

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

Ricardo Cesar Pitol

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM RETIFICADOR
CONTROLADO A TIRISTOR PARA BANCADA DIDÁTICA DE
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

**Santa Maria, RS
2017**

Ricardo Cesar Pitol

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM RETIFICADOR CONTROLADO A TIRISTOR PARA BANCADA DIDÁTICA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro de Controle e Automação**.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Concatto Beltrame

Santa Maria, RS
2017

Ricardo Cesar Pitol

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM RETIFICADOR CONTROLADO A TIRISTOR PARA BANCADA DIDÁTICA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro de Controle e Automação**.

Aprovado em 20 de dezembro de 2017:

Rafael Concatto Beltrame, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Cassiano Rech, Dr. (UFSM)

Mário Lúcio da Silva Martins, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e todos, agradeço aos meus pais Anair e Irto, por todo o apoio durante toda minha permanência na graduação. Entre sorrisos e tempestades, sempre se fizeram presentes e me ajudando a levantar a cabeça e seguir em frente. Devo tudo para vocês, meu porto seguro.

Agradeço a todos meus familiares, tios, primos, meu avô e os que já não estão mais entre nós. Nunca mediram esforços para me ajudar e muito do que consegui foi com o enorme auxílio de vocês. Também à minha namorada Andressa, por toda paciência e apoio durante esse período.

Aos meus amigos de infância Pablo, Victor e Lucas, por todas as coisas boas que a amizade verdadeira nos proporciona. Os primeiros a me darem parabéns quando passei no vestibular e acompanharem tudo de perto. À minha prima Gislaine, que é uma irmã para mim.

Aos amigos que fiz durante toda a graduação, em especial Diego, Felipe e Guilherme por estarem presentes todos os dias. Também aos colegas Marcelo, Lucas, Germano, Igor, Franchiescolly, Adriano, Vinicius e Mateus por toda ajuda e companheirismo necessários.

Aos grandes amigos que fiz em Santa Maria, agradeço a todos e em especial aos que moraram anos comigo. Obrigado Douglas, Luís, Luiz, Willian, Rodrigo, Joel, Clécio, Vitor e Junior, espero sempre contar com vocês e poder ajudar.

Agradeço ao professor Rafael por toda orientação, paciência, puxões de orelha e pela chuva de ensinamentos que me proporcionou durante a graduação.

À banca por todas contribuições para esse trabalho.

Agradeço a todos professores que tive, aos técnicos administrativos, especialmente a Tânia, que me permitiram chegar até esse momento.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria por me dar a oportunidade de estudar, oferecendo a estrutura e qualidade de ensino.

RESUMO

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM RETIFICADOR CONTROLADO A TIRISTOR PARA UMA BANCADA DIDÁTICA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

AUTOR: Ricardo Cesar Pitol
ORIENTADOR: Prof. Dr. Rafael Concatto Beltrame

Este trabalho consiste em projetar e implementar um retificador controlado a tiristor para uma bancada didática para ensino em Eletrônica de Potência. Foi realizado um estudo de soluções comerciais presentes no mercado, as quais apresentam deficiências em relação aos propósitos do trabalho. Devido a isso, foi desenvolvido um retificador controlado a tiristor e uma placa de circuitos impresso (PCI), com configurações que permitem ao aluno realizar diferentes experimentos e comparar os resultados obtidos. Inicialmente é possível aos alunos reconhecer os componentes do retificador tanto no circuito de controle como de potência, pela inspeção da PCI onde todos itens são descritos e ilustrados. Em seguida, os alunos podem ligar o retificador e analisar os valores de tensão e corrente de saída. É possível modificar o ângulo de disparo do tiristor, variando o valor do potenciômetro presente na placa ou escolhendo pelo código no Arduino. Também foram propostas diferentes configurações de carga, onde os alunos poderão realizar diferentes projetos no retificador, já que é permitido combinar diferentes valores de indutor e resistor, a fim de obter e analisar formas de ondas e valores de tensão e corrente.

Palavras-chave: Ensino em Engenharia. Eletrônica de Potência. Retificador Controlado.

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A THYRISTOR CONTROLLED RECTIFIER TEACHING POWER ELECTRONICS

AUTHOR: Ricardo Cesar Pitol
ADVISOR: Prof. Dr. Rafael Concatto Beltrame

This work consists in designing and implementing a thyristor controlled rectifier for teaching Power Electronics. A study has been conducted of commercial solutions present in the market, which have deficiencies in relation to the purposes of the work. Due to this, it was developed a controlled thyristor rectifier and a printed circuit board (PCB), with settings that allow the student to perform different experiments and to compare obtained measurements. Initially, it is possible for students to recognize the rectifier components both in the control circuit and power, analyzing the PCB where all items are identified. Then, the students can connect the rectifier and analyze the values of output voltage and current. It is possible to modify the angle of triggering of the thyristor, varying the potentiometer value present on the PCB or programming in Arduino code. Different load configurations are also available, where students can accomplish different projects in the rectifier, since it is allowed to combine different values of inductor and resistor in order to obtain and analyze waveforms and values of voltage and current.

Keywords: Engineering Education. Power Eletronics. Controlled Rectifier.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Kits didáticos - Texas Instruments®.....	17
Figura 2 - Bancada de Ensino em Eletrônica de Potência - Exsto Tecnologia®.	18
Figura 3 - Conversor Boost do kit da PowerSIM® vendido pela Ohmini®.	19
Figura 4 - Módulo didático ZL-POT da Zilocchi®.....	20
Figura 5 - Circuito de potência do retificador de meia-onda controlado a tiristor com carga RL.	22
Figura 6 - Sentido da corrente na primeira etapa.....	23
Figura 7 - Ábaco de Puschlowski.	26
Figura 8 - Sentido da corrente na segunda etapa.	27
Figura 9 - Sentido da corrente na terceira etapa.	27
Figura 10 - Formas de onda de v_{in} , v_o , i_o e i_G	28
Figura 11 - Resistor de segurança.	29
Figura 12 - Indutor projetado.....	30
Figura 13 - Resistor de carga selecionado.	31
Figura 14 – Tiristor modelo MCR106.....	32
Figura 15 - Circuito detector de cruzamento por zero.....	35
Figura 16 - Validação da forma de onda de ZCD. Resultado de simulação (a) e resultado experimental (b).....	35
Figura 17 - Circuito de medição do potenciômetro.....	36
Figura 18 - Validação das formas de ondas de pulso enviados ao gatilho do tiristor para três ângulos distintos. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $\alpha = 0^\circ$; simulação (c) e experimental (d) para $\alpha = 90^\circ$; simulação (e) e experimental (f) para $\alpha = 135^\circ$	37
Figura 19 - Circuito de potência para $R_o = 11 \Omega$ e variando L_o	38
Figura 20 - Validação das formas de onda de v_o e i_o para $R_o = 11 \Omega$. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $L_o = 0$ mH; simulação (c) e experimental (d) para $L_o = 8,5$ mH; simulação (e) e experimental (f) para $L_o = 21$ mH; simulação (g) e experimental (h) para $L_o = 28$ mH.	39
Figura 21 - Circuito de potência para $R_o = 16 \Omega$ e variando L_o	40
Figura 22 - Validação das formas de onda de v_o e i_o para $R_o = 16 \Omega$. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $L_o = 0$ mH; simulação (c) e experimental (d) para $L_o = 8,5$ mH;	

simulação (e) e experimental (f) para $L_o = 21$ mH; simulação (g) e experimental (h) para $L_o = 28$ mH.	41
Figura 23 - Circuito de potência para $R_o = 21 \Omega$ e variando L_o	42
Figura 24 - Validação das formas de onda de v_o e i_o para $R_o = 21 \Omega$. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $L_o = 0$ mH; simulação (c) e experimental (d) para $L_o = 8,5$ mH; simulação (e) e experimental (f) para $L_o = 21$ mH; simulação (g) e experimental (h) para $L_o = 28$ mH.	43
Figura 25 - Validação das formas de ondas de v_o para (a) $\alpha = 0^\circ$. (b) $\alpha = 45^\circ$. (c) $\alpha = 90^\circ$. (d) $\alpha = 135^\circ$	45
Figura 26 - Tensão de pico reverso no tiristor.....	46
Figura 27 - Esquemático da PCI.....	47
Figura 28 - Projeto da PCI feito no <i>Ultiboard</i>	47
Figura 29 - Retificador controlado a tiristor projetado.....	48
Figura 30 - Retificador controlado a tiristor com a identificação dos principais componentes (a) e a identificação dos pontos de prova e conectores (b).	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para fabricação do indutor.....	30
Tabela 2 - Especificações do MCR106.	32
Tabela 3 - Resultados de I_{pico} , I_{rms} , β e V_{med}	33
Tabela 4 - Componentes utilizados para elaboração da PCI.	34
Tabela 5 - Tabela de parâmetros calculados em simulação e experimental.....	44
Tabela 6 - Valores obtidos para tensão média.....	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

α	Ângulo de disparo do tiristor
β	Ângulo de extinção da corrente
CC/CA	Corrente contínua/corrente alternada
C_T	Capacitor de proteção ao tiristor
D_C	Diodo retificador no circuito de controle
F_1	Fusível no estágio de entrada
ϕ	Ângulo do fator de potência da carga (circuito RL)
GND	Terra do circuito de potência e do Arduino
i_o	Corrente de saída
L_1	Tap 1 do indutor
L_2	Tap 2 do indutor
L_3	Tap 3 do indutor
L_0	Tap 4 do indutor
L_o	Indutância de saída
PCI	Placa de circuito impresso
Pin 10	Pino 10 do Arduino
Pin 2	Pino 2 do Arduino
Pin A0	Pino A0 do Arduino
Pot	Potenciômetro
R_1	Resistor limitador da corrente de entrada do 4n25
R_{11}	Resistência de carga 1
R_{16}	Resistência de carga 2
R_{21}	Resistência de carga 3
R_C	Resistência de carga 4
R_0	Resistência de carga 5 (curto-circuito)
R_G	Resistência de gatilho do tiristor
RMS	Valor eficaz (<i>root mean square</i>)
R_o	Resistência de saída
R_P	Resistência para gerar pulso quadrado do cruzamento por zero
R_{S1}	Resistor de segurança 1
R_{S2}	Resistor de segurança 2
R_T	Resistor de proteção do tiristor
SCR	Retificador controlado de silício (<i>silicon controlled rectifier</i>)
T	Tiristor
u	Função degrau unitário
U_1	Optoacoplador 4n25
U_2	Microcontrolador Arduino Mega 2560
v_{in}	Tensão de entrada no circuito
v_{L_o}	Tensão no indutor de carga
V_{max}	Tensão de entrada máxima
V_{med}	Tensão média
v_o	Tensão de saída
v_{R_o}	Tensão no resistor de saída
v_T	Tensão no tiristor
ω	Frequência angular
Z	Impedância de saída
ZCD	Detector de cruzamento por zero (<i>zero crossing detector</i>)

V_{DM}	Tensão direta máxima no tiristor
V_{RM}	Tensão reversa máxima no tiristor
V_{PRT}	Tensão de pico reversa no tiristor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	SOLUÇÕES COMERCIAIS PARA ENSINO EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA	16
2.1.1	Texas Instruments® <i>Power Management Lab Kit Series</i>	16
2.1.2	Banco de Ensaios em Eletrônica de Potência da Exsto Tecnologia®	17
2.1.3	<i>PowerSIM</i> ® Kit de Ensino em Eletrônica de Potência	18
2.1.4	Módulo Didático ZL-POT da Zilocchi®	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	RETIFICADOR CONTROLADO A TIRISTOR	21
3.2	OPERAÇÃO DO RETIFICADOR CONTROLADO MEIA ONDA	22
3.2.1	Primeira etapa	22
3.2.2	Segunda etapa	23
3.2.3	Terceira etapa	27
3.2.4	Formas de onda	28
3.2.5	Cálculo da tensão média	28
3.3	PROJETO DOS COMPONENTES DO RETIFICADOR	29
3.3.1	Projeto de resistência de segurança	29
3.3.2	Projeto do indutor	29
3.3.3	Projeto do resistor de carga	31
3.3.4	Dimensionamento do tiristor	31
3.4	SIMULAÇÕES COM DIFERENTES CARGAS	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	RETIFICADOR CONTROLADO	34
4.1.1	Circuito de controle e sincronismo	34
4.1.2	Variação paramétrica	37
4.1.3	Controle de tensão média	44
4.1.4	Tensão de pico reversa no tiristor	46
4.1.5	Placa de circuito impresso	47
4.1.6	Custo	49
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	51
	ANEXO I - ALGORITMO DE CONTROLE E SINCRONISMO UTILIZADO NO RETIFICADOR	53

1 INTRODUÇÃO

A Eletrônica de Potência encontra-se hoje nas mais variadas áreas tecnológicas, seja na conversão de energia elétrica ou no comando e controle de sistemas eletrônicos. Atualmente, a Eletrônica de Potência tem forte penetração nas indústrias de automação, transmissão e distribuição de energia, conversão de energia e no tratamento de fontes renováveis, entre outros (BARBI, 2000). Este é o motivo pelo qual a cadeira de Eletrônica de Potência é prevista em grade de cursos como Engenharia Elétrica, Engenharia Eletrônica, Engenharia de Telecomunicações, Engenharia Mecatrônica, Engenharia de Controle e Automação, entre outros.

No contexto da educação, constantemente, as metodologias de ensino sofrem um aprimoramento buscando melhorar o entendimento do aluno sobre os temas abordados em sala de aula. Colaboram neste sentido diferentes tecnologias que podem ser empregadas em sala de aula, como computadores, *tablets*, aplicativos e *softwares* educacionais, além de aulas práticas em laboratórios de ensino.

O uso destas ferramentas tecnológicas e as aulas de laboratório são essenciais para que o aluno consiga ter a experiência (vivência) prática do que é aprendido na teoria na sala de aula. Nas disciplinas que utilizam componentes eletrônicos dos cursos de engenharia, como a Eletrônica Potência, para conversores estudados assume-se que os componentes utilizados são ideais (sem perdas e com tempos de operação desprezíveis).

As aulas de laboratório servem para mostrar que no “mundo real” o comportamento dos conversores é diferente do modelo idealizado. Além disso, ajuda a consolidar os conceitos apresentados em salas de aula, o aprendizado no uso de equipamentos e um melhor entendimento sobre aspectos práticos de montagem. Com essa forma de abordagem de ensino, o aluno consegue entender melhor os conceitos ensinados pelo professor e desenvolver novos questionamentos que elevarão seu grau de compreensão. Obviamente, o interesse do aluno é de suma importância para que o aprendizado ocorra satisfatoriamente.

As aulas práticas na disciplina de Eletrônica de Potência são fundamentais para analisar o comportamento dos circuitos eletrônicos. Porém, a montagem do circuito, apesar de agregar uma grande satisfação ao aluno, compromete o tempo requerido para a execução de um dado experimento. Isso dificulta o ensino por parte do professor, que provavelmente não conseguirá concluir todo o conteúdo programado para a aula. Infelizmente, nem todas as universidades têm infraestrutura para a criação de espaços destinados para as aulas práticas.

Um laboratório de Eletrônica de Potência, além da necessidade de um amplo espaço físico, tem custo muito elevado, o que dificulta sua construção. Pensando em minimizar esse problema, este trabalho tem o objetivo de construir um módulo de um *kit* didático para o ensino prático de Eletrônica de Potência. Estes *kits* devem possuir tamanhos reduzidos e baixo custo, reduzir o tempo da montagem do circuito por parte dos alunos e, assim, maximizar o tempo de aula. Para o presente projeto, será construído um retificador de meia-onda controlado a tiristor com carga resistiva-indutiva (*RL*). Esses *kits* são compostos por conversores como Buck, Boost, Buck-Boost e Flyback, além de retificadores.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como principal objetivo construir e implementar um retificador controlado a tiristor para a utilização em uma bancada didática para o ensino de Eletrônica de Potência.

1.1.2 Objetivos específicos

O trabalho tem como objetivos específicos:

- Identificar as soluções comerciais para ensino em Eletrônica de Potência existentes atualmente no mercado;
- determinar os valores de indutor e resistor de carga para o circuito de potência;
- determinar os componentes necessários para a implementação do circuito de controle;
- simular o circuito completo e verificar a acurácia do sistema implementado;
- implementar uma placa de circuito impresso do retificador;
- realizar testes experimentais para validar os resultados obtidos na simulação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos métodos mais eficientes para melhorar o aprendizado dos alunos de engenharia, especialmente de Eletrônica de Potência, são as aulas de laboratório, onde o aluno consegue praticar o que foi ensinado na teoria em sala de aula. Nas aulas de laboratório ocorrem simulações do circuito, projeto e dimensionamento de componentes, montagem de circuitos, além de outras atividades que dão ao aluno uma maior compreensão do sistema. Assim, é possível analisar o funcionamento do circuito, a utilização dos equipamentos de medição e comportamento não-ideal dos componentes.

Essa forma de ensino é apresentada por Ang (1996), que propõe uma análise primeiramente em simulações e o dimensionamento dos componentes, para na prática, perceber a diferença de comportamento dos conversores nos regimes permanente e transitório, e as mudanças ocasionadas pela variação das indutâncias e capacitâncias no conversor. Isso ajuda a validar os conceitos ensinados pelo professor em sala de aula.

Lamar et al. (2012) apresentam o método “Aprendizagem Baseada em Projetos” (*Project-Based Learning*) onde sugerem que os alunos aprendam o “como fazer” durante a realização do projeto e não apenas memorizem o conteúdo para lembrar quando necessário. Dessa forma, os alunos vão ao mesmo tempo aprendendo e aplicando os ensinamentos no projeto, conseguindo de forma simultânea compreender na prática o que acabaram de ver na teoria. Os alunos avaliaram esse método como positivo, relatando sobre o aumento da capacidade de resolução de problemas e como é mais fácil tomar decisões dessa maneira, aplicando os conhecimentos teóricos no momento em que aprendem. Para Lamar et al. (2012), então, o produto final é apenas uma parte do processo, e o conhecimento e as formas de aplicações de aprendizagem do aluno são o objetivo da realização do trabalho.

Max e Karlsson (2009) apresentam o método CDIO (*Conceive, Design, Implement and Operate*), que consiste em formular os objetivos, fazer os cálculos matemáticos para projetos de componentes, montar o circuito e analisar a operação. O desenvolvimento de ideias, dimensionamento de componentes, análise de operação e uso de equipamentos de medição, dão ao aluno a satisfação de ter participado de todo o projeto, adquirindo assim muita experiência. Além disso, permite ao aluno perceber que nem sempre seus componentes projetados são encontrados para compra no comércio. Assim, faz-se necessária uma nova análise para encontrar componentes presentes no mercado.

Como já comentado anteriormente, a criação de um laboratório de experimentos na área de Eletrônica de Potência exige um grande espaço físico e tem um custo muito elevado, além da aquisição de equipamentos de medição e *softwares* de auxílio, dificultando assim sua construção. A alternativa, então, é a criação de *kits* didáticos modulares de baixo custo para equipar um laboratório. Pensando nisso, Martínez et al. (2005) sugerem uma plataforma configurável, integrando *hardware* e *software*, sendo possível escolher um dos tipos de conversores disponíveis, alterar seus parâmetros através de uma interface, verificar o circuito e observar os gráficos de sinais, como sinais de disparos e formas de ondas de corrente e tensão. Seguindo a ideia de laboratórios modulares, Machado et al. (2012) e Susin et al. (2000) também propõem aplicação, identificação e controle em circuitos de eletrônica utilizando diferentes topologias e tipos de cargas. Semelhante a essas ideias, Pérez et al. (2008) propõem a construção de *kits* didáticos com baixa tensão de saída, porém, com alta corrente. Isso permite que os alunos utilizem os *kits* para acionamento e controle de motores de indução trifásicos, por exemplo. O controle é feito em malha aberta, mas também é possível trabalhar em malha fechada. Os autores ressaltam que é muito importante planejar um circuito de proteção, com fusíveis e transformadores isoladores e rebaixadores, procurando eliminar ou minimizar ao máximo os riscos de choques elétricos.

Para a elaboração de projetos de engenharia, Machado et al. (2011 apud Rhem, 1998) cita, entre outros pontos, a importância de encorajar os alunos a aprenderem a se comunicar com seus pares, considerar o balanço de custo e lucro no projeto, encorajar conhecimentos multidisciplinares, enfatizar a ética profissional, instigar o amor pela engenharia e valorizar e reconhecer o papel dos bons professores e orientadores. Na mesma linha de pensamento, Machado et al. (2011 apud Donoso, 2008) considera as aulas de laboratório fundamentais para validação de conhecimentos adquiridos, gerenciamento de trabalho em equipe e de recursos humanos e concepção de soluções em engenharia a partir de situações problemas ou requisitos mínimos, deixando espaço para criatividade.

Bastami et al. (2014) apresentam uma estratégia de projetos mais robusta, para auxílio em modelagem, controle e simulações, que ajuda a melhorar a compreensão sobre *layout*, aterramento, não-linearidade, entre outros fatores do projeto. Os *softwares* de simulação são de grande importância para o aprendizado, pois permitem erros que na vida real causariam danos ao circuito. Porém, essas ferramentas sozinhas não são suficientes, já que apresentam limitações e são baseados em modelos matemáticos.

A modularidade dos *kits* é interessante, pois permite a substituição de componentes defeituosos e a atualização dos módulos. Diversas ponteiros para testes com o uso do

osciloscópio serão acopladas nos *kits*, permitindo medir as variáveis em diferentes pontos do circuito. Essas ferramentas diminuem o tempo de montagem do circuito e auxiliam a melhorar a compreensão dos componentes eletrônicos na disciplina de Eletrônica de Potência.

2.1 SOLUÇÕES COMERCIAIS PARA ENSINO EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

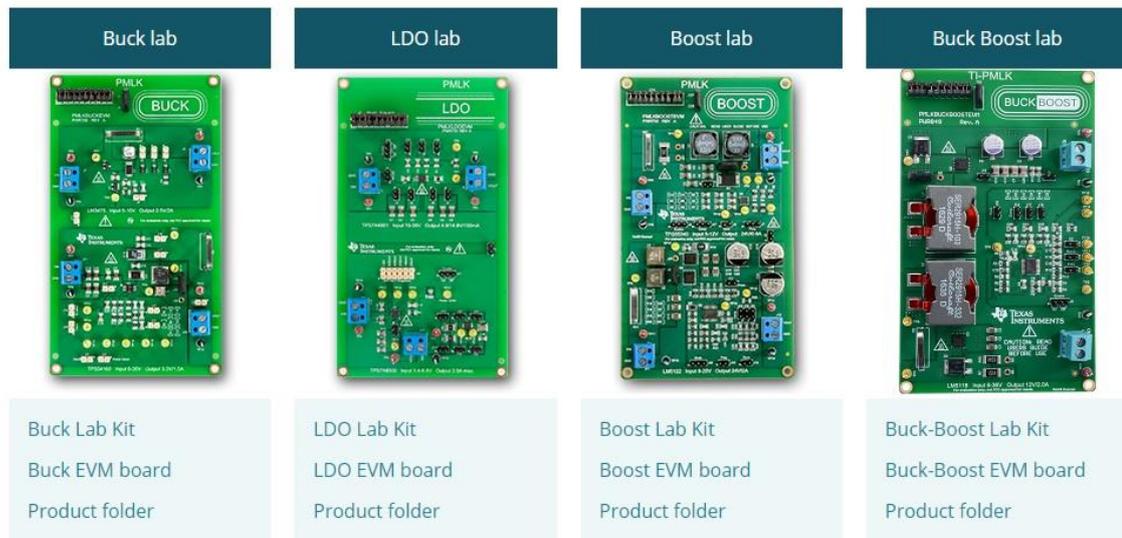
São encontradas no mercado soluções comerciais em *kits* didáticos modulares para o ensino em Eletrônica de Potência. Entre as empresas que oferecem esses produtos estão a *Texas Instruments*[®], empresa de renome mundial, a Exsto Tecnologia[®] com sede em Minas Gerais, a *PowerSIM*[®], que no Brasil é representada pela Ohmini[®], e o Grupo Zilocchi[®], também com sede em Minas Gerais. Os *kits* oferecidos pelas empresas são apresentados a seguir.

2.1.1 Texas Instruments[®] Power Management Lab Kit Series

A empresa norte americana *Texas Instruments*[®] comercializa o *kit* chamado *Power Management Kit Lab* (PMLK). O *kit* possui quatro placas para uso didático, sendo um conversor *Buck*, um *Boost*, um *Buck-boost* e um *LDO*. Todos são conversores CC/CC, não isolados e de baixa potência, com a proposta de oferecer aos alunos um contato com o “mundo real” no que se refere a circuitos eletrônicos. Cada placa é independente, permitindo assim a compreensão mais detalhada por parte do aluno sobre seu funcionamento. Ainda, cada placa é dividida em duas partes, sendo uma o circuito de controle e a outra o circuito de potência. O custo unitário dos conversores *Buck* e *LDO* é de US\$ 59,00, enquanto *Boost* e *Buck-boost* são vendidos por US\$ 99,00, não inclusas taxas de envio e impostos. O *kit* é enviado junto com o material didático de cada placa e com diversos exemplos de experimentos.

As placas são de circuito impresso e permitem ao aluno ver seus componentes e como são projetadas as trilhas de conexão. Isso fornece um conhecimento de *layout* e de montagem do circuito. As placas são de tamanho reduzido, o que facilita o manuseio, porém dificulta as medições. A Figura 1 apresenta os conversores e os *links* dos materiais didáticos.

Figura 1 - Kits didáticos - Texas Instruments®.



Fonte: (Texas Instruments, 2017).

2.1.2 Banco de Ensaio em Eletrônica de Potência da Exsto Tecnologia®

A Exsto Tecnologia® atua no mercado educacional, desenvolvendo *kits* didáticos para uso em ensino nas áreas tecnológicas. O banco de ensaios em Eletrônica de Potência é apresentado em forma modular no modelo XP302. Como descrito no manual do equipamento, esse *kit* permite montar retificadores bifásicos ou trifásicos, controlados ou não, circuito de controle de ângulo de disparo de SCR, inversores trifásicos, controle de motores e conversão CC/CA. O *kit* possui um transformador abaixador de tensão, conjunto de cargas LCR (indutivas, capacitivas e resistivas) fixas e variáveis, e conta com circuito de proteção ao usuário.

A bancada é montada em forma de *rack*, com dimensões de 426 x 575 x 400 mm (L x A x P), o que dificulta sua movimentação, mas atende um grupo maior de alunos. Porém, seus módulos são fechados, sem mostrar os circuitos internos, permitindo ao aluno apenas conectar os cabos nos bornes e fazer ajustes nos parâmetros. A bancada é vendida por R\$ 13.040,00, com o valor do frete e dos impostos já inclusos, e acompanha material didático, treinamento de operação e um ano de garantia (preço proposto para o ano de 2017). A Figura 2 mostra a Banco de Ensaio da Exsto Tecnologia®.

Figura 2 - Bancada de Ensino em Eletrônica de Potência - Exsto Tecnologia®.



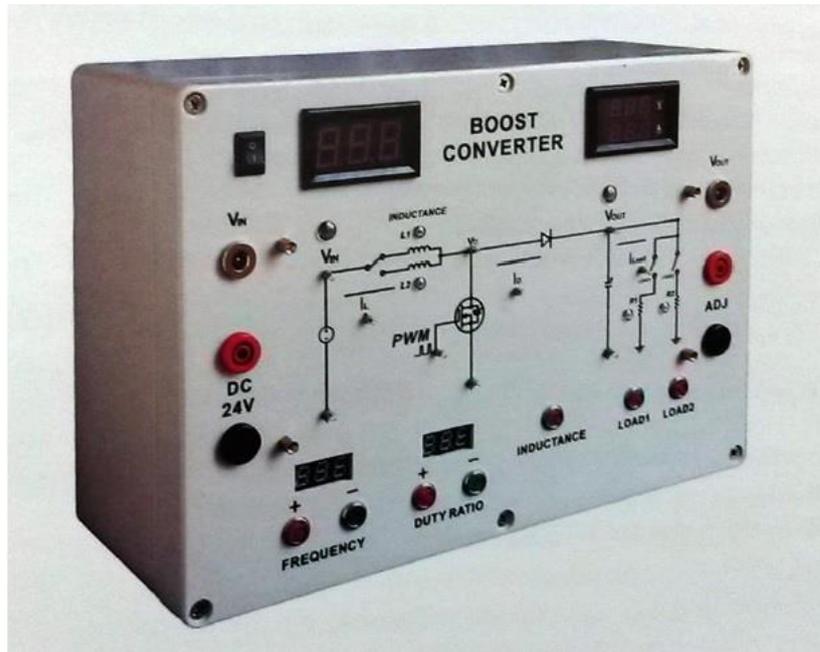
Fonte: (EXSTO TECNOLOGIA, 2017).

2.1.3 *PowerSIM*® Kit de Ensino em Eletrônica de Potência

A empresa Ohmini®, representante de vendas do *kit* da *PowerSIM*® no Brasil, informa que o *kit* foi projetado para servir de auxílio no ensino de Eletrônica de Potência. O *kit* conta com conversores CC/CC, sendo eles um *Boost*, um *Buck*, um *Buck-boost*, um *Flyback* e um *Forward*. O *kit* permite uma análise de cada topologia e seu funcionamento por parte do aluno, porém, restringe muito o que o aluno pode alterar. O *kit* é fechado, permitindo mudar valores de indutância, a carga, variar o *duty-cycle* e alterar a frequência de chaveamento. Estão presentes no *kit* pontos para realizar medições de tensão e corrente, com o uso de multímetro ou osciloscópio.

O *kit* possui dimensões de 270 x 190 x 100 mm (L x A x P), com preço unitário em torno de US\$ 1.990,00, ou então, US\$ 9.950,00 comprando os cinco conversores (OHMINI, 2016). A empresa ainda oferece suporte técnico por um ano, manual de instruções e material didático. Na Figura 3 está ilustrado o conversor *Boost* do *kit* da *PowerSIM*®.

Figura 3 - Conversor Boost do *kit* da PowerSIM® vendido pela Ohmini®.



Fonte: (OHMINI, 2013).

2.1.4 Módulo Didático ZL-POT da Zilocchi®

A Zilocchi® é uma empresa 100% nacional que atua fortemente na fabricação de *kits* didáticos em diversas áreas (eletrônicas analógica, digital e de potência, telecomunicações, entre outros), onde o cliente pode solicitar um produto personalizado de acordo com suas necessidades. O Módulo Didático ZL-POT, de Eletrônica de Potência, é composto por cartões intercambiáveis, acomodados em um *rack* metálico, que são conectados por cabos banana-banana através de bornes de fácil acesso. O *rack* suporta até seis cartões para realizar experimentos, mas a empresa possui mais de dez, permitindo assim uma ampla variedade de ligações e análises de circuitos. O *kit* conta com retificadores (ponte de diodos), filtros e cargas variadas, controle de *duty-cycle* e de frequência, inversores e circuitos de disparos (ZILOCCHI, 2017).

O *rack* possui alças para transporte, pintura eletrostática e pés de borracha antiderrapante, e suas dimensões são de 180 x 485 x 400 mm (A x L x P). O *kit* acompanha material com experimentos teóricos e práticos, além dos cabos para ligações entre os cartões. Como os cartões podem ser comprados separadamente, os preços são bastante variados. Porém, segundo a empresa, um *kit* com seis cartões custa em torno R\$ 15.000,00. A Figura 4 ilustra o ZL-POT.

Figura 4 - Módulo didático ZL-POT da Zilocchi®.



Fonte: (ZILOCCHI, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

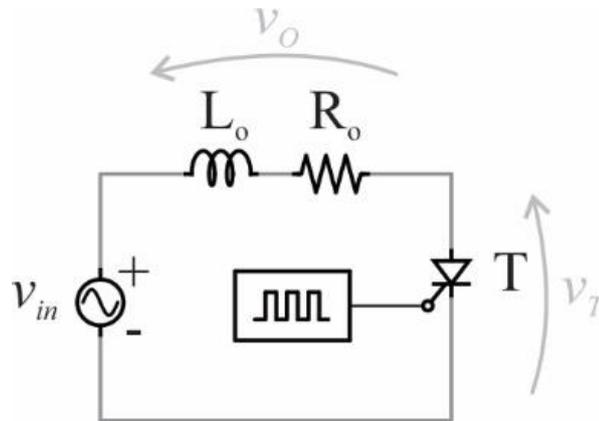
3.1 RETIFICADOR CONTROLADO A TIRISTOR

A energia elétrica é fornecida, essencialmente, por uma rede de distribuição de corrente alternada. Isso se deve ao fato de ser possível adaptar um nível de tensão desejado com o uso de transformadores. Porém, em muitas aplicações, a carga exige uma tensão contínua. Entre algumas aplicações, estão o controle de relés e motores, fontes de tensão regulada e variadores de tensão CC, apresentando uma eficiência elevada, podendo ser de até 95%. Para fazer essa conversão de CA para CC são utilizados conversores chamados de retificadores. Para o presente projeto, será utilizado um transformador para reduzir a tensão de entrada para um nível que seja seguro para o aluno, tornando assim, o sistema isolado.

Para que um tiristor comece a conduzir é preciso que o mesmo esteja diretamente polarizado e receba um pulso de corrente no terminal de gatilho, também chamado de porta ou gatilho. Após isso, tiristor continuará conduzindo mesmo quando o pulso de corrente no gatilho for retirado. O bloqueio do tiristor acontece quando a tensão é invertida, sendo aplicada no catodo, que não permite a passagem de corrente.

Os retificadores podem ser classificados em monofásicos ou trifásicos. Há também uma classificação conforme o tipo de conexão dos elementos retificadores envolvidos, chamados de meia onda ou onda completa (alguns materiais podem apresentar esses termos como meia ponte ou ponte completa). Nesse projeto será construído um retificador controlado, monofásico e configuração meia onda. Será considerado que o modo de condução é descontínuo (DCM – *Discontinuous Conduction Mode*). Na Figura 5 é apresentado como fica o circuito, sendo v_{in} a tensão de entrada do circuito, L_o e R_o a indutância e resistência da carga, T o tiristor, v_o a tensão na carga e v_T a tensão no tiristor.

Figura 5 - Circuito de potência do retificador de meia-onda controlado a tiristor com carga RL.



Fonte: O Autor (2017)

3.2 OPERAÇÃO DO RETIFICADOR CONTROLADO MEIA ONDA

Em regime permanente considera-se que o circuito opera em três etapas, descritas e analisadas a seguir.

3.2.1 Primeira etapa

A primeira etapa começa com o tiristor T bloqueado, pois não recebeu o pulso de disparo no gatilho. Sendo assim, como não há corrente circulando por T , não há corrente chegando na carga $R_o L_o$. Em outras palavras, sem corrente passando pelo indutor L_o e pelo resistor R_o , a tensão de saída v_o é nula, ou seja,

$$v_o = 0 \quad (1)$$

Pela Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT) pode-se compreender que, pela análise no circuito mostrado na Figura 5, tem-se então que

$$-v_m + v_T + v_o = 0 \quad (2)$$

Como v_o é nula, percebe-se que toda a tensão de entrada fica sobre o tiristor T , ou seja,

$$v_m = v_T \quad (3)$$

onde

$$v_{in} = V_{\max} \text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

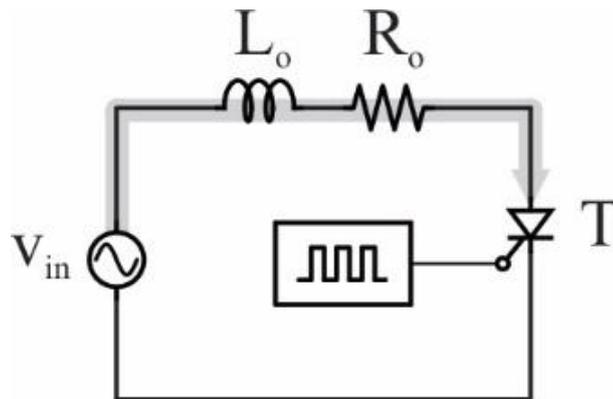
Salienta-se que, na primeira etapa, $v_{in}(t)$ é positiva. Desse modo, T apresenta condições de entrar em condução (pois está diretamente polarizado), porém não conduz por não ter recebido o sinal de comando no terminal de gatilho.

A forma de onda de tensão de entrada senoidal, e um período completo ocorre com ωt variando entre 0 e 2π . Assim, a primeira etapa ocorre em um tempo entre $0 < \omega t < \alpha$, onde α é o ângulo de disparo do tiristor, que é variável de acordo com as especificações do operador para uma faixa de valores entre $0 \leq \alpha < 180^\circ$. Durante essa etapa, como já mostrada na Figura 5, o circuito não apresenta circulação de corrente, isto é,

$$i_o(t) = 0 \quad (5)$$

A Figura 6 apresenta o circuito correspondente à primeira etapa, sendo o caminho em cinza o sentido da corrente.

Figura 6 - Sentido da corrente na primeira etapa.



Fonte: O Autor (2017)

3.2.2 Segunda etapa

Na segunda etapa o tiristor T , diretamente polarizado, recebe um pulso de corrente no gatilho e começa a conduzir. Nesse momento, a tensão sobre ele reduz-se a 0 V e a corrente

sobre a carga $R_o L_o$ gera uma tensão de saída v_o diferente de 0 V. Pela LKT apresentada na equação (2), tem-se que

$$v_{L_o} + v_{R_o} = v_o \quad (6)$$

Esta etapa tem duração para o período $\alpha \leq \omega t \leq \beta$, onde β é o ângulo de extinção da corrente i_o . Como v_o era nula antes de α , pode-se escrever

$$v_o = V_{\max} \operatorname{sen}(\omega t) u\left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right). \quad (7)$$

onde: $u(t - \alpha/\omega)$ é uma função degrau unitário com início em α/ω .

O tiristor permanecerá conduzindo até que a corrente que passa por ele seja reduzida a zero.

Salienta-se que v_o pode ser separada em função da soma das tensões sobre o indutor L_o e sobre o resistor R_o , como descrito a seguir:

$$v_{L_o} = \frac{L_o di_o(t)}{dt} \quad (8)$$

e

$$v_{R_o} = R_o i_o(t) \quad (9)$$

Substituindo essas equações em (6) tem-se que:

$$v_o = \frac{L_o di_o(t)}{dt} + R_o i_o(t) \quad (10)$$

Com o tiristor em condução tensão de entrada v_{in} definida na equação (4), é aplicada sobre a carga $R_o L_o$, de modo que

$$v_o = v_{in} = V_{\max} \operatorname{sen}(\omega t) u\left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right) \quad (11)$$

ou seja,

$$\frac{L_o di_o(t)}{dt} + R_o i_o(t) = V_{\max} \text{sen}(\omega t) u\left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right) \quad (12)$$

para $\omega t \geq \alpha$.

Para resolver a equação da corrente, aplica-se a Transformada de Laplace na equação (12), (considerando as condições iniciais nulas, já que o tiristor encontrava-se bloqueado), resultando em

$$L_o s i_o(s) + R_o i_o(s) = V_{\max} \left\{ \text{sen}(\alpha) \frac{s}{s^2 + \omega^2} e^{\frac{-\alpha}{\omega} s} + \cos(\alpha) \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} e^{\frac{-\alpha}{\omega} s} \right\} \quad (13)$$

Depois de resolver a equação (13), fazendo as manipulações matemáticas necessárias, é feita a Transformada Inversa de Laplace, resultando em

$$i_o(t) = \frac{V_{\max} \text{sen}(\phi)}{Z} \left\{ \begin{array}{l} \text{sen}(\alpha) \left[\text{sen}(\omega t - \alpha) + \text{cotg}(\phi) \cos(\omega t - \alpha) - \text{cotg}(\phi) e^{-\text{cotg}(\phi)(\omega t - \alpha)} \right] + \\ \cos(\alpha) \left[-\cos(\omega t - \alpha) + \text{cotg}(\phi) \text{sen}(\omega t - \alpha) + e^{-\text{cotg}(\phi)(\omega t - \alpha)} \right] \end{array} \right\} \quad (14)$$

onde $Z = \sqrt{R_o^2 + X_{L_o}^2}$, $X_{L_o} = \omega L_o$, $\text{cotg}(\phi) = \frac{1}{\text{tg}(\phi)}$, $\text{tg}(\phi) = \frac{X_{L_o}}{R_o}$, $\text{sen}(\phi) = \frac{X_{L_o}}{Z}$ e $\omega = 2\pi f$.

Para o presente projeto, $f = 60\text{Hz}$ e $t = 1/f$.

A segunda etapa termina quando a corrente i_o volta a valer 0 A. Isso ocorre no instante em que o ângulo de extinção $\beta = \omega t$, sendo β sempre maior que 180° . Para encontrar a solução numérica de β , é usada a equação (14), substituindo i_o por 0 e ωt por β , resultando em

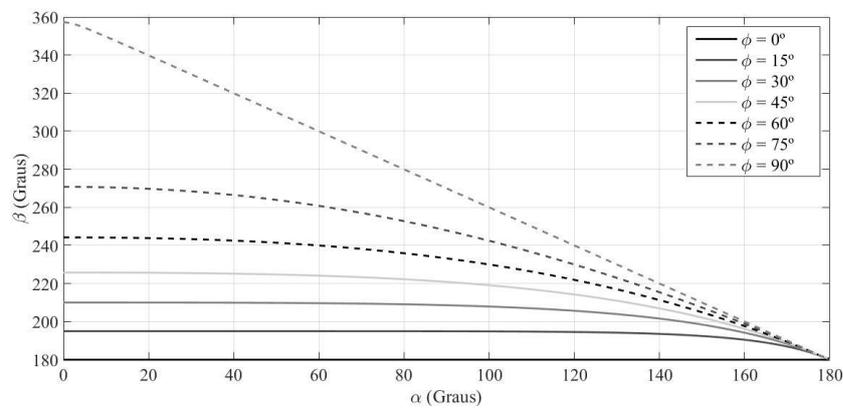
$$0 = \text{sen}(\beta - \alpha) \left[\text{sen}(\alpha) + \cos(\alpha) \text{cotg}(\phi) \right] + \left[\cos(\beta - \alpha) - e^{-\text{cotg}(\phi)(\omega t - \alpha)} \right] \left[\text{sen}(\alpha) \text{cotg}(\phi) - \cos(\alpha) \right] \quad (15)$$

Como visto na equação (15), o ângulo de extinção β é dependente de ϕ e α . Entretanto, esses parâmetros podem variar independentes um do outro, ou seja, para um mesmo ϕ podemos ter inúmeros valores de α . Como dito anteriormente, α pode variar entre 0° e 180° ,

e o ângulo ϕ , que é calculado pela relação entre as impedâncias do indutor e do resistor na carga (ângulo do fator de potência), varia entre 0° e 90° , sendo 0° para uma carga puramente resistiva e 90° para uma carga puramente indutiva.

Para ilustrar como se comportam os valores de β , o Ábaco de Puschlowski representa as curvas $\alpha \times \beta$ para diferentes valores de ϕ . Para melhor compreensão, foram escolhidos apenas alguns valores de ϕ e montado o gráfico apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Ábaco de Puschlowski.

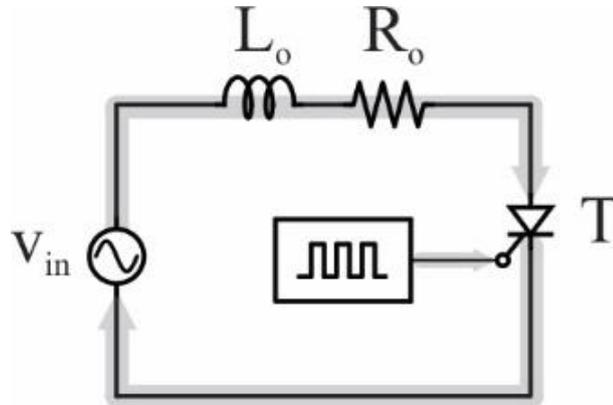


Fonte: O Autor (2017)

É possível ver no gráfico que quando $\phi = 0^\circ$, a carga é puramente resistiva e ângulo de extinção da corrente é 180° no momento em que a corrente pelo tiristor torna-se nula. Quando $\phi = 90^\circ$, a carga é puramente indutiva e o ângulo de extinção da corrente é quase do mesmo tamanho que o ciclo inteiro.

O circuito referente à segunda etapa é mostrado na Figura 8, sendo o caminho em cinza os sentidos das correntes do circuito e do pulso no gatilho.

Figura 8 - Sentido da corrente na segunda etapa.



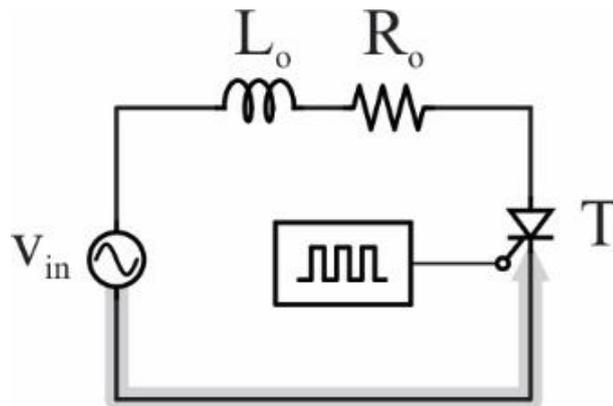
Fonte: O Autor (2017)

3.2.3 Terceira etapa

Esta etapa é semelhante à primeira, porém o tiristor T não conduz corrente pois está reversamente polarizado. A terceira etapa ocorre entre $\beta \leq \omega t \leq 2\pi$, instante em que o ciclo começa a se repetir.

O circuito referente à esta etapa é apresentado na Figura 9, e as equações de tensão de saída e corrente são mostradas em (1) e (5), respectivamente.

Figura 9 - Sentido da corrente na terceira etapa.

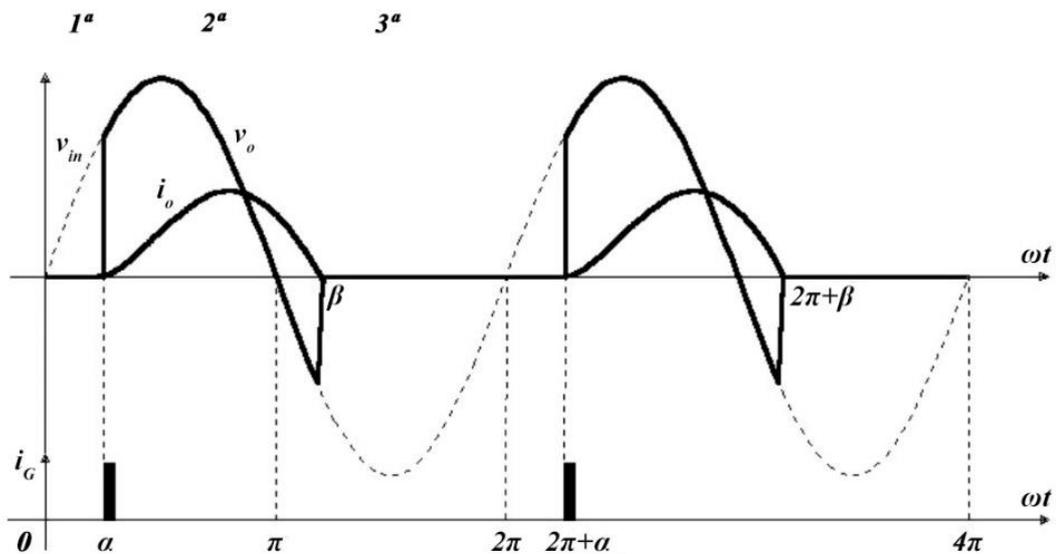


Fonte: O Autor (2017)

3.2.4 Formas de onda

Para uma melhor compreensão do comportamento das formas de onda obtidas nas três etapas, a Figura 10 apresenta os comportamentos de v_{in} , v_o , i_o e i_G (corrente no gatilho do tiristor).

Figura 10 - Formas de onda de v_{in} , v_o , i_o e i_G .



Fonte: O Autor (2017).

3.2.5 Cálculo da tensão média

A tensão média do circuito com onda senoidal é calculada por

$$v_{o,med} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\beta} \sqrt{2}v_o \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (16)$$

Como a tensão média no indutor é nula, a tensão média do retificador é a da resistência. A indutância do circuito provoca uma redução no valor médio da tensão de saída. Manipulando a equação (16) temos que

$$v_{o,med} = \frac{\sqrt{2}v_o}{2\pi} [1 - \cos(\beta)] = 0,225v_o (1 - \cos(\beta)) \quad (17)$$

3.3 PROJETO DOS COMPONENTES DO RETIFICADOR

3.3.1 Projeto de resistência de segurança

Como já apresentado anteriormente, é possível variar o ângulo de disparo do tiristor (α) e o ângulo (ϕ) referente ao fator de potência da carga. Para variar o ângulo ϕ , é preciso modificar o valor de indutância ou de resistência na carga. Assim, foram selecionados quatro casos de combinações entre os valores de L_o para cada R_o que permitem observar os diferentes comportamentos. A impedância de saída é dada por $Z = \sqrt{R_o^2 + X_{L_o}^2}$.

Para uma maior segurança ao aluno, será projetado uma resistência $R_S = 11 \Omega$ em série com a carga que nunca poderá ser desligada. Essa medida faz com que a corrente de saída não alcance valores muito elevados. Essa resistência é composta por dois resistores de $22 \Omega / 25 W$, conectados em paralelo.

A Figura 11 apresenta o resistor selecionado.

Figura 11 - Resistor de segurança.



Fonte: O Autor (2017).

3.3.2 Projeto do indutor

Para que o aluno possa analisar as diferenças em cada configuração de carga do retificador, foram propostos três valores diferentes de indutância. As variações nos valores do indutor resultam em diferentes picos de corrente i_o e de seu valor eficaz (rms), bem como do ângulo de extinção da corrente.

Foi elaborado um *script* utilizando o *software* Matlab[®], onde foi definido um valor de corrente a fim de calcular uma carga $R_o L_o$ genérica. Como este retificador fará parte de um *kit* didático, optou-se por utilizar os mesmos resistores de carga que nos outros conversores,

sendo os mesmos de $10 \Omega / 10 \text{ W}$, que serão apresentados a seguir. Dessa forma, os valores do indutor foram calculados através de $Z = \sqrt{R_o^2 + X_{L_o}^2}$. Os valores obtidos foram $L_1 = 8,5 \text{ mH}$, $L_2 = 21 \text{ mH}$ e $L_3 = 28 \text{ mH}$. Há ainda a possibilidade de o aluno escolher que não haja um indutor no circuito, selecionando o *tap* que equivale a um curto circuito.

Com esses valores calculados foi proposto o indutor apresentado na Tabela 1. A fabricação do indutor foi externa, não sendo realizada pelo autor do projeto.

Tabela 1 - Parâmetros para fabricação do indutor.

Descrição	Valores
<i>Taps</i>	$L_o = 8,5 \text{ mH}; 21 \text{ mH}; 28 \text{ mH};$
Frequência	$f = 60 \text{ Hz}$
I_{rms}	2,2 A
Potência	60 VA

Fonte: O Autor (2017).

A Figura 12 apresenta o indutor que será utilizado no projeto.

Figura 12 - Indutor projetado.



Fonte: O Autor (2017).

3.3.3 Projeto do resistor de carga

Semelhante à proposta de valores de indutores, o aluno também poderá modificar o valor da resistência R_o da carga, o que leva a novas mudanças nos valores de corrente do circuito. Como já foi dito anteriormente, haverá sempre um resistor R_S que nunca será desligado, conectado em série com R_C . Desta forma, foram escolhidas apenas duas outras variações no valor de R_C . Também já foi apresentado o motivo da escolha desses resistores de carga.

A configuração para R_C será feita com dois resistores de $10 \Omega/ 10 \text{ W}$ cada. O aluno poderá escolher se seleciona um único resistor de 10Ω , resultando assim em $R_o = R_S + R_C = 21 \Omega$, ou ainda, escolher que os dois resistores da carga sejam ligados em paralelo, resultando em $R_C = 5 \Omega$ e $R_o = R_S + R_C = 16 \Omega$. Há ainda a configuração que o resistor R_C seja um curto circuito apenas, restando somente o resistor R_S .

As diferentes variações da resistência na carga modificam os valores de pico e eficaz (rms) da corrente. A Figura 13 apresenta o resistor escolhido.

Figura 13 - Resistor de carga selecionado.



Fonte: O Autor (2017).

3.3.4 Dimensionamento do tiristor

Para dimensionar o tiristor necessário foram analisados os valores de I_{rms} e as tensões que o tiristor pode suportar. O tiristor escolhido para o projeto foi o modelo MRC 106, que atende todas as especificações de tensão e corrente necessárias. A Tabela 2 apresenta as especificações do tiristor.

Tabela 2 - Especificações do MCR106.

Descrição	Especificação
Modelo	MCR 106
V_{DM} (Tensão direta máxima)	400 V
V_{RM} (Tensão reversa máxima)	600 V
$I_{rms,max}$	4 A
I_G	100 – 500 μ A

Fonte: O Autor (2017)

A Figura 14 apresenta o tiristor MCR 106.

Figura 14 – Tiristor modelo MCR106.



Fonte: O Autor (2017)

Um das deficiências do SCR é a baixa capacitância interna que ele possui (BRAGA, 2017). Quando a tensão aplicada diretamente polarizada atinge um determinado valor, o tiristor pode começar a conduzir mesmo sem ter recebido o pulso de corrente no gatilho. Isso pode ser resolvido com um circuito de *snubber* composto por um circuito RC entre anodo e catodo do tiristor.

3.4 SIMULAÇÕES COM DIFERENTES CARGAS

O retificador controlado a tiristor permite ao aluno variar a carga R_oL_o e analisar as diferentes formas de onda de i_o , v_o , V_{med} e V_{PRT} . O presente projeto, como dito anteriormente, apresentará três valores diferentes de indutor e dois valores diferentes de resistor, além de poder-se curto-circuitar o indutor e o resistor de carga. Lembra-se ainda que o resistor de segurança R_s ficará sempre ligado. Ainda, serão sempre considerados os piores casos para cada amostra, isto é, quando o disparo do tiristor se dá em $\alpha = 0^\circ$, pois resultam no maior pico de corrente.

A Tabela 3 a seguir apresenta os valores simulados de pico da corrente, valores eficazes, o ângulo de bloqueio β e o valor médio para cada configuração, simulados no *software* PSIM®.

Tabela 3 - Resultados de I_{pico} , I_{rms} , β e V_{med} .

Configuração		I_{pico}	I_{rms}	β	V_{med}
R_o (Ω)	L_o (mH)	(A)	(A)	°	V
11	0	3,86	1,93	180,0	12,6
11	8,5	3,70	1,86	196,5	12,4
11	21	3,22	1,66	215,1	11,8
11	28	2,96	1,55	224,0	11,3
16	0	2,65	1,33	180,0	13,1
16	8,5	2,60	1,30	191,4	12,8
16	21	2,39	1,22	206,1	12,2
16	28	2,26	1,16	213,8	11,9
21	0	2,02	1,01	180,0	13,6
21	8,5	1,99	0,99	188,8	13,4
21	21	1,89	0,96	201,0	12,7
21	28	1,82	0,92	206,8	12,3

Fonte: O Autor (2017).

Analisando a tabela podemos observar alguns comportamentos do circuito, tais como:

- Para cargas puramente resistivas, o ângulo de extinção da corrente (β) será sempre 180°;
- ao aplicar uma carga indutiva no circuito (mantendo a carga resistiva) as correntes de pico e eficaz diminuirão;
- o aumento no valor da carga indutiva diminui ainda mais os valores de corrente;
- quanto maior a carga indutiva, maior é o atraso para atingir o ângulo de extinção da corrente, ou seja, maior é o ângulo β .

Essas são algumas das características que o circuito permitirá ao aluno observar e confrontar os resultados com a teoria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RETIFICADOR CONTROLADO

Com base nos capítulos anteriores, foi possível realizar a escolha dos componentes para a montagem do circuito. A Tabela 4 apresenta os componentes utilizados tanto para o circuito de potência quanto para o de controle.

Tabela 4 - Componentes utilizados para elaboração da PCI.

Componente	Descrição	Modelo
F ₁	Fusível	9 A
D _C	Diodo	1n4002
U ₁	Optoacoplador	4n25
C _T	Capacitor	100 nF
R ₁	Resistor	330 Ω
R _P	Resistor	10 kΩ
R _G	Resistor	27 kΩ
R _T	Resistor	100 Ω
T	Tiristor	MRC 106
Pot	Potenciômetro	0 a 1 kΩ
R _{C1} , R _{C2}	Resistores de Carga	10 Ω / 10 W
R _{S1} , R _{S2}	Resistores de Segurança	22 Ω / 25 W
L ₁ , L ₂ , L ₃	Indutores de Carga	(8,5 mH; 21 mH; 28 mH)
U ₂	Microcontrolador	Arduino [®] Mega 2560

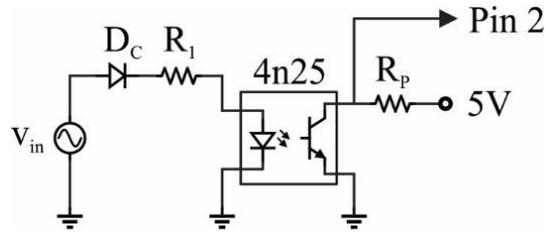
Fonte: O Autor (2017).

4.1.1 Circuito de controle e sincronismo

4.1.1.1 Circuito detector de cruzamento por zero

O circuito de controle é o responsável pelo disparo do tiristor e pela variação do ângulo de disparo α . É composto por duas partes, sendo a primeira delas o circuito detector de cruzamento por zero (ZCD - Zero Crossing Detector). Esse circuito, como apresentado na Figura 15, é responsável por detectar quando a tensão senoidal passar por zero, enviando um sinal ao microcontrolador.

Figura 15 - Circuito detector de cruzamento por zero.

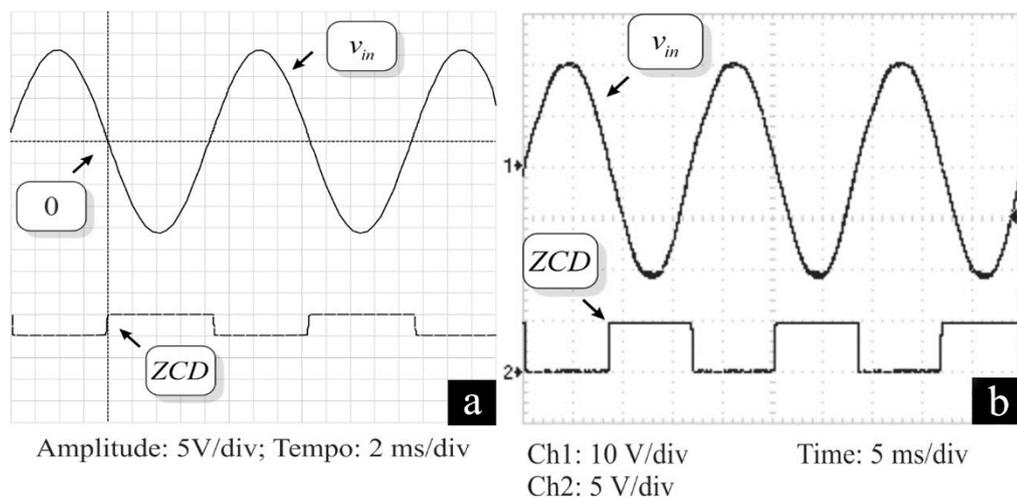


Fonte: O Autor (2017).

Como é possível observar na Figura 15, a tensão de entrada v_{in} é retificada no diodo D_C e passa pelo resistor $R_I = 330 \Omega$ resultando em uma corrente na entrada no optoacoplador 4n25, que contém um LED e um transistor internos. Quando o LED é acionado, o mesmo emite um sinal para o transistor interno. O transistor interno, em configuração coletor-aberto, entra em condução quando recebe o sinal de luz do LED em sua base.

Para alimentar o coletor do transistor, aplica-se uma tensão de 5 V (proveniente do Arduino) através de um resistor de *pull-up* $R_P = 10 \text{ k}\Omega$. O coletor será então responsável por gerar a onda quadrada enviada para o Pino 2 do Arduino. Para fins ilustrativos, essa onda quadrada foi chamada de ZCD. A Figura 16 apresenta as formas de ondas obtidas em simulação e na prática.

Figura 16 - Validação da forma de onda de ZCD. Resultado de simulação (a) e resultado experimental (b).



Fonte: O Autor (2017).

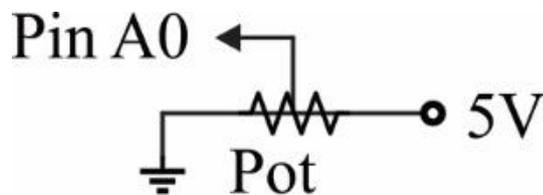
4.1.1.2 Circuito de variação do ângulo de disparo α

Como já explicado anteriormente, o ângulo de disparo α varia entre 0° e 180° , faixa que compreende apenas o semiciclo positivo da onda senoidal de entrada. Para que seja possível variar o ângulo de disparo, foi utilizado um potenciômetro que varia de 0 a 1 k Ω , conectado a um canal A/D. Salienta-se que 0 Ohms resulta na leitura 0 do arduino e 1 kOhm resulta na leitura 1023.

Quando o sinal do *ZCD* está baixo, o Arduino faz a leitura do valor do potenciômetro e o converte para tempo em milissegundos. Assim, quando a leitura do potenciômetro estiver com valor 0, o ângulo α será 0° e o tempo de disparo ocorrerá em 0 ms do semiciclo, e, logicamente, quando o potenciômetro estiver com valor 1023 o ângulo α será 180° e o disparo acontecerá no tempo de 8333 ms. Esse valor é enviado para o Pino A0 do Arduino.

Com o ângulo de disparo definido, o Arduino envia um sinal (pulso) de 5 V pelo Pino 10, com duração de 1 ms que é aplicado ao terminal de gatilho do tiristor. Um resistor de 27 k Ω é utilizado para limitar o valor de corrente no terminal de gatilho. A Figura 17 mostra o esquemático para a variação do ângulo de disparo α .

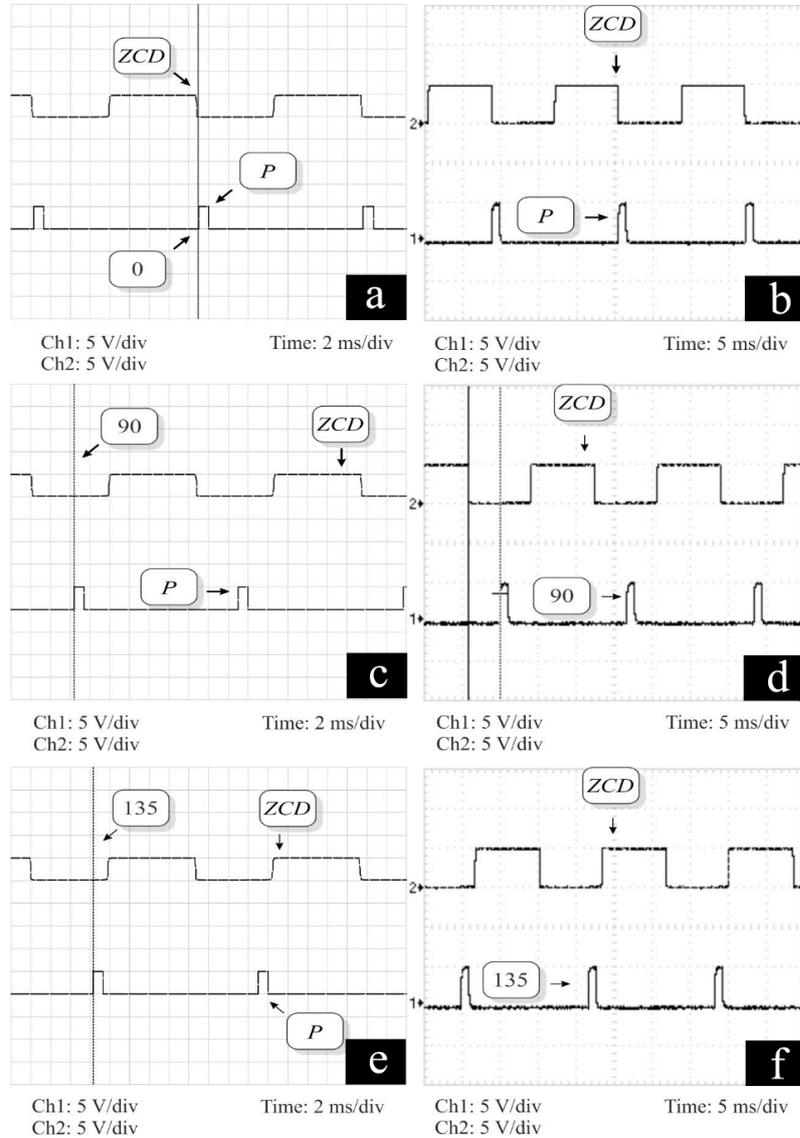
Figura 17 - Circuito de medição do potenciômetro.



Fonte: O Autor (2017)

No Anexo I é apresentado o código escrito para que o Arduino realize essas operações. A Figura 18 apresenta os pulsos enviados para três ângulos distintos.

Figura 18 - Validação das formas de ondas de pulso enviados ao gatilho do tiristor para três ângulos distintos. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $\alpha = 0^\circ$; simulação (c) e experimental (d) para $\alpha = 90^\circ$; simulação (e) e experimental (f) para $\alpha = 135^\circ$.



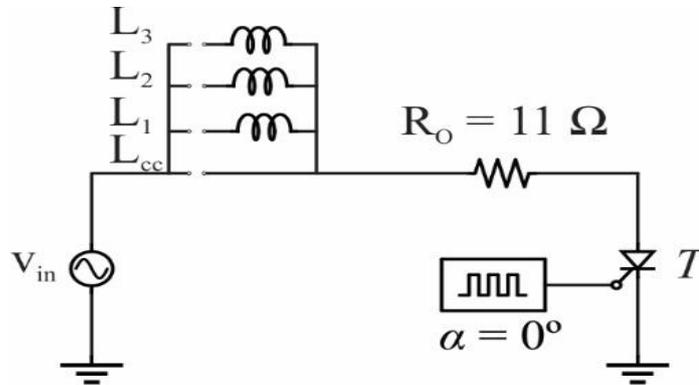
Fonte: O Autor (2017).

4.1.2 Variação paramétrica

Para validar na prática os resultados obtidos em simulações, foram realizados experimentos de análise na forma de onda de corrente que passa no circuito. Os testes foram limitados para $\alpha = 0^\circ$, variando apenas os valores de R_o e L_o . Essa variação resulta em diferentes ângulos de fator de potência ϕ e ângulo de extinção β .

O primeiro experimento consiste em curto-circuitar o R_C e variar os valores de L_o , conforme mostra o circuito de potência na Figura 19.

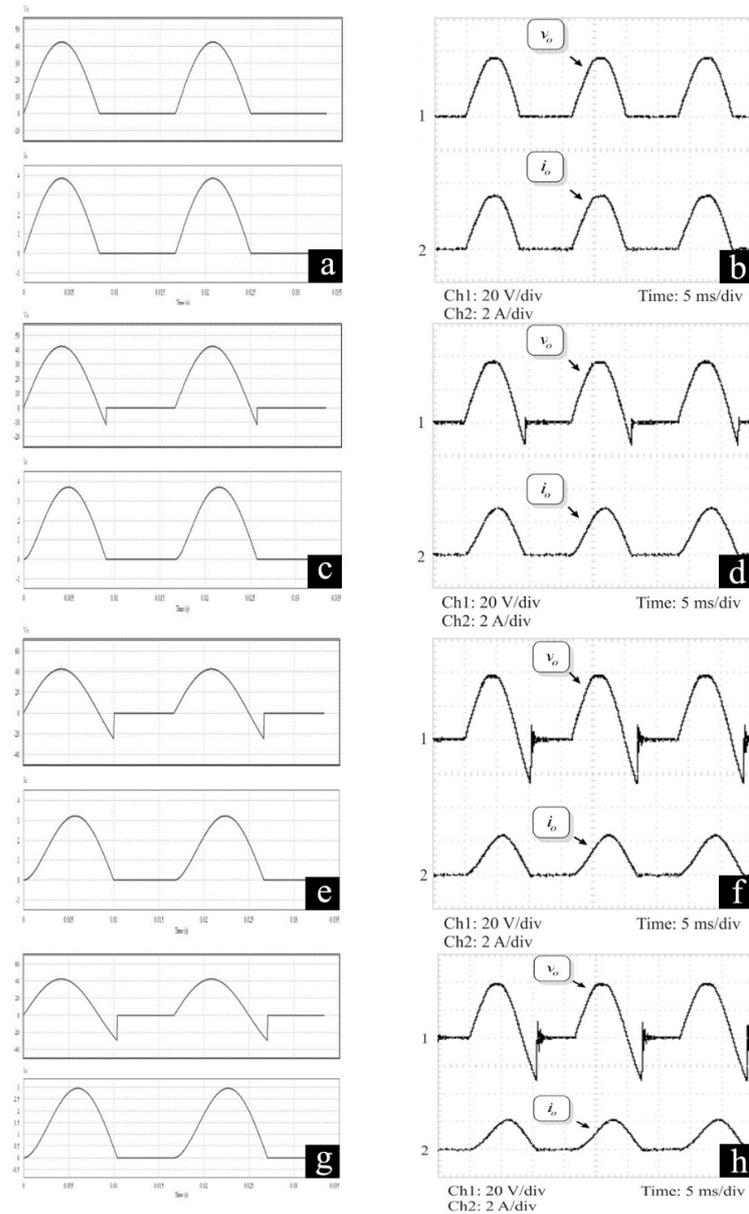
Figura 19 - Circuito de potência para $R_o = 11 \Omega$ e variando L_o .



Fonte: O Autor (2017)

A Figura 20 apresenta as formas de onda quando $R_o = R_S = 11 \Omega$.

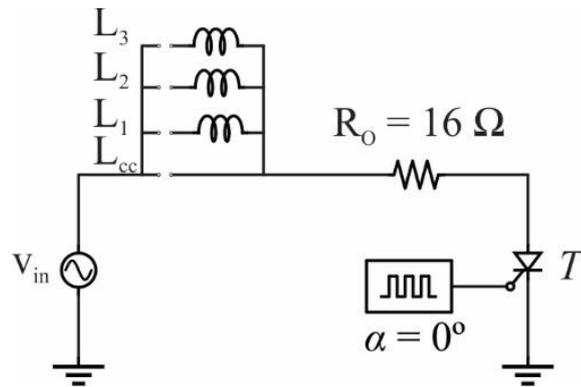
Figura 20 - Validação das formas de onda de v_o e i_o para $R_o = 11 \Omega$. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $L_o = 0$ mH; simulação (c) e experimental (d) para $L_o = 8,5$ mH; simulação (e) e experimental (f) para $L_o = 21$ mH; simulação (g) e experimental (h) para $L_o = 28$ mH.



Fonte: O Autor (2017).

O segundo experimento consiste em conectar $R_C = 5 \Omega$, resultando assim em $R_o = 16 \Omega$, e variar os valores de L_o , conforme mostra o circuito de potência na Figura 21.

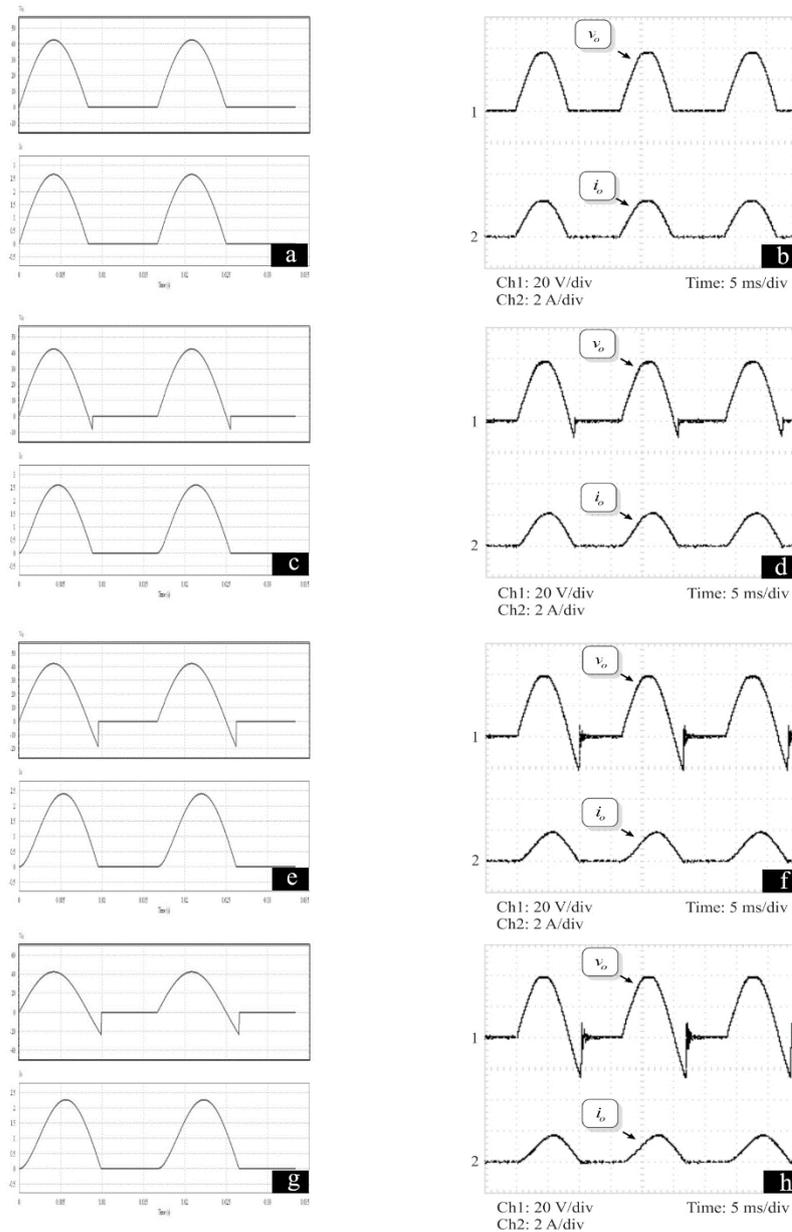
Figura 21 - Circuito de potência para $R_o = 16 \Omega$ e variando L_o .



Fonte: O Autor (2017)

A Figura 22 valida os resultados quando é selecionado $R_C = 5 \Omega$ e, assim, $R_o = 16 \Omega$.

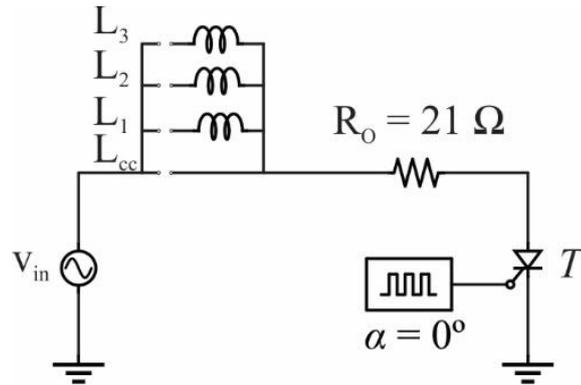
Figura 22 - Validação das formas de onda de v_o e i_o para $R_o = 16 \Omega$. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $L_o = 0$ mH; simulação (c) e experimental (d) para $L_o = 8,5$ mH; simulação (e) e experimental (f) para $L_o = 21$ mH; simulação (g) e experimental (h) para $L_o = 28$ mH.



Fonte: O Autor (2017).

O terceiro experimento consiste em conectar $R_C = 10 \Omega$, resultando assim em $R_o = 21 \Omega$, e variar os valores de L_o , conforme mostra o circuito de potência na Figura 23.

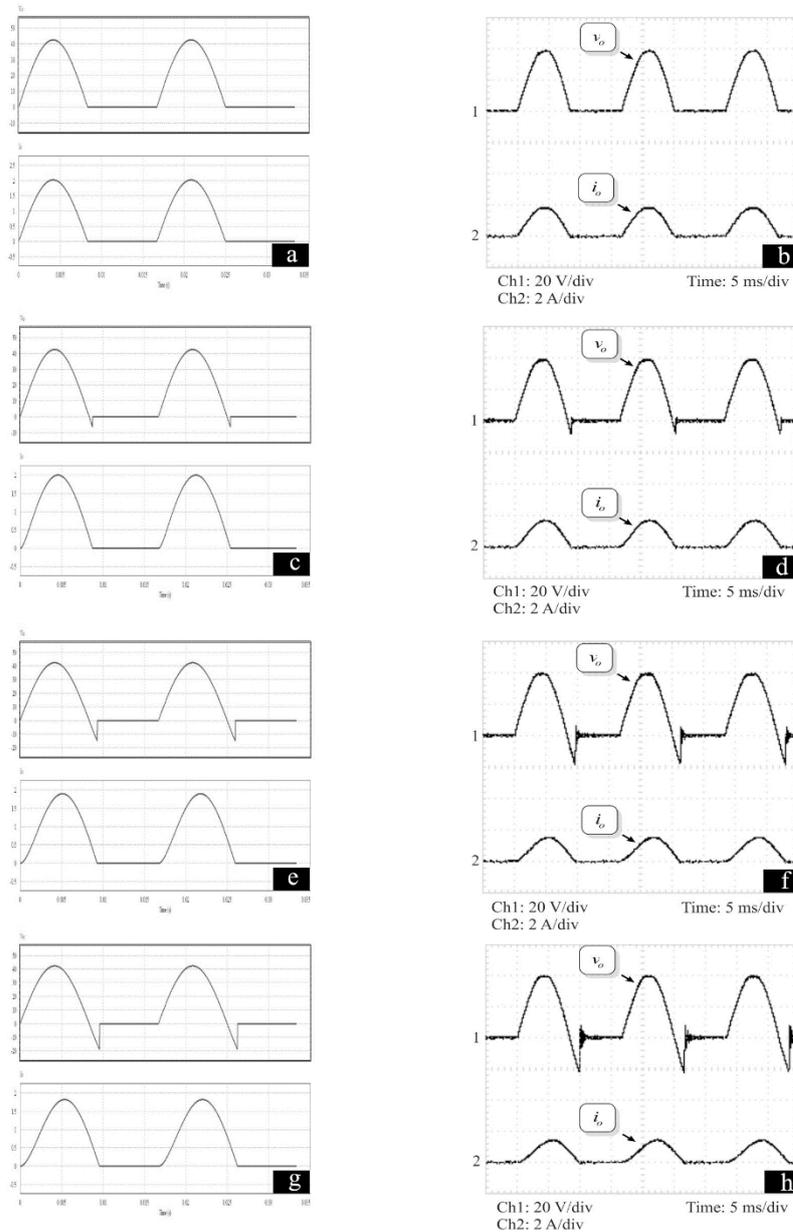
Figura 23 - Circuito de potência para $R_o = 21 \Omega$ e variando L_o .



Fonte: O Autor (2017)

A Figura 24 valida os resultados quando é selecionado $R_C = 10 \Omega$, e assim, $R_o = 21 \Omega$.

Figura 24 - Validação das formas de onda de v_o e i_o para $R_o = 21 \Omega$. Resultados em simulação (a) e experimental (b) para $L_o = 0$ mH; simulação (c) e experimental (d) para $L_o = 8,5$ mH; simulação (e) e experimental (f) para $L_o = 21$ mH; simulação (g) e experimental (h) para $L_o = 28$ mH.



Fonte: O Autor (2017).

Percebe-se que as formas de ondas experimentais obtidas estão muito parecidas com as das simulações, validando assim o funcionamento do circuito. As diferenças podem ser explicadas pelo fato de a simulação considerar componentes ideais e também por não ter sido considerada a impedância que o transformador possui.

Com os resultados obtidos é possível comparar os valores teóricos com os experimentais, analisando as diferenças nos valores das correntes de pico para cada

configuração de carga. Além disso, é possível calcular o ângulo de fase ϕ , relativo aos valores de R_o e L_o , e os valores do ângulo de extinção β .

A Tabela 5 apresenta os valores calculados e medidos para cada configuração de carga $R_o L_o$.

Tabela 5 - Tabela de parâmetros calculados em simulação e experimental.

Configuração de Carga	Ângulo de Fase ϕ (°)	Resultados Simulados		Resultados Experimental	
		I_{pico} (A)	β (°)	I_{pico} (A)	β (°)
R ₁₁ , L ₀	0,00	3,86	180,0	3,65	180,0
R ₁₁ , L ₁	16,24	3,70	196,5	3,27	198,7
R ₁₁ , L ₂	35,74	3,22	216,4	2,86	213,4
R ₁₁ , L ₃	43,82	2,96	223,4	2,53	220,3
R ₁₆ , L ₀	0,00	2,65	180,0	2,44	180,0
R ₁₆ , L ₁	11,32	2,60	191,4	2,28	194,4
R ₁₆ , L ₂	26,32	2,39	206,1	2,04	209,5
R ₁₆ , L ₃	33,41	2,26	213,8	1,84	215,8
R ₂₁ , L ₀	0,00	2,02	180,0	1,92	180,0
R ₂₁ , L ₁	8,68	1,99	188,8	1,80	191,4
R ₂₁ , L ₂	20,66	1,89	201,0	1,64	206,7
R ₂₁ , L ₃	26,69	1,82	206,8	1,60	209,2

Fonte: O Autor (2017).

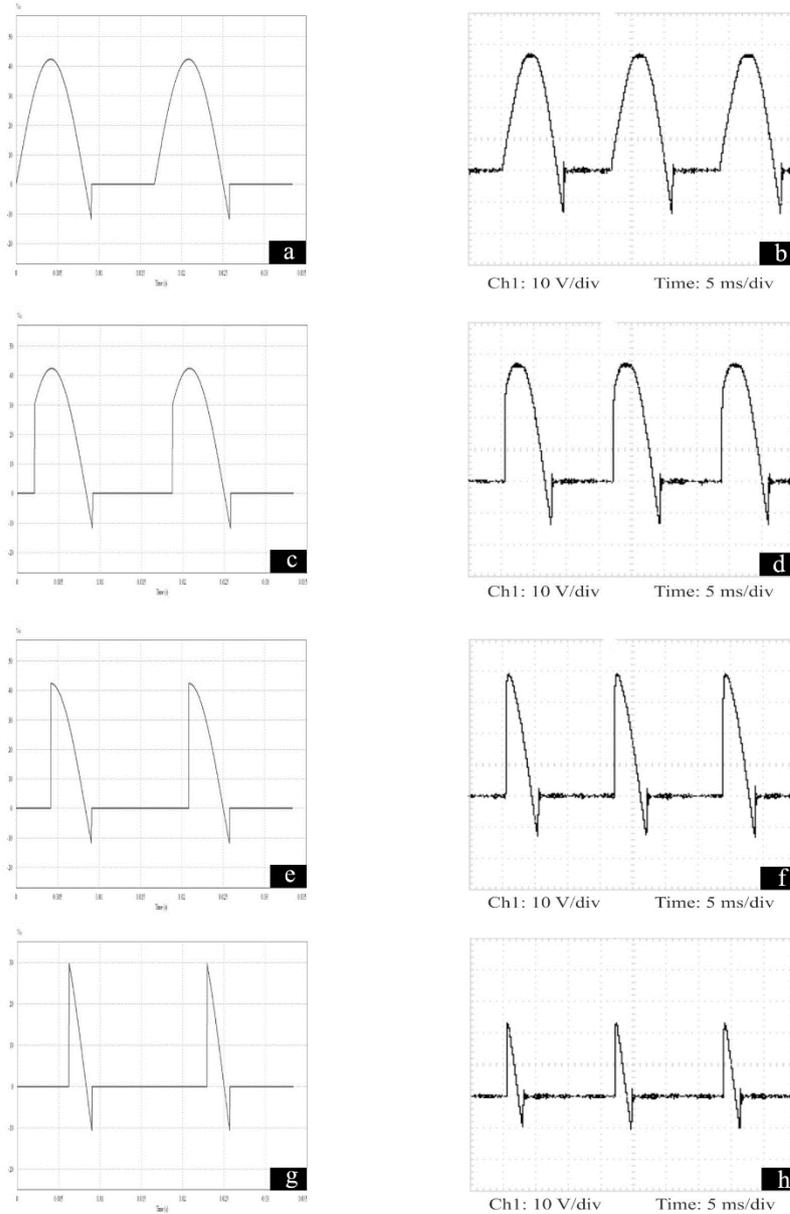
Os resultados experimentais obtidos são próximos dos teóricos, com diferenças causadas por componentes não ideais. Os valores de β experimentais contém arredondamentos, pois a resolução do osciloscópio não permitia uma alta precisão na medição.

4.1.3 Controle de tensão média

Outro experimento realizado em laboratório foi a medição da tensão média. Para tal, foi variado o ângulo de disparo α e mantida como exemplo a configuração de carga com $R_o = 11 \Omega$ e $L_o = 8,5$ mH.

A Figura 25 apresenta as formas de onda de v_o para quatro valores diferentes de α .

Figura 25 - Validação das formas de ondas de v_o para (a) $\alpha = 0^\circ$. (b) $\alpha = 45^\circ$. (c) $\alpha = 90^\circ$. (d) $\alpha = 135^\circ$.



Fonte: O Autor (2017).

É possível observar que as formas de onda estão muito próximas. A Tabela 6 apresenta os valores médios obtidos em simulação e em experimentos realizados.

Tabela 6 - Valores obtidos para tensão média.

Ângulo de disparo α (°)	Resultados Simulados	Resultados Experimentais
	V_{med} (V)	V_{med} (V)
0	13,23	11,70
45	11,23	9,78
90	6,45	5,30
135	1,73	1,69

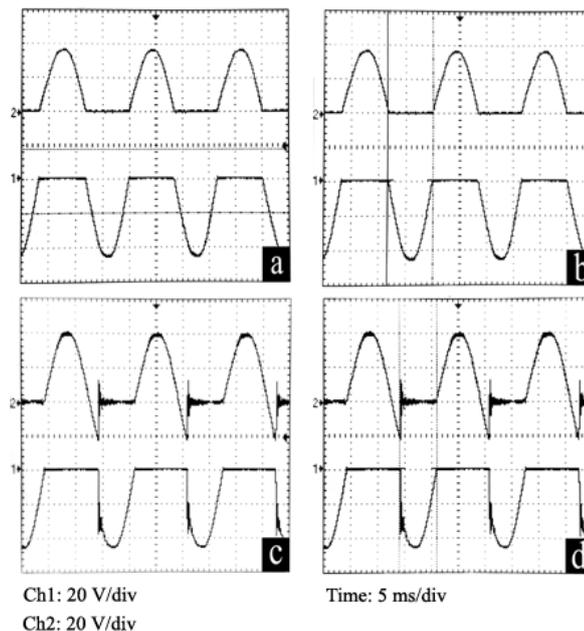
Fonte: O Autor (2017).

Os valores experimentais mais baixos que os teóricos são consequência de a simulação considerar todos componentes ideais e também há a queda de tensão direta no tiristor. Foi analisado também o ângulo de extinção β para cada α , não apresentando variação significativa.

4.1.4 Tensão de pico reversa no tiristor

Foram realizadas medidas de tensão de pico reversa no tiristor. Em ambos experimentos foi definido $\alpha = 0^\circ$. O primeiro experimento foi realizado com $R_o = 11 \Omega$ e $L_o = 0$ mH, e o segundo com $R_o = 16 \Omega$ e $L_o = 21$ mH. A Figura 26 apresenta as formas de onda obtidas.

Figura 26 - Tensão de pico reverso no tiristor



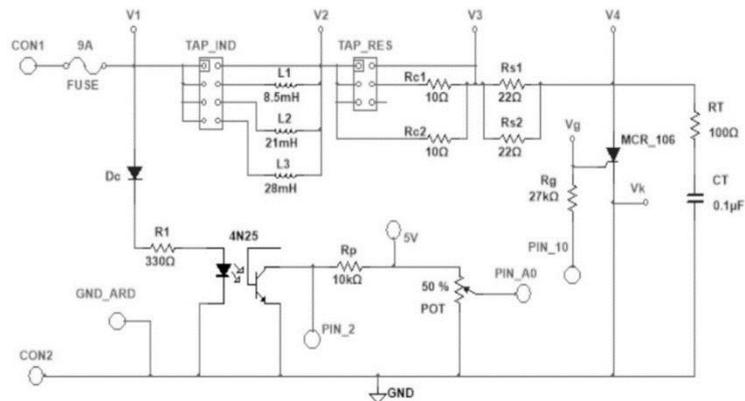
Em que: Ch1 = Tensão reversa no tiristor; Ch2 = v_{in}

Fonte: O Autor (2017).

4.1.5 Placa de circuito impresso

O ponto principal do projeto é a confecção da placa de circuito impresso. Projetada para ser didática, apresenta componentes bem espaçados e com legendas para que o aluno que for operar saiba o que cada componente representa. O primeiro passo é desenhar o esquemático na placa no *software Multisim*[®]. A Figura 27 apresenta o esquemático detalhado.

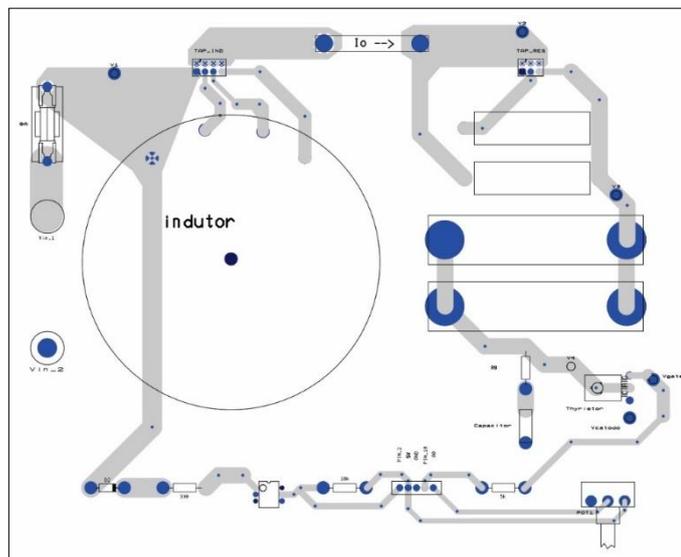
Figura 27 - Esquemático da PCI.



Fonte: O Autor (2017).

Depois a placa foi projetada no *software Ultiboard*[®]. A Figura 28 apresenta o circuito projetado.

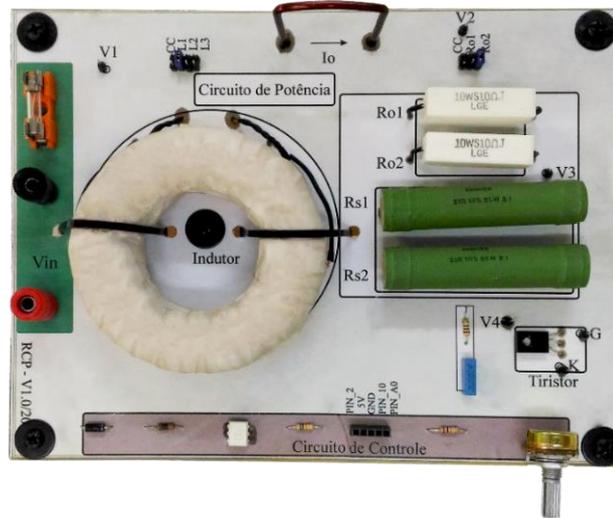
Figura 28 - Projeto da PCI feito no *Ultiboard*.



Fonte: O Autor (2017).

O maior componente da placa é o indutor, com aproximadamente 9 centímetros de diâmetro, tornando assim a placa com dimensões de 210 x 160 mm (C x L). A seguir, a placa foi fresada, adesivada e teve os componentes soldados. A Figura 29 mostra como ficou a placa final, que foi utilizada nos experimentos.

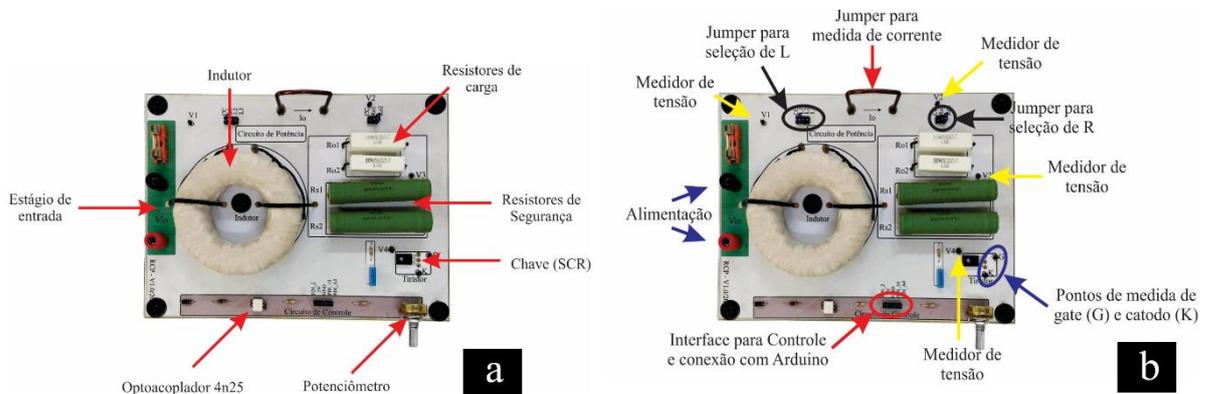
Figura 29 - Retificador controlado a tiristor projetado.



Fonte: O Autor (2017).

Na Figura 30 pode ser visualizado o retificador com a identificação dos principais componentes e pontos de provas.

Figura 30 - Retificador controlado a tiristor com a identificação dos principais componentes (a) e a identificação dos pontos de prova e conectores (b).



Fonte: O Autor (2017).

4.1.6 CUSTO

O custo aproximado do projeto foi de R\$ 365,00, onde estão inclusos os preços da placa de fibra de vidro, o custo da fresagem e da compra dos materiais utilizados.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho proporcionou um melhor entendimento sobre métodos de ensino, especialmente nas áreas de engenharia, onde a realização de experimentos laboratoriais é mais eficaz para que os alunos aprendam na prática o que foi ensinado pelo professor na sala de aula.

Uma análise de mercado foi realizada, onde foi constatado que as soluções presentes no mercado não proporcionam a didática esperada, bem como não apresentam baixo custo. A maioria não permite contato com o circuito, apenas servindo para ligações de cabos, ou apresentam o circuito de modo pouco intuitivo. Por esse motivo, a construção da PCI apresentada nesse trabalho busca diminuir essas deficiências encontradas.

Foi realizado um estudo sobre retificador controlado a tiristor. Foram propostos experimentos. O projeto consistiu em projetar e construir a PCI, definir os componentes adequados para serem utilizados e realizar alguns experimentos que o retificador permite.

Os resultados, em sua maioria, se mostraram satisfatórios. Alguns valores divergentes encontrados podem ser compreendidos pelo fato de os componentes não serem ideais (apresentam perdas) e pela não consideração da impedância do transformador, que causa uma variação nos valores de corrente medidos.

Ficam como propostas futuras a melhoria no *design* da PCI e novos experimentos, para obtenção de diferentes formas de onda e resultados para análise. Recomenda-se também implementar o controle da tensão média sobre a carga em malha-fechada. Ainda, propõe-se que um *gate driver* seja criado para realizar a ligação do circuito em onda completa. Além disso, outras medidas podem ser obtidas, como fator de potência, fator de deslocamento, entre outros, para que os conceitos aprendidos sejam melhores compreendidos, estimulando assim o aluno.

Como a disciplina de Eletrônica de Potência é ampla, uma recomendação é que um projeto semestral seja aplicado ao final da disciplina, variando as configurações para cada grupo. Dessa forma, os alunos poderão comparar os resultados práticos com os aprendidos em sala de aula e, ainda, comparar entre os projetos, para analisar o que as mudanças de carga e ângulo de disparo resultam nas formas de onda e valores obtidos.

REFERÊNCIAS

ANG, S. S. **A Practice-Oriented Course in Switching Converters**. IEEE Trans. on Education, vol. 39, no. 1, pp 14-18, Feb 1996.

BARBI, I. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. Edição do Autor. Florianópolis, SC: 2000.

BASTAMI, A. A; AVESTRUZ, A. T; LEEB, S. B. **Teaching Modeling, Control and Simulation in a Modular Kit for Power Electronics**. COMPEL 2014. 15th IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, Jun 2014.

EXSTO TECNOLOGIA. **Banco de Ensaio para Eletrônica de Potência**. 2017.

INSTITUTO NCB, 2017. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/9502-como-funciona-o-scr-art1902>. Acessado em 20 de dez. de 2017.

LAMAR, D. G. et al. **Experiences in the Application of Project-Based Learning in a Switching-Mode Power Supplies Course**. IEEE Trans. on Education, vol. 55, pp 69-77, Feb 2012.

MACHADO, P. F; CARMO, M. J; OLIVEIRA, A. R; DE FARIA, A. L; **Educação em Eletrônica de Potência: A Problemática entre Teoria e Prática e a Carência de Recursos Laboratoriais**. Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Blumenau - SC, 2011.

MACHADO, P. C. F; COSTA, I. A; CARMO, M. J; **Desenvolvimento de Laboratório Modular para Aprimoramento de Competências e Habilidades em Eletrônica de Potência**. Anais: XL Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia. Belém - PA, 2012.

MARTÍNEZ, J. M. et al. **A New Approach for Teaching Power Electronics Converter Experiments**. IEEE Trans. on Education, vol. 48, no. 3, pp 513-519, Aug 2005.

MAX, L; KARLSSON, R. **Power Electronics Design Laboratory Exercise for Final-Year M.Sc. Students**. IEEE Trans. on Education, vol. 52, no. 4, pp 524-531, Nov 2009.

OHMINI. **Eletrônica de Potência**. 2013.

PÉREZ, D. et al. **Training kit for power electronics teaching**. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, pp 3541-3545, 2008.

SUSIN, R. M. et al. **Laboratório de Ensino da Eletrônica de Potência – Uma Experiência Construída Para e Pelos Estudantes**. Porto Alegre, 2000.

TEXAS INSTRUMENTS, 2017. Disponível em: <https://university.ti.com/faculty/teaching-materials-and-classroom-resources/ti-based-teaching-kits-for-analog-and-power-design/power-management-lab-kit-series>. Acesso em 24 de abr. de 2017.

ZILOCCHI, 2017. Disponível em: <http://www.zilocchi.com.br/produtos/modulos-didaticos/eletronica-de-potencia/eletronica-de-potencia/>. Acesso em 25 de abr. de 2017.

ANEXO I - ALGORITMO DE CONTROLE E SINCRONISMO UTILIZADO NO RETIFICADOR

```
//-----//
//          Universidade Federal de Santa Maria          //
//          Centro de Tecnologia                          //
//          Engenharia de Controle e Automação           //
//          Ricardo Cesar Pitol                          //
//          Prof. Rafael Concatto Beltrame              //
//          Versão: 1.4                                  11/12/2017 //
//=====//
//  Circuito de detecção de cruzamento por zero e envio de pulso //
//=====//
//  Declaração das variáveis //
//-----//

int ler_pot = A0; // Pino de leitura do valor do potenciômetro
int pin_cruz = 2; // Pino de entrada do sinal do 4n25
int pin_disp = 10; // Pino que envia o sinal de pulso para o tiristor
int potenciometro = 0; // Valor inicial do potenciômetro

//-----//
//  Rotina de configuração //
//-----//

void setup() {

  pinMode(pin_cruz,INPUT); // Define pin_cruz como entrada
  pinMode(pin_disp, OUTPUT); // Define pin_disp como saída
  Serial.begin(115200);
}

//-----//
//  Rotina principal //
//-----//
// Loop infinito

void loop() {

  digitalWrite(pin_disp,LOW); // Disparo começa em valor baixo

  while(digitalRead(pin_cruz)==0); // Aguarda o ciclo em andamento finalizar.
  while(digitalRead(pin_cruz)==1); // Aguarda o início do próximo ciclo.

  potenciometro = analogRead(ler_pot); // Lê o valor do potenciômetro lido na porta A0.
  int tempo_disparo = map(potenciometro, 0, 1023, 0, 8333);
  // Mapeia o valor para 0-8333 (Tempo aproximado de 1/2 ciclo)
  delayMicroseconds(tempo_disparo); // Espera o tempo calculado.

  digitalWrite(pin_disp, HIGH); // Envia o sinal de disparo para pin_disp.
  delayMicroseconds(1000); // Tempo para o SCR identificar o pulso.
  digitalWrite(pin_disp, LOW); // Retira o sinal do disparo.
}
}
```