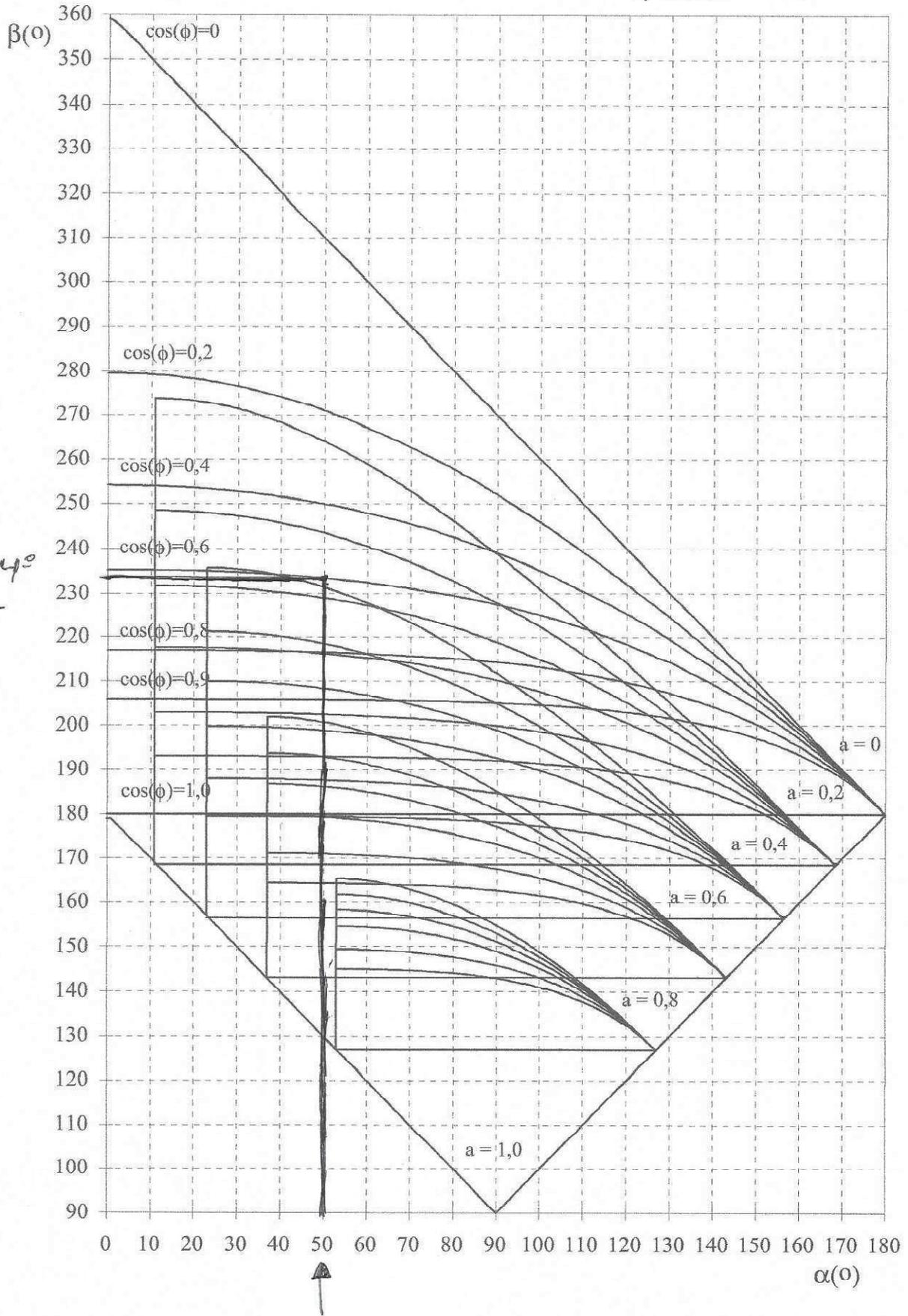
$$h = 151,8 \text{ mH}$$

$$\alpha = 50^\circ$$

Ábaco de Pushlowky

TABELA - 6

$$\beta^\circ = 234^\circ$$



$$a = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot V_0}, \quad \cos(\phi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

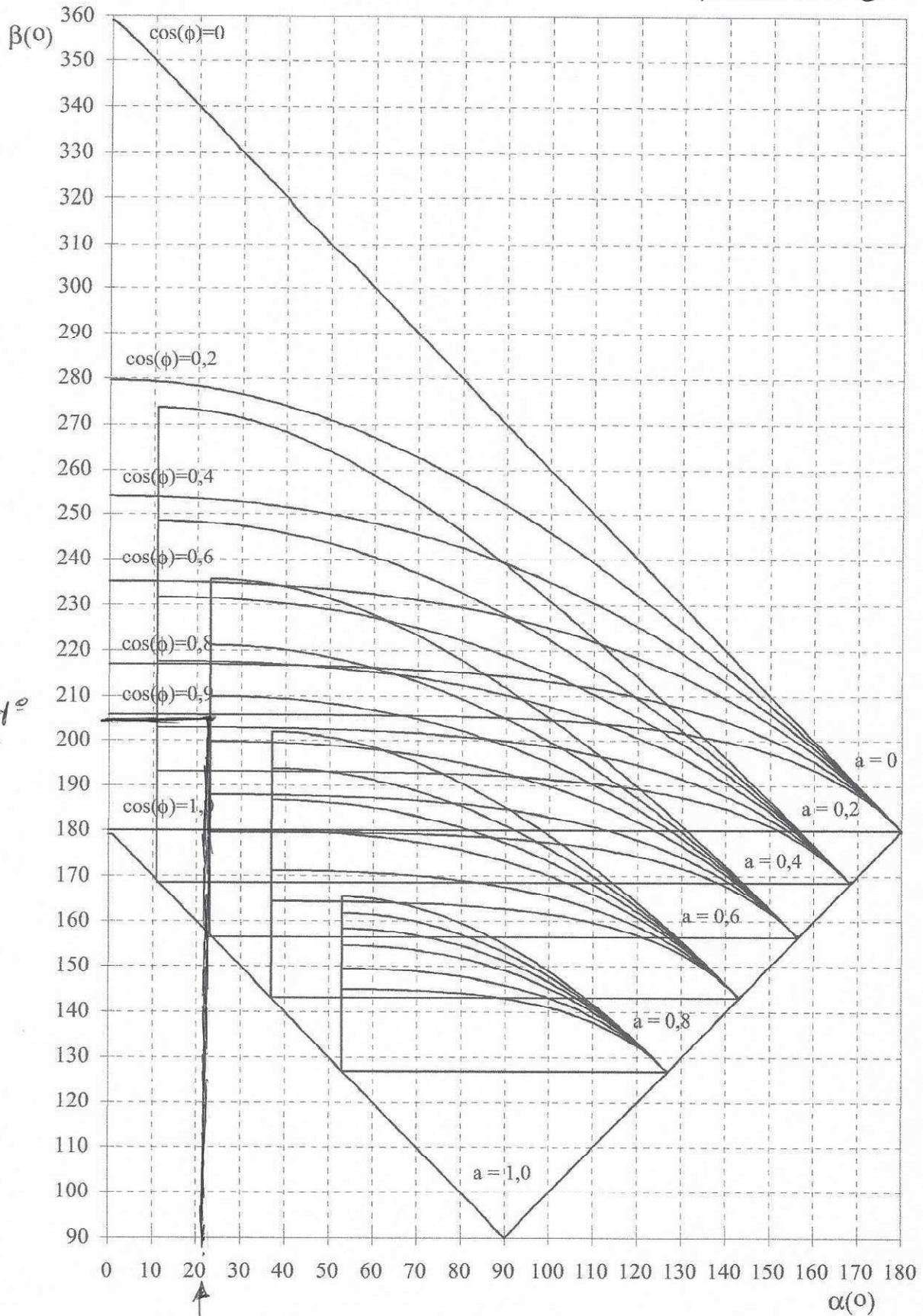
$$u = U, \quad \alpha = 22^\circ$$

$$\cos \phi = 0,9$$

$$L = 50,3 \text{ mH}$$

Ábaco de Pushlowky

TABELA - 6



$$\beta^\circ = 204^\circ$$

22°

$$a = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot V_0} \quad ; \quad \cos(\phi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

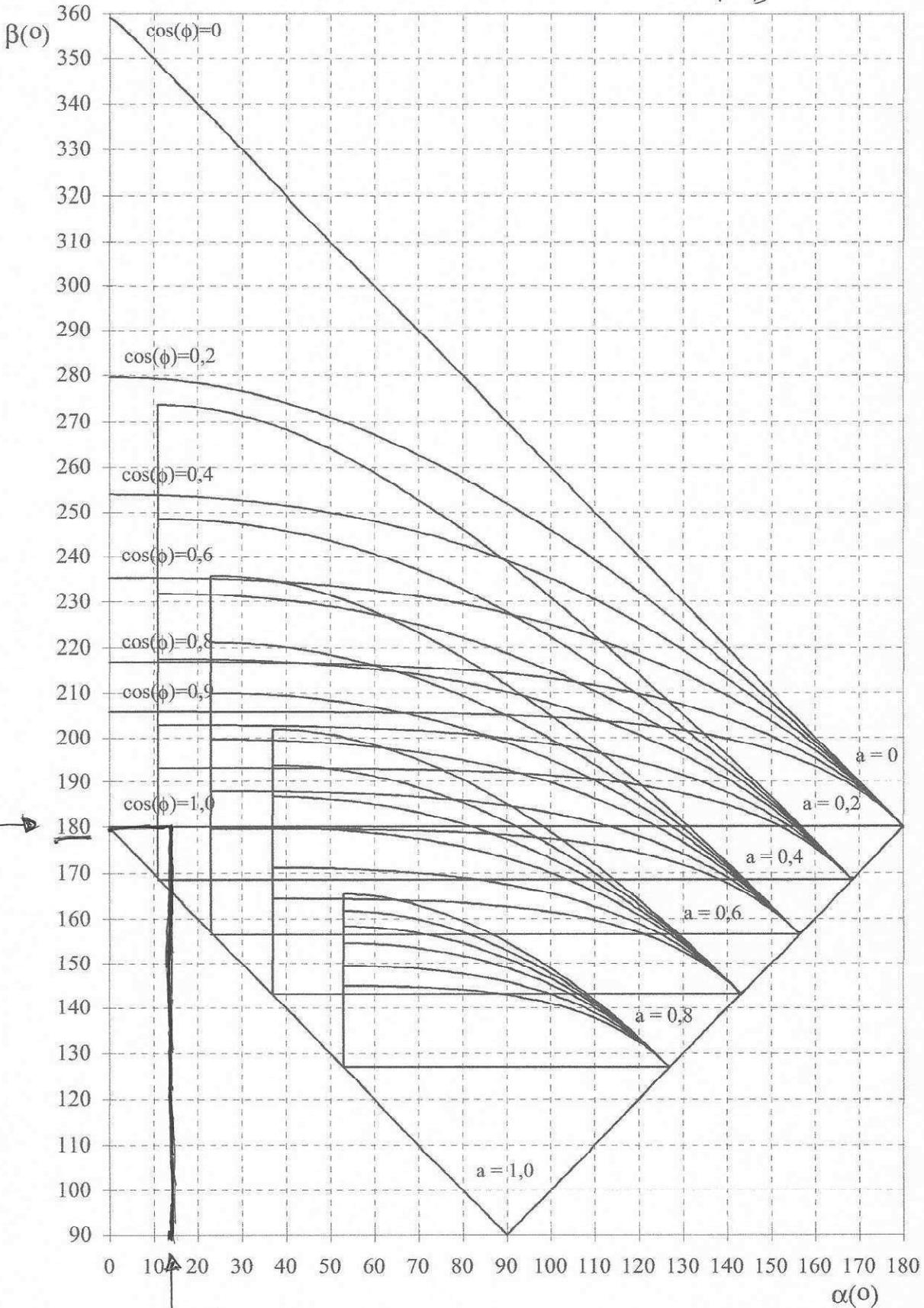
$$a = 0 \quad \alpha = 12^\circ$$

$$\cos \phi \approx 1$$

$$L = 26,8 \text{ mH}$$

Ábaco de Pushlowky

TABELA-6



$\beta$  →

( $12^\circ$ )

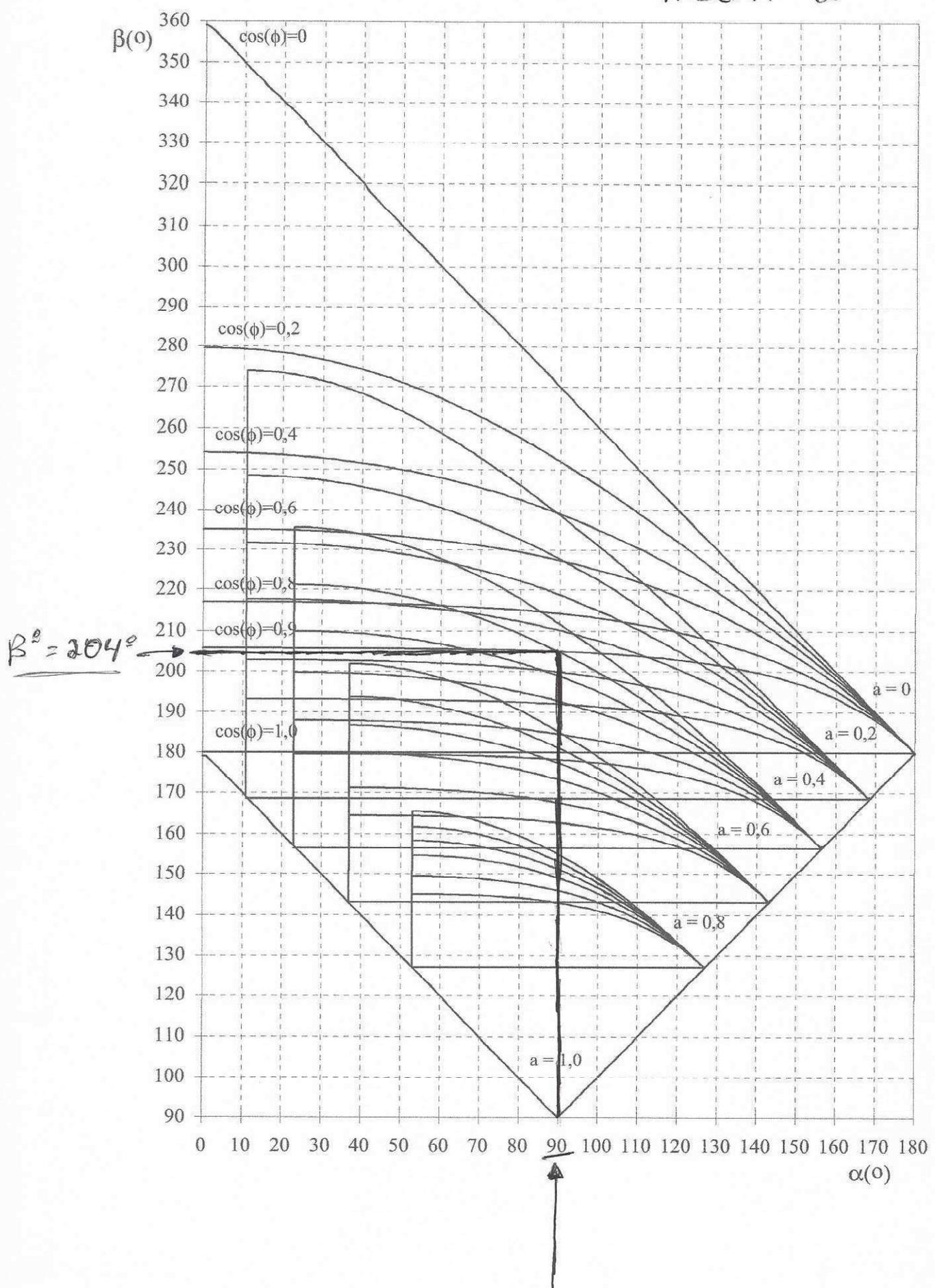
$$\alpha = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot V_0} \quad , \quad \cos(\phi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$\alpha = 0 \quad \cos \phi \approx 0,9 \quad \alpha = 90^\circ$$

$$\boxed{L = 50,3 \text{ mH}}$$

Ábaco de Pushlowky

TABELA - 2



$$a = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot V_0}$$

$$\cos(\phi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$u = U$$

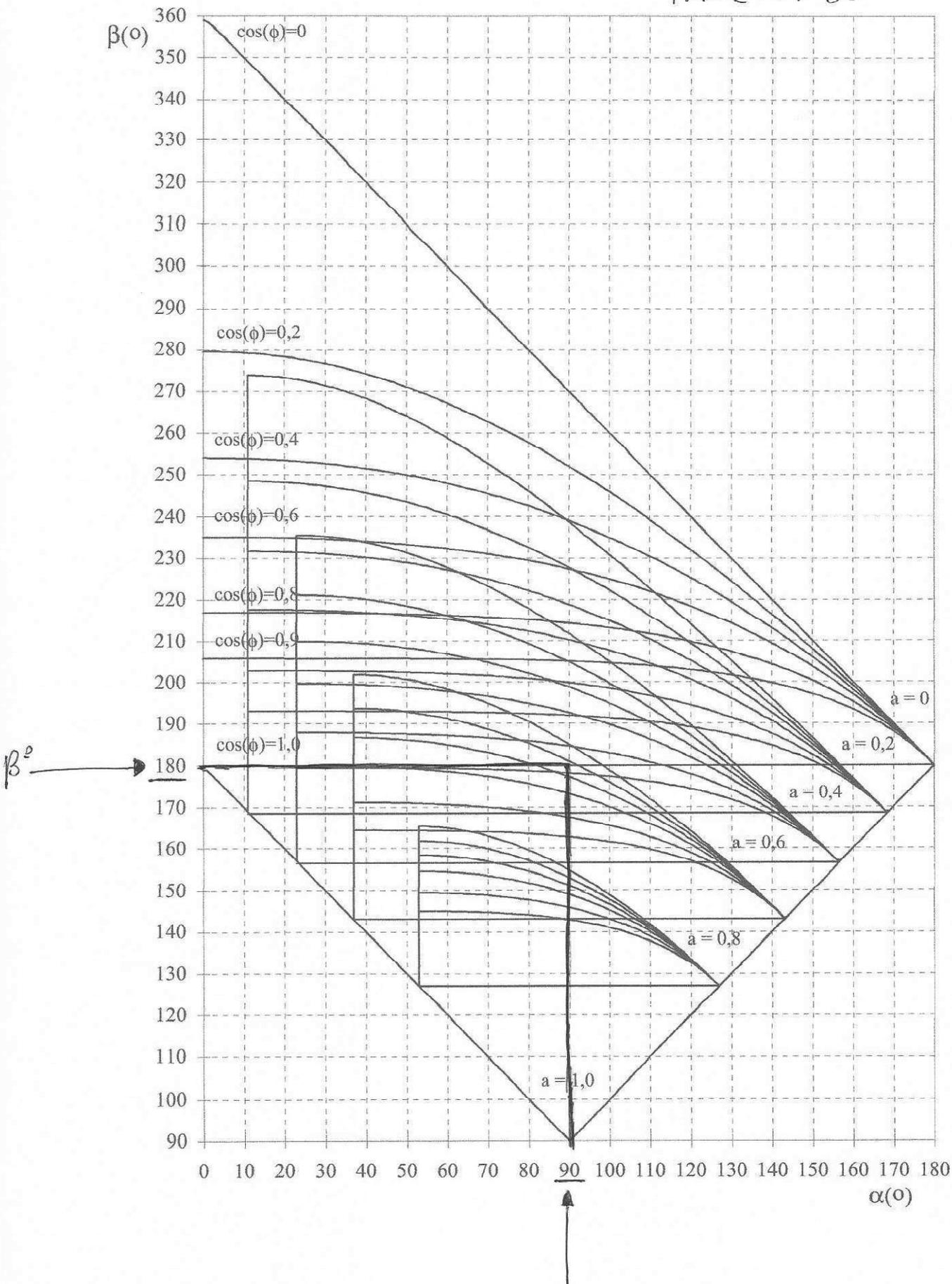
$$\cos \phi \approx 1$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$L = 26,8 \text{ mH}$$

Ábaco de Pushlowky

TABELA-2



$$a = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot V_0}$$

$$\cos(\phi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$u = U$$

$$\cos \phi = 0,6$$

$$L = 151,8 \text{ mH}$$

$$\alpha = 40^\circ$$

Ábaco de Pushlowky TABELA - 2

