

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GABRIEL GONÇALVES DE ARAÚJO OLIVEIRA  
MARCUS VINÍCIUS ADAUTO ALVES DE OLIVEIRA**

**UTILIZAÇÃO DO SIMSCAPE / MATLAB COMO FERRAMENTA  
EDUCACIONAL PARA O ESTUDO DE CIRCUITOS EM  
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

**VOLTA REDONDA  
2021**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**UTILIZAÇÃO DO SIMSCAPE / MATLAB COMO FERRAMENTA  
EDUCACIONAL PARA O ESTUDO DE CIRCUITOS EM  
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), disciplina Metodologia de Projetos de Sistemas Industriais, submetida à aprovação pela banca do curso de Engenharia Elétrica do UniFOA.

Discentes:

Gabriel Gonçalves de Araújo Oliveira  
Marcus Vinícius Adauto Alves de Oliveira

Orientador:

D. Sc. Péricles Guedes Alves

**VOLTA REDONDA  
2021**



Dedicamos essa monografia primeiramente à Deus, nossa família, e todas as pessoas que permaneceram ao nosso lado ao longo de toda a trajetória acadêmica.

Agradecemos a todo corpo docente da UniFOA, por toda disposição, confiança e especialmente por todos os ensinamentos.

“Tudo o que temos de decidir é o que  
fazer com o tempo que nos é dado. “

Gandalf

## RESUMO

Essa monografia tem como objetivo analisar o comportamento de circuitos utilizando o programa de simulação computacional Simscape/Matlab, a fim de utilizá-lo como mecanismo educacional para o estudo da matéria de Eletrônica de Potência. Os conversores utilizados como exemplo base, foram escolhidos seguindo o critério das quatro conversões básicas da Eletrônica de potência: Retificador CA-CC, Controlador CA-CA, Chopper Buck CC-CC e Inversor CC-CA, que foram extraídos do livro-texto Hart, Daniel W. (2012). Com o intuito de validar as simulações realizadas na plataforma Simscape, alguns exercícios relacionados aos conversores foram selecionados a fim de comparar e analisar os resultados. Todos os cálculos utilizados foram implementados tendo como base o *Workspace* do programa Matlab. Com a grande demanda no mercado de tecnologia do mundo contemporâneo na qual vivemos, é de suma importância que um produto seja desenvolvido rapidamente e com total segurança. Utilizando bons modelos de simulações computacionais, há uma grande chance de um protótipo criado em simulação ter sucesso quando executado com componentes físicos reais.

Palavras-chaves: Eletrônica de Potência, Simulação, Conversores.

## **ABSTRACT**

This monograph has the objective of analyzing the behavior of circuits using the computer simulation program Simscape/Matlab, in order to use it as an educational mechanism for the study of the Power Electronics subject. The converters used as example base were chosen following the criteria of the four basic conversions of power electronics: AC-DC rectifier, AC-AC controller, DC-DC Buck Chopper and DC-AC Inverter, which were extracted from the textbook Hart, Daniel W. (2012). In order to validate the simulations performed in the Simscape platform, some exercises related to the converters were selected in order to compare and analyze the results. All calculations used were implemented based on the Matlab Workspace program. With the great demand in the technology market of the contemporary world in which we live, it is of utmost importance that a product be developed quickly and with total safety. By using good computer simulation models, there is a great chance that a prototype created in simulation will be successful when run with real physical components.

Keywords: Power Electronics, Simulation, Converters.

## SUMÁRIO

<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
<b>1.1. Simulação computacional</b> .....	14
<b>1.2. Revisão Histórica</b> .....	16
<b>1.3. Simulação</b> .....	17
<b>1.4. Simulink</b> .....	17
<b>1.5. Simscape</b> .....	18
<b>1.6. Modelagem de Rede Física</b> .....	19
<b>1.7. Eletrônica de Potência</b> .....	20
<b>1.8. Conversores</b> .....	21
<b>1.8.1. Retificador CA/CC:</b> .....	21
<b>1.8.2. Inversor CC/CA:</b> .....	22
<b>1.8.3. Chopper CC/CC:</b> .....	23
<b>1.8.4. Controlador CA/CA:</b> .....	23
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	24
<b>2.1. Relação dos circuitos escolhidos do livro e simulados com PSpice</b> .....	24
<b>2.1.1. Retificador de meia onda controlado</b> .....	24
<b>2.1.2. Controlador de tensão monofásico CA-CA</b> .....	25
<b>2.1.3. Conversor Chopper Buck</b> .....	26
<b>2.1.4. Inversor de onda quadrada com carga RL</b> .....	27
<b>2.2. Criação de diagramas no Software Simscape</b> .....	27
<b>2.3. Elaboração dos diagramas criados e obtenção de resultados gráficos e numéricos</b> .....	29
<b>2.3.1. Elaboração do retificador de meia onda controlado</b> .....	30
<b>2.3.2. Elaboração do controlador de tensão monofásico CA-CA</b> .....	31
<b>2.3.3. Elaboração do Conversor Buck</b> .....	32
<b>2.3.4. Elaboração do inversor de onda quadrada com carga RL</b> .....	33
<b>2.4. Análise comparativa dos resultados Simscape com os existentes no livro-texto</b> .....	34
<b>3. RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	36
<b>3.1. Retificador de meia onda controlado</b> .....	36
<b>3.2. Controlador monofásico com carga RL</b> .....	38
<b>3.3. Conversor Buck</b> .....	40
<b>3.4. Inversor de onda quadrada</b> .....	42
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	45
<b>5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	46
<b>6. APÊNDICES</b> .....	47

<b>Apêndice A</b> – Cálculos Retificador de meia onda.....	47
<b>Apêndice B</b> – Cálculos Controlador de tensão monofásico .....	49
<b>Apêndice C</b> – Cálculos Conversor Buck.....	51
<b>Apêndice D</b> – Cálculos Inversor de onda quadrada .....	53

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Circuito teórico retificador monofásico de meia onda controlado.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2: Circuito teórico inversor CC/CA.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 3: Circuito teórico conversor buck CC/CC.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4: Circuito teórico controlador CA/CA.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5: Retificar de meia onda controlado.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 6: Controlador de tensão monofásico CA-CA.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 7: Conversor Buck.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 8: Inversor de onda quadrada com carga RL.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 9: Retificador de meia onda controlado simulado no Simscape.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 10: Controlador de tensão monofásico CA-CA simulado no Simscape.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 11: Conversor Buck simulado no Simscape.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 12: Inversor de onda quadrada com carga RL simulado no Simscape.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 13: Formas de onda do Retificador de meia onda CA-CC (a) Gráfico teórico (Hart, Daniel W. 2012) (b) Gráfico dos resultados a partir do programa Simulado pelo Simscape (Autor).....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 14: Formas de onda do Controlador monofásico CA-CA (a) Gráfico teórico (Hart, Daniel W. 2012) (b) Gráfico dos resultados a partir do programa Simulado pelo Simscape (Autor).....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 15: Formas de onda no Conversor Buck.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 16: Forma de onda ampliada na saída do Conversor Buck.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 17: Forma de onda do Inversor de onda quadrada CC-CA (a) Gráfico teórico (Hart, Daniel W. 2012) (b) Gráfico dos resultados a partir do programa Simulado pelo Simscape (Autor).....</b>	<b>43</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos Simscape do retificador de meia onda controlado.....	38
Tabela 2 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos no Simscape do controlador monofásico com carga RL.....	40
Tabela 3 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos Simscape do conversor Buck.....	42
Tabela 4 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos no Simscape do inversor de onda quadrada.....	43



## **1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão apresentadas algumas vantagens de se simular circuitos eletrônicos através do ambiente de simulação Simscape/Matlab a fim de utilizá-lo como ferramenta educacional para o estudo de circuitos de Eletrônica de Potência. Será feita também, uma breve revisão histórica sobre a Simulação de Circuitos em computadores, citando-se as principais características do programa Simscape, com a descrição dos tipos de análises a serem feitas. Uma pequena apresentação resumida dos principais circuitos da Eletrônica de Potência será apresentada, sendo eles: Retificador CA-CC, Controlador CA-CA, Buck CC-CC e o Inversor CC-CA.

### **1.1. Simulação computacional**

A necessidade da utilização de sistemas computacionais que servem para a análise das condições de funcionamento de circuitos eletrônicos é cada dia mais evidente para todos os profissionais na qual se dedicam à tarefa de projetar circuitos integrados. No caso de circuitos eletrônicos tradicionais, ou seja, compostos por elementos discretos. É normalmente possível, apesar de levar muito tempo e disponibilizar de muitos recursos, que sejam desenvolvidos um ou mais protótipos do circuito idealizado, com o intuito de analisar o projeto.

Nestes protótipos são extraídas em análises, as medições e testes, na qual muitas vezes tornam-se necessárias trocas de componentes até se obter uma versão final satisfatória, cujo objetivo se aproxime do desejado. Trazendo este mesmo raciocínio ao mundo das simulações de projetos de circuitos integrados, conseguimos observar que há uma impossibilidade de seguir um mesmo procedimento. Considerando-se que a fabricação de um circuito integrado envolve uma série de fases com uma tecnologia complexa e cara, a construção de um protótipo deve ser minimizada e ser bem precisa.

Uma outra observação é na impossibilidade de ser realizada a “troca” de um transistor no interior de um circuito integrado ou até mesmo de se refazer uma trilha esquecida entre os componentes. Além disso, as medições para a extração de parâmetros dentro desses circuitos integrados, ainda que possível, exige um problema de acesso e requer instrumentação com um alto grau de complexibilidade. Isso quer dizer que, é fundamental que um projetista saiba como seu circuito integrado irá reagir antes mesmo de tentar fabricá-lo.

Vale uma observação de que a maioria dos sistemas de simulação de circuitos integrados eletrônicos foram originalmente desenvolvidos tendo em vista uma análise de sistemas de razoável complexidade, mesmo assim é acessível a criação e análise de quaisquer circuitos com tais programas. Todavia nem sempre foi assim, os primeiros programas criados com a finalidade da simulação de circuitos integrados necessitavam de computadores de grande porte, o que infelizmente não era acessível a todos, limitando assim sua utilização a grandes empresas ou a Centros de Pesquisas. No momento em que houve uma disponibilidade de microprocessadores e programas para a simulação, que funcionavam em microcomputadores de custo acessível, as vantagens para a simulação abriram-se a todos os níveis de qualquer sistema eletrônico. Dentre essas vantagens podemos citar:

- O desenvolvedor projetista pode averiguar, dentre diversas configurações disponíveis, qual irá apresentar um melhor desempenho adequado a aplicação desejada.
- Como não há mais a necessidade da construção física de um protótipo e de realizar diversos testes e medições em laboratórios, é claramente desnecessário possuir ou obter componentes físicos para montagens experimentais.
- Todos os componentes encontrados na biblioteca do programa funcionam conforme o previsto e não “queimam” diminuindo assim o desperdício em relação aos fatores tempo e dinheiro.

Quando realizamos a montagem de um protótipo em um Laboratório de Eletrônica, existe sempre a possibilidade de nos deparar com alguns componentes que possam vir defeituosos ou com especificações diferentes daquelas constatadas nas folhas de fados. Assim, bem diferente da simulação, se o protótipo criado não tiver o funcionamento esperado não se saberá com total certeza se tal se deve a:

- Provável erro de projeto;
- Montagem incorreta;
- Componentes defeituosos ou fora da característica (especificação).

Existe a possibilidade de se fazer várias medições no circuito projetado, mesmo que se encontre um pouco de dificuldade, seja por excesso de ruído ou carga excessiva no circuito, a não ser que não se tenha o equipamento necessário. Porém é perfeitamente viável com o auxílio de um simulador fazer experiências, tais como a troca de valores dos componentes ou até realizar movimentações de configuração de

componentes, por mais heterodoxas que sejam, sem medo de danificar o circuito ou os equipamentos de teste.

A atual disponibilidade de modernos programas de microcomputadores tem possibilitado notáveis implicações também no ensino da Eletrônica. Com o objetivo original de ser usado como ferramenta para pesquisas e projetos com maior grau de complexibilidade de circuitos integrados, os simuladores estão atualmente sendo largamente usados nos planos de ensino dos cursos de Engenharia. Muitas universidades cada vez mais vêm adotando programas de simulação como auxiliares didáticos em suas disciplinas de análise de circuitos eletrônicos e de projetos de circuitos. Pode-se observar que o uso destas plataformas de simulação está longe de ser um modismo passageiro nos cursos de graduação de Engenharia Elétrica, pois existe uma crescente tendência de se enfatizar cada vez mais o ensino de forma técnica de projetos, nos quais os microcomputadores e *workstations* são vias de inestimável valor.

## **1.2. Revisão Histórica**

Até o ano de 1960 a única possibilidade de se analisar o funcionamento de grandes redes de circuitos elétricos em regime senoidal, era através do auxílio de computadores analógicos, compostos de um vasto conjunto de amplificadores e elementos lineares, articulados por cabeamentos e interruptores. Com a chegada dos computadores digitais e principalmente das linguagens de programação mais acessíveis, tal como a FORTAN (*FORmula TRANslation Language*), foram realizadas várias tentativas da utilização de computadores para a resolução dos sistemas de equações relacionadas a estes circuitos elétricos.

O MATLAB hoje em dia é conhecido pelo seu ambiente técnico de computação completo, mas nem sempre foi assim. Ele começou como um comum “Laboratório de Matrizes”. Três Homens exerceram papéis importantes nas origens do programa MATLAB, John Todd, George Forsythe e J. H. Wilkinson, mas só no final dos anos 1970 Cleve Moler, então presidente do departamento de Ciência da Computação da Universidade do Novo México, usando partes do LINPACK e EISPACK desenvolveu a primeira versão do MATLAB.

Mais adiante, Jack Little, um engenheiro, teve conhecimento da linguagem MATLAB quando Moler fez uma visita a Universidade de Stanford em 1983. Little

então, reconheceu todo o seu potencial comercial e se juntou a Moler e Steve Bangert para poder reescrever o *software* em linguagem C. Já em 1984 fundaram a *MathWork* e deram continuidade no seu desenvolvimento. Uma observação é que as bibliotecas que foram reescritas (LINPACK e EISPACK) foram renomeadas para LAPACK que foi acrescentado ao MATLAB na sua versão de 2000.

### **1.3. Simulação**

Na atualidade os simuladores de circuitos eletrônicos são em sua maioria ferramentas extremamente poderosas e indispensáveis, capazes de otimizar, intensificar e melhorar o trabalho de um engenheiro. A utilização e a análise de forma correta da simulação de um circuito eletrônico, pode trazer uma infinidade de informações sobre o seu funcionamento, muito além das obtidas nos cálculos manuais, além de incitar significativamente o processo de desenvolvimento do circuito.

No atual cenário da Engenharia e com as demandas do mundo contemporâneo, é de suma importância que um produto seja desenvolvido rapidamente e sem apresentar falhas. E neste aspecto, o uso de softwares de simulação de circuitos aliados a profissionais de Engenharia competentes, fazem toda a diferença. No passado os circuitos eram testados e otimizados utilizando componentes físicos reais após longos cálculos, nisso se perdiam demasiadamente tempo e dinheiro. Utilizando-se de bons modelos e simulações coerentes há uma grande possibilidade de que um protótipo criado em um software de simulação funcione quando implementado com componentes reais, poupando assim os recursos disponíveis.

### **1.4. Simulink**

O Simulink é uma ferramenta de simulação integrada ao programa MATLAB onde se utilizam diagramas de blocos para se reproduzir diversos sistemas dinâmicos existentes no mundo real.

Neste sentido uma grande diversidade de processos pode ser testada e projetada, como por exemplo de: comunicação, controle, processamento de sinais, logística, dentre outros.

O Simulink utiliza um ambiente de programação gráfica em que seus modelos consistem na criação de modelos na forma de diagramas de bloco, deixando mais fácil a interação com o programador, ao contrário do MATLAB que utiliza linhas de comando. Ainda assim, o *Software* Simulink é integrado ao MATLAB permitindo a incorporação dos algoritmos fazendo com que eles interajam entre si.

### **1.5. Simscape**

O Simscape nos permite criar de forma rápida modelos de sistemas físicos dentro do ambiente Simulink. Podemos modelar processos como as ligações de motores elétricos, atuadores hidráulicos, pontes retificadoras e sistemas de refrigeração, montando componentes que são indispensáveis em um processo real. Os modelos que são criados podem ser integrados em subsistemas para que possam ser utilizados em outros modelos futuramente.

Os modelos construídos nesta plataforma são baseados em conexões físicas. Para modelar um sistema mola-massa-amortecedor, por exemplo, basta simplesmente conectar os componentes de massa, mola e amortecedor, e o *Software* Simscape irá estabelecer as devidas equações de níveis do sistema para o usuário. Isso torna tudo muito mais fácil do que ter que derivar todas as equações e conectá-las em blocos de entrada e saída. Vale ressaltar que quanto maior a complexibilidade do sistema montado, mais interessante se tornam os métodos de modelagem habilitados pelo Simscape.

O Simscape possui em sua biblioteca uma grande quantidade de componentes que são fundamentados em muito domínios físicos e oferece a possibilidade de simular e analisar sistemas reais. Os produtos que complementam esta plataforma de simulação fornecem alguns modelos adicionais e recursos para analisar aplicações como redes de energia elétrica, sistemas de resfriamento, sistema de aquecimento, dentre outros. Também existe a possibilidade da integração a processos mecânicos tridimensionais e a visualização de seu comportamento utilizando-se uma animação dos resultados da simulação.

Os modelos construídos no Simscape também podem ser escritos no formato do código C. Isso permite que os testes realizados em Softwares de computação sejam mais eficazes em suas respostas.

Estes mesmos modelos podem ser integrados diretamente com os diagramas de blocos no programa Simulink e funções MATLAB. É possível simular todo o seu sistema em um único ambiente também. Isso agiliza o projeto de sistemas de controle e otimiza o desempenho a nível de sistema.

### **1.6. Modelagem de Rede Física**

Como já mencionado na seção anterior, o programa de simulação Simscape, é uma espécie de conjunto de bibliotecas de recursos para modelar e simular sistemas físicos no ambiente Simulink. Ele utiliza a abordagem de Rede Física, que difere um pouco da modelagem via Simulink que é um padrão especialmente adequado para simular processos que são constituídos por componentes físicos.

Os blocos de modelagem Simulink representam operações matemáticas básicas. Quando se liga blocos, o diagrama resultante é particularmente igual ao modelo matemático, ou uma representação do sistema em projeto. A tecnologia apresentada na plataforma Simscape nos possibilita criar uma representação mais próxima do real de rede do sistema em projeto, com tese na abordagem de Rede Física. Cada sistema realizado na plataforma é representado como se consistisse em elementos reais funcionais que interagem entre si, trocando energia por meio de suas portas.

Essas portas que visam a conexão dos componentes não são direcionais. Elas copiam conexões físicas entre os elementos. Ou seja, conectar componentes de blocos Simscape é a mesma coisa que conectar componentes reais, tais como válvulas, bombas, transistores, entre outros. De forma simplista, o programa Simscape imita o layout físico do sistema, se os componentes podem ser ligados no físico real, seus modelos no programa também poderão. Não há a necessidade da especificação das direções do fluxo, da mesma forma que também não há necessidade quando conectamos componentes físicos reais. A abordagem de Rede Física resolve de forma automática todos estes problemas tradicionais como variáveis, direcionalidade etc.

Um fluxo de energia é caracterizado por suas variáveis. Cada fluxo de energia está aliado a duas variáveis. Por exemplo, as variáveis principais para sistemas translacionais mecânicos são força e velocidade, para sistemas hidráulicos – taxa de fluxo e pressão, para sistemas rotacionais – torque e velocidade angular e para sistemas elétricos – corrente e tensão na qual daremos mais atenção em nosso trabalho.

### **1.7. Eletrônica de Potência**

Esta área de estudo da Engenharia Elétrica faz uma apresentação do uso de componentes semicondutores, ou seja, do controle por chaveamento e a conversão da potência elétrica. Na atualidade, com o avanço tecnológico a grande demanda pela eficiência na conversão e no controle de energia elétrica fez com o que essa área na Engenharia passasse a ter grande relevância, o que por sua vez, resultou na criação de novos dispositivos, circuitos e topologias de controle, que até então continuam evoluindo a tecnologia da Eletrônica de Potência até os dias atuais.

Atualmente a Engenharia Elétrica pode ser classificada em três grandes áreas principais: Potência, Eletrônica e Controle. Como citado anteriormente, a disciplina de Eletrônica de Potência estuda a aplicação de componentes semicondutores, como diodos, tiristores e transistores, no controle e conversão de altos níveis de potência. Essa conversão geralmente é de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) ou vice-versa, ao mesmo tempo que os parâmetros a serem controlados são a corrente, a tensão e a frequência. Apenas a conversão de CA para CC já é considerada uma conversão de potência. Porém, se aplicarmos uma regulação de nível de tensão na retificação, tanto a conversão como o controle começam a estar dentro do mesmo processo, ou seja, a Eletrônica de Potência é uma disciplina que acaba englobando as três grandes áreas da Engenharia Elétrica, demonstrando assim toda a sua abrangência.

Este trabalho aborda o uso de dispositivos semicondutores de potência em aplicações como retificador CA-CC, controlador CA-CA, circuito Chopper CC-CC e o inversor CC-CA que em sua constituição básica contém dispositivos como diodos, resistores, indutores, capacitores, tiristores e transistores, sendo que estes últimos são usados para realizar os chaveamentos, tornando possível a ação liga-desliga, que é a base para os circuitos de Eletrônica de Potência.

## 1.8. Conversores

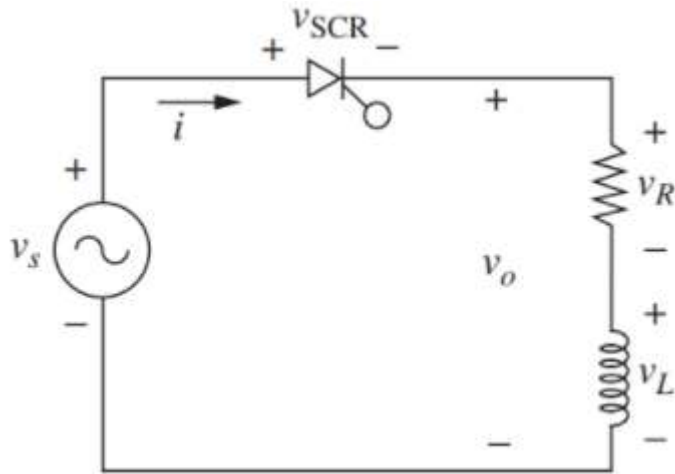
Tanto nos projetos de Engenharia Elétrica quanto no cotidiano das aplicações elétricas, é natural se deparar com incompatibilidades entre a fonte de alimentação e a carga. Essa diferença pode ser definida em grandezas como tensão, corrente e frequência. A fim de adaptar as características da tensão e da corrente na carga em função da fonte de alimentação, é que foram desenvolvidos os circuitos eletrônicos denominados Conversores de Potência.

Os conversores de potência têm uma vasta aplicação, que vai desde escala industrial (alta potência), tais como linhas de transmissão de potência CC, controle de velocidade de motores industriais CC, e aplicações em baixa tensão encontradas no dia a dia, como carregadores de celular, fontes de alimentação para computadores, sistemas de iluminação entre outros.

Abaixo segue uma breve apresentação dos tipos de conversores que que abordaremos nesse trabalho, a fim de reproduzi-los no *software* de simulação computacional e analisar seu comportamento graficamente:

### 1.8.1. Retificador CA/CC:

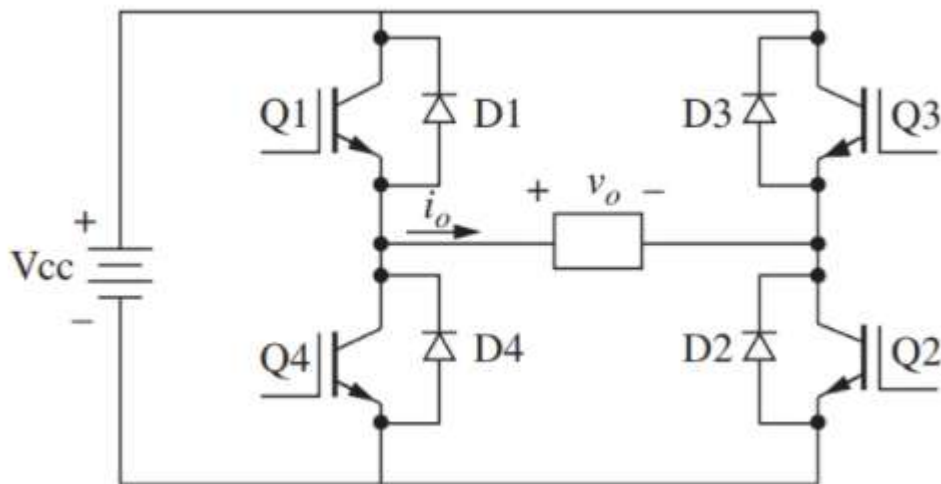
Os conversores CA/CC são aqueles que, a partir de uma entrada de tensão CA, produzem uma tensão CC em sua saída, transferindo assim, a potência média da fonte CA para a carga CC. O conversor CA/CC é especificamente classificado como retificador. Por exemplo, um conversor CA/CC permite que cargas que exigem uma tensão CC operem numa rede CA de 60 Hz. A figura 1 abaixo ilustra a topologia teórica do circuito em questão.



**Figura 1: Circuito teórico retificador monofásico de meia onda controlado**  
**Fonte: Hart, Daniel W. (2012)**

### 1.8.2. Inversor CC/CA:

Classificado como um inversor, o conversor CC/CA, transfere a potência média da entrada CC para a carga CA. Um bom exemplo de aplicação é, a produção de uma tensão CA de 120 V rms 60 Hz a partir de um banco baterias de 12 V, que por sua vez podem ser carregadas através de uma matriz de células solares. A figura 2 abaixo ilustra a topologia teórica do circuito em questão.



**Figura 2: Circuito teórico inversor CC/CA**  
**Fonte: Hart, Daniel W. (2012)**

### 1.8.3. Chopper CC/CC:

O conversor CC/CC é aquele que produz uma tensão ou corrente CC, a partir de uma entrada CC, muito útil quando a carga exige uma alimentação CC específica (quase sempre regulada), mas não se tem uma fonte com o valor CC desejado ou não regulado. Por exemplo: obter 5 V a partir de uma bateria de 12 V utilizando um conversor CC/CC. A figura 3 abaixo ilustra a topologia teórica do circuito em questão.

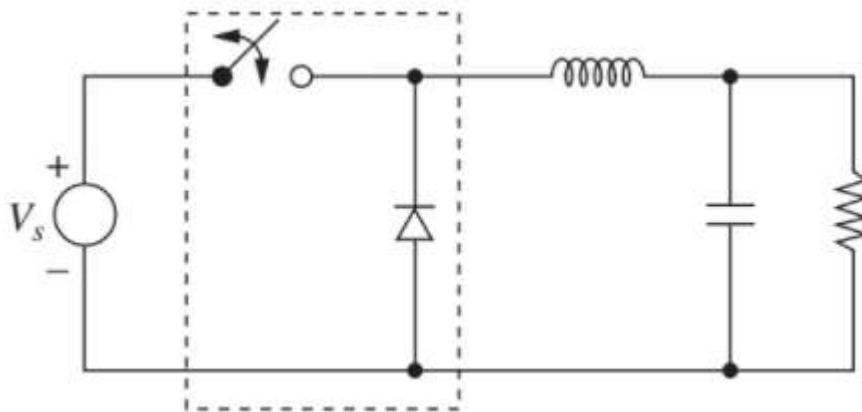


Figura 3: Circuito teórico conversor buck CC/CC  
Fonte: Hart, Daniel W. (2012)

### 1.8.4. Controlador CA/CA:

O conversor CA/CA é normalmente utilizado para, a partir de um sinal CA, produzir outro sinal CA com nível e/ou frequência distintas. Como exemplo podemos citar os circuitos de controle de luminosidade (dimmer), controle de rotação de um motor de indução ou controle de temperatura com resistências elétricas. A figura 4 abaixo ilustra a topologia teórica do circuito em questão.

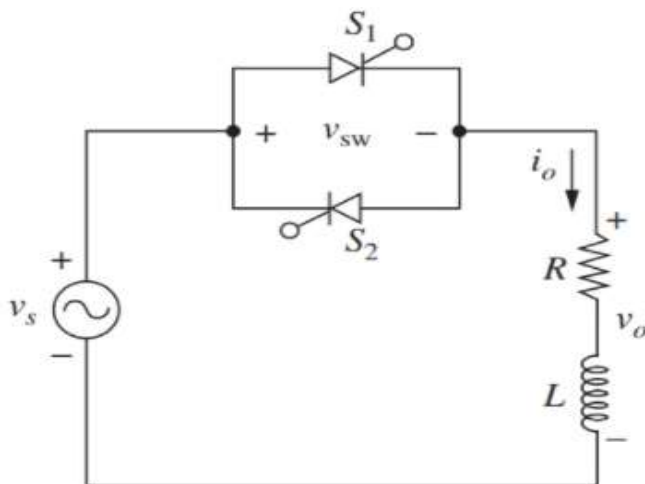


Figura 4: Circuito teórico controlador CA/CA  
Fonte: Hart, Daniel W. (2012)

## **2. METODOLOGIA**

Para compor este trabalho foram escolhidos os conversores: Retificador CA-CC, Controlador CA-CA, Chopper Buck CC-CC e Inversor CC-CA. Os circuitos foram extraídos do livro-texto Hart, Daniel W. (2012) e podem ajudar a compreender o funcionamento básico dos conversores, além de fornecer resultados que permitirão a validação das simulações. Serão demonstrados os resultados de alguns exemplos numéricos. Algumas etapas serão conduzidas na realização do trabalho, por exemplo:

Etapa 1 – Relação dos circuitos escolhidos do livro simulados com PSpice

Etapa 2 - Criação de diagramas destes circuitos no Software Simscape

Etapa 3 - Elaboração dos diagramas criados e obtenção de resultados gráficos e numéricos

Etapa 4 - Análise comparativa dos resultados Simscape com os existentes no livro-texto

O Software computacional MATLAB/Simscape está disponível nos computadores dos Laboratórios de Informática 13 e 14 do prédio 14, utilizados pelo curso de Engenharia Elétrica do UniFOA.

### **2.1. Relação dos circuitos escolhidos do livro e simulados com PSpice**

Os conversores utilizados como exemplo base, foram escolhidos seguindo o critério das quatro conversões básicas da Eletrônica de Potência: Retificador CA-CC, Controlador CA-CA, Chopper Buck CC-CC e Inversor CC-CA. Abaixo segue o detalhamento de tais circuitos.

#### **2.1.1. Retificador de meia onda controlado**

O circuito escolhido para exemplificar o retificador de meia onda controlado foi o exemplo 3-11 do livro-texto Hart, Daniel W. encontrado na página 98 do capítulo 3. O circuito utiliza uma carga RL no qual a topologia do circuito simulado pelo programa PSpice se encontra abaixo, na figura 5.

## RETIFICADOR DE MEIA ONDA CONTROLADO

Switch and diode for SCR

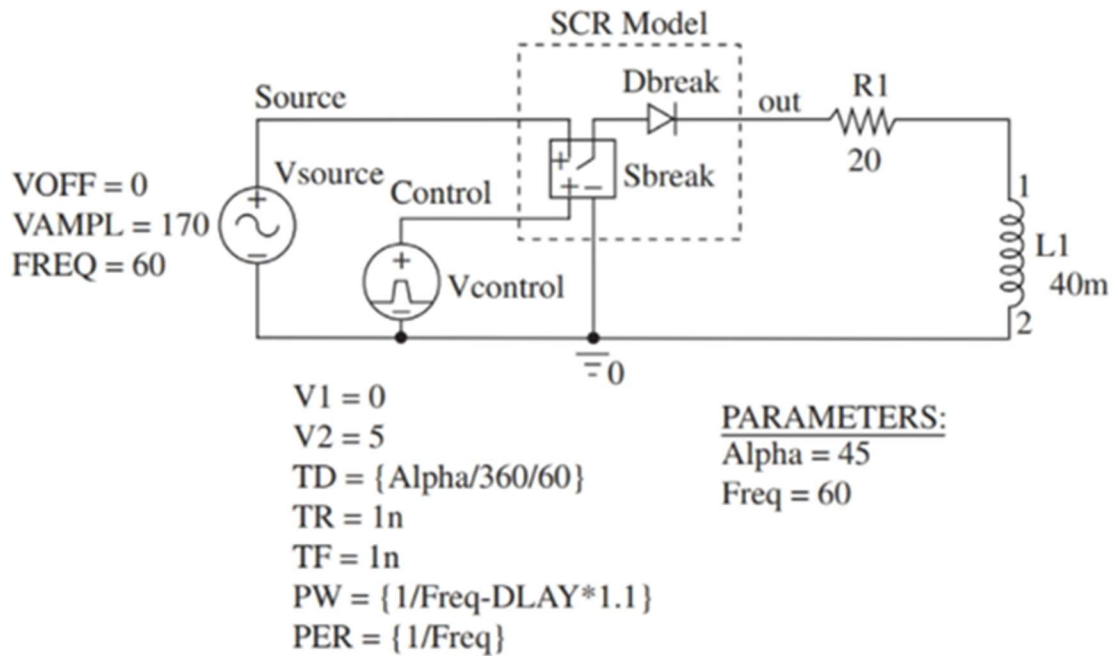
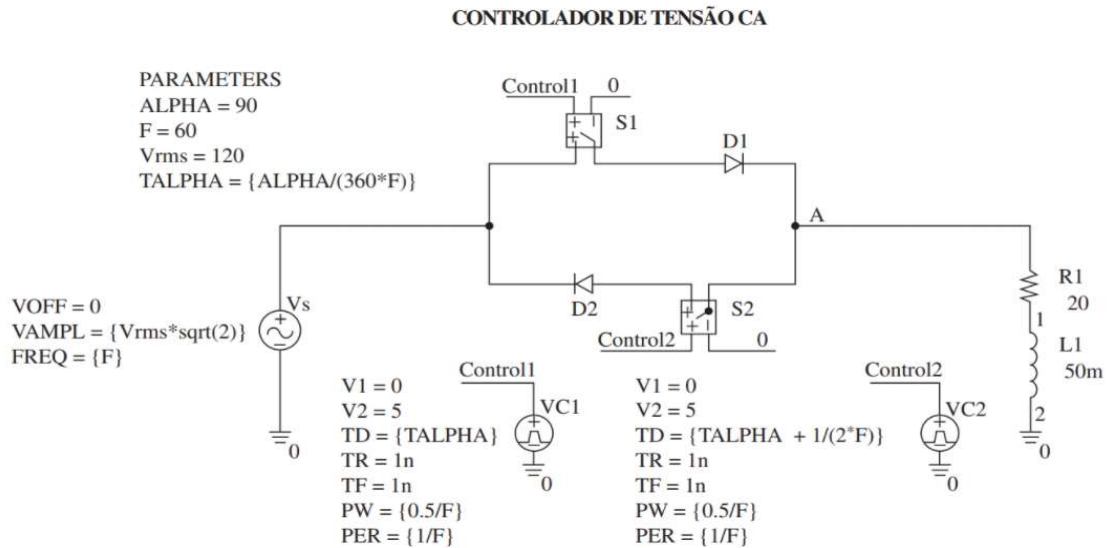


Figura 5: Retificar de meia onda controlado

Fonte: Hart, Daniel W. (2012). Exemplo 3-11 simulado em PSpice

### 2.1.2. Controlador de tensão monofásico CA-CA

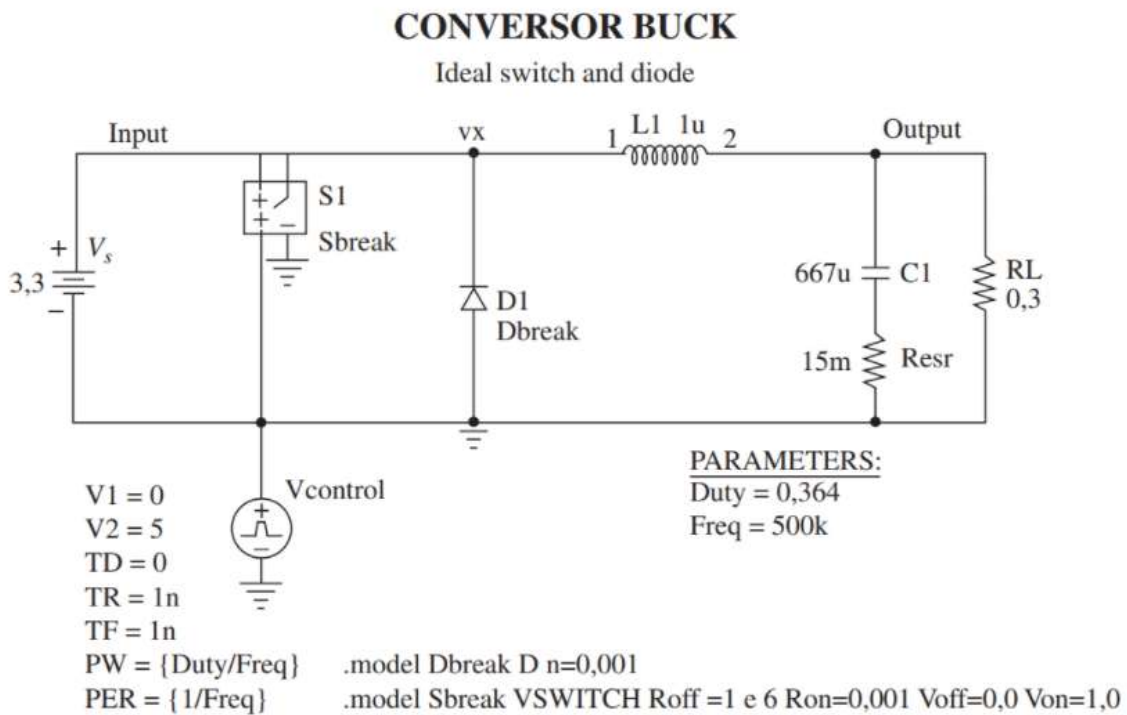
O circuito utilizado para exemplificar o conversor CA-CA foi o exemplo 5-2 encontrado na página 179 do livro Hart, Daniel W. A configuração do circuito conta com uma fonte CA alimentando dois SCR's em antiparalelo ligados a uma carga RL, como mostra a figura 6.



**Figura 6: Controlador de tensão monofásico CA-CA**  
 Fonte: Hart, Daniel W. (2012). Exemplo 5.2 simulado em PSpice

### 2.1.3. Conversor Chopper Buck

O conversor Buck utilizado foi extraído do livro-texto Hart, Daniel W. encontrado na página 253, exemplo 6-11 do capítulo 6. Este exemplo utiliza uma topologia de conversor Buck padrão, como mostra a figura 7 abaixo.



**Figura 7: Conversor Buck**  
 Fonte: Hart, Daniel W. (2012). Exemplo 6.11 simulado em PSpice

### 2.1.4. Inversor de onda quadrada com carga RL

Foi extraído o exemplo 8-4, da página 342 do capítulo 8 do livro-texto Hart, Daniel W. para ilustrar o funcionamento do inversor de onda quadrada com uma carga RL. Como mostra a figura 8 abaixo, o circuito conta com uma fonte contínua ligada a quatro tiristores em topologia ponte “H”.

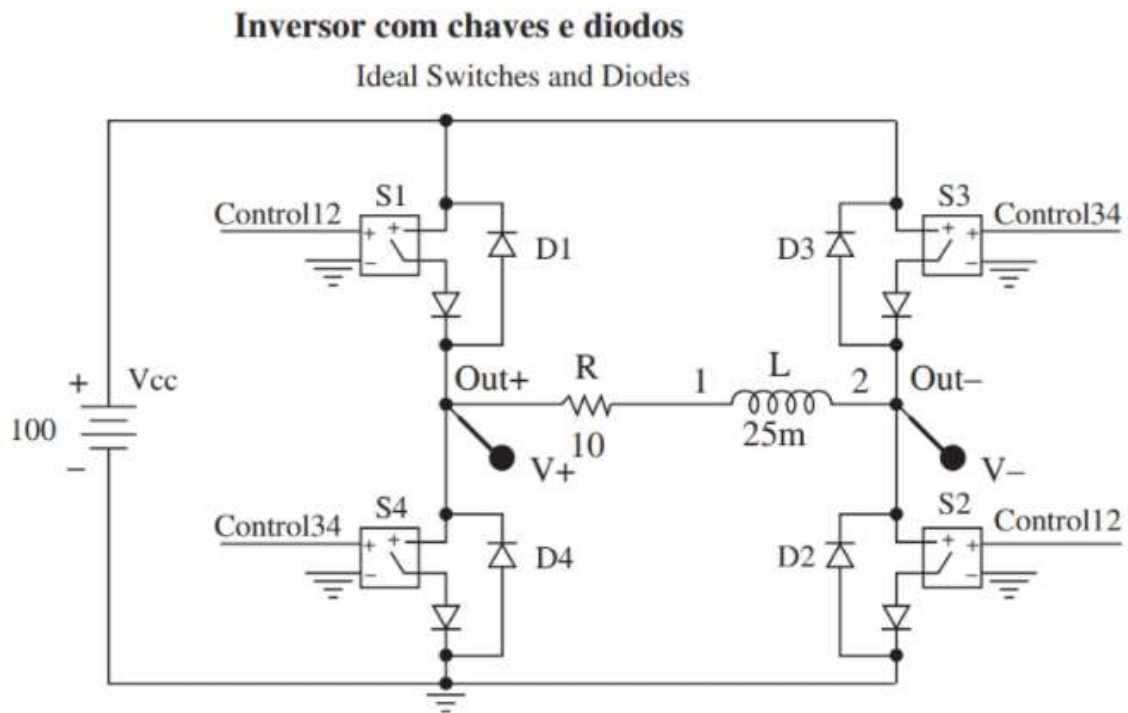


Figura 8: Inversor de onda quadrada com carga RL

Fonte: Hart, Daniel W. (2012). Exemplo 8-4 simulado em PSpice

## 2.2. Criação de diagramas no Software Simscape

Para criar um diagrama elétrico no Software Simscape devemos seguir algumas etapas:

- I. Abra o Simulink Library Browser, conforme descrito no Simscape Block Libraries.

- II. Crie um modelo. Para fazer isso, vá na barra de menu superior do navegador da biblioteca e selecione, Arquivo > Novo > Modelo. O programa vai criar um modelo vazio na memória e o exibe em uma nova janela do editor de modelos.
- III. Abra a biblioteca Simscape > Foundation Library > *Electrical Element*.
- IV. Arraste os componentes que deseja que constituem seu circuito para a janela modelo.
- V. Oriente os blocos conforme layout de como ficaria seu circuito montado no físico, caso haja a necessidade de girar um bloco basta apenas selecioná-lo e pressione Ctrl + R.
- VI. Faça a conexão dos seus componentes elétricos.
- VII. Não se esquecer que para adicionar uma representação de uma diferença de potencial no circuito, adicione uma fonte de tensão. Para isso abra o Simscape > Foundation Biblioteca > Eletrical Element > Biblioteca de fontes elétricas.
- VIII. Para conseguirmos fazer as devidas análises do sistema, é essencial colocar sempre um voltímetro em paralelo com a carga e um amperímetro em série com ela.
- IX. Agora, para podermos plotar graficamente e vermos os resultados basta adicionarmos os *scopes*. Eles são encontrados na biblioteca do próprio Simulink. Abra a biblioteca Simulink > Sources e copie o bloco Signal Builder. Depois abra a biblioteca Simulink > Sinks e copie os blocos scopes.
- X. Toda vez que usarmos uma fonte ou um *scope* do Simulink a um diagrama Simscape, devemos sempre usar um bloco conversor apropriado, para

converter sinais Simulink em sinais físicos e vice-versa. Abra o Simscape > Utilities library.

### **2.3. Elaboração dos diagramas criados e obtenção de resultados gráficos e numéricos**

Para dar início à simulação, é necessário que todos os componentes desejados para a execução do circuito se encontrem na área de trabalho do programa Simscape. Para isso devemos acessar o comando “*Simulink Library Browser*”.

É importante que o layout do circuito seja coerente, a organização é fundamental para o funcionamento adequado do mesmo.

Cada componente tem sua particularidade em relação a configuração interna de acordo com seu modo de funcionamento e característica. Saber analisar o desempenho de cada componente individualmente é fundamental para conseguir realizar uma boa qualidade em seu circuito.

Primeiramente, vale ressaltar que alguns blocos para garantir a funcionalidade do circuito simulado são comuns a todos eles, por exemplo:

- Bloco S PS;
- Bloco PS S;
- Bloco  $f(x)=0$ ;
- Bloco Powergui;
- Bloco *To Workspace*;
- Bloco *Pulse Generator*.
- Bloco *Scope*.

O Bloco S PS (Simulink PS *converter*), é sempre necessário para fazer a intermediação de um bloco de linguagem Simulink para linguagem de sinais físicos, como por exemplo, a ligação da saída do gerador de pulso a entrada do gatilho do SCR. Já o bloco PS S (*PS-Simulink converter*), tem a aplicação oposta, ele traduz a linguagem de sinais físicos (Simscape) em linguagens de sinais Simulink, como por exemplo, a ligação da saída de um sensor de tensão para a entrada de um bloco *Scope*.

O bloco Powergui e o bloco  $f(x)=0$  obrigatoriamente tem que estar presentes na área de trabalho do circuito a ser simulado, porém, o bloco  $f(x)=0$  tem sempre que está ligado diretamente ao GND.

A ferramenta *To Workspace* tem a aplicabilidade de transpor a função dos sensores de tensão ou corrente da área de trabalho da simulação Simscape, para a plataforma de cálculos do *Software* MATLAB.

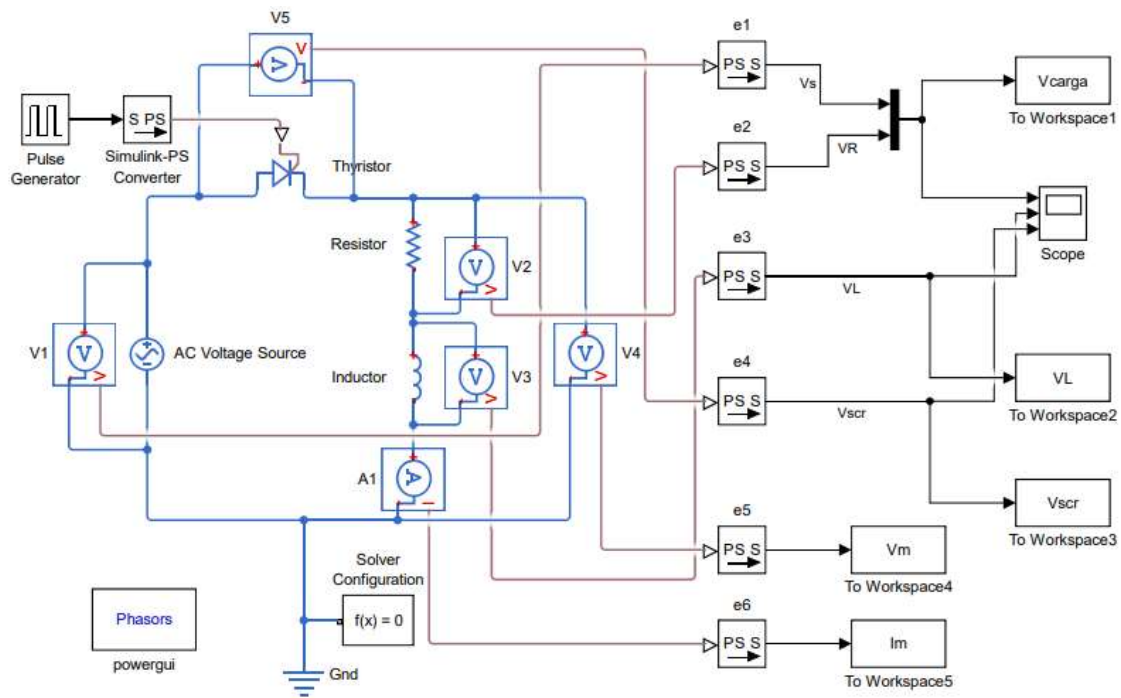
O bloco gerador de pulso é utilizado pela necessidade do chaveamento de componentes semicondutores. Neste bloco é importante a alteração de alguns parâmetros com a finalidade de atingir os requisitos que se deseja simular, dentre eles tem-se: amplitude de pulso, largura de pulso, período e ângulo da defasagem.

O bloco *Scope* tem a função de fazer a leitura numérica adquirida pelos sensores de tensão e corrente e exibir os gráficos em forma de onda equivalente.

### **2.3.1 Elaboração do retificador de meia onda controlado**

Como mostrado na figura 9, após configuração da topologia do circuito, conforme seção 2.2, foram adicionados alguns blocos para a extração de funções e formas de onda. O sensor de tensão V1 foi instalado para a obtenção da forma de onda da fonte de alimentação. Os sensores de tensão V2 e V3 têm o objetivo de monitorar o comportamento da forma de onda nas componentes resistiva e indutiva da carga respectivamente, e o sensor de tensão V5 monitora a tensão sobre o SCR.

Com o objetivo de monitorar a tensão e a corrente diretamente na carga, foram instalados os sensores de tensão V4 e de corrente A1, que enviam respectivamente as variáveis “Vm” e “Im” para a janela Workspace na área de trabalho do programa MATLAB.

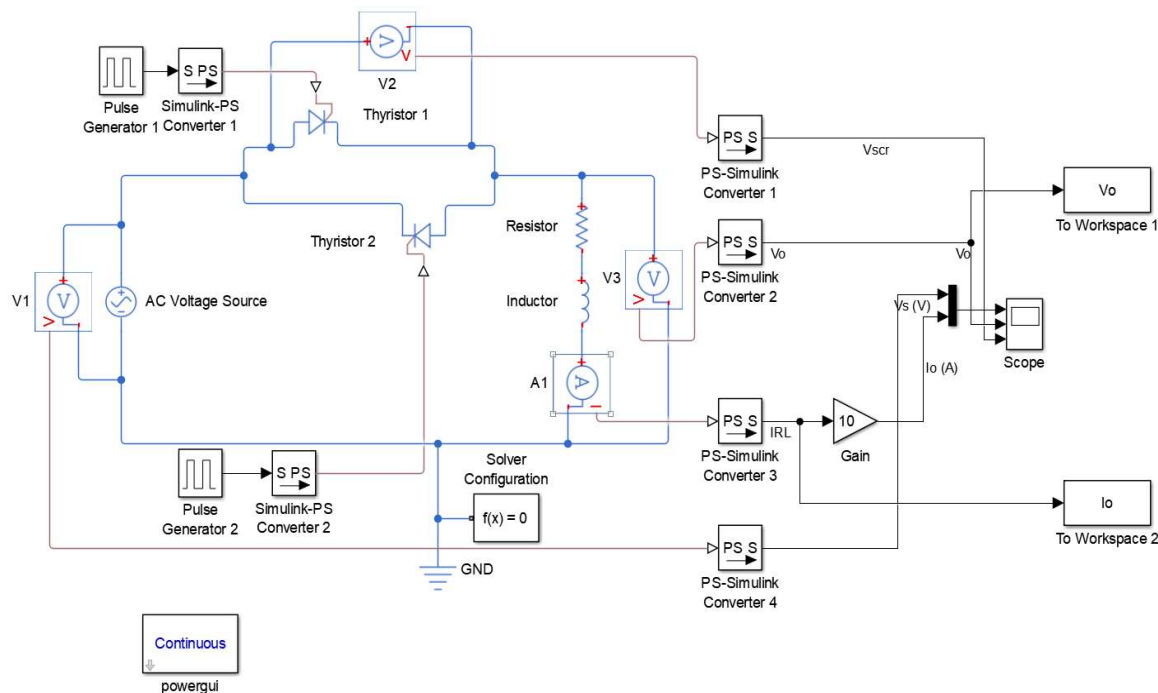


**Figura 9: Retificador de meia onda controlado simulado no Simscape**  
**Fonte: Autor**

### 2.3.2 Elaboração do controlador de tensão monofásico CA-CA

Como é observado na figura 10, após a confecção da topologia do circuito, conforme descrito na seção 2.2, foram acrescentados ao circuito alguns blocos para a extração de informações. O sensor de tensão V1 foi ligado em paralelo a fonte de alimentação CA para se obter a forma de onda original da entrada do circuito. O sensor V2 monitora a tensão nos SCR's ligados em antiparalelo.

Para a obtenção das variáveis necessárias, foram inseridos no circuito os sensores de tensão V3 e de corrente A1, onde respectivamente fornecem as variáveis Vm e Im. Vale ressaltar que os mesmos sensores também foram utilizados para se obter graficamente suas respectivas formas de onda.



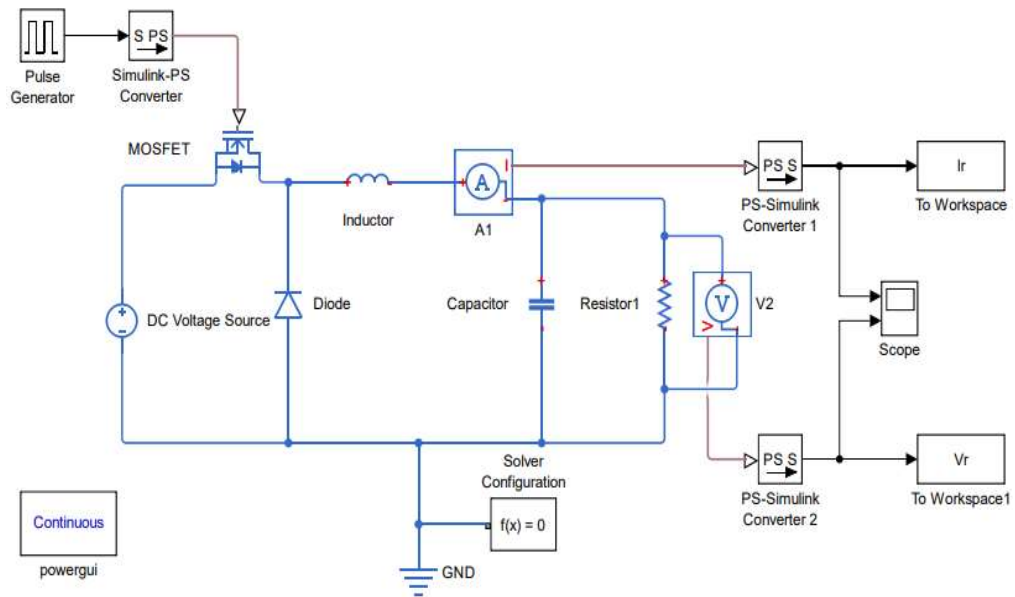
**Figura 10: Controlador de tensão monofásico CA-CA simulado no Simscape**  
**Fonte: Autor**

### 2.3.3 Elaboração do Conversor Buck

Como mostrado na figura 11, após a conclusão da montagem da topologia da parte de potência do circuito, alguns sensores foram adicionados com o objetivo de extrair as leituras do comportamento de forma de onda e variáveis para área do Workspace no MATLAB.

O Voltímetro V2 possui a finalidade de monitorar a forma de onda na carga resistiva com o auxílio do bloco *Scope*, além de mandar informações ao bloco *To Workspace* a fim de extrair a variável  $V_m$  para a janela do *Workspace* MATLAB.

O amperímetro A1, ligado em série com o indutor, tem a finalidade de mostrar a forma de onda de corrente encontrada no indutor com o auxílio do bloco *Scope*, além de produzir a variável  $I_r$  no *Workspace* do *Software* MATLAB.



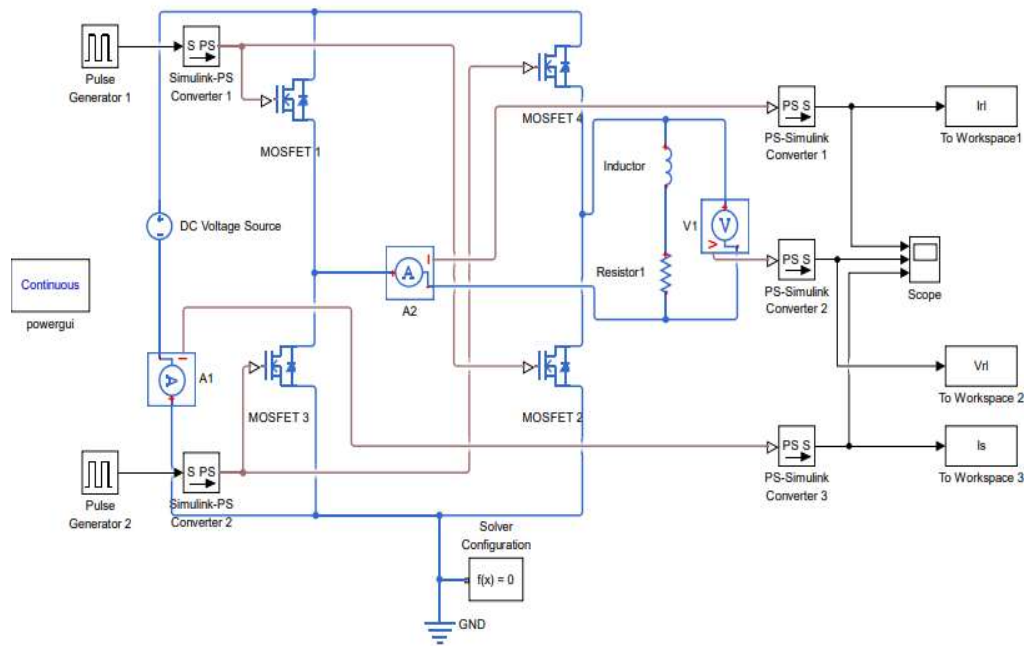
**Figura 11: Conversor Buck simulado no Simscape**  
**Fonte: Autor**

### 2.3.4 Elaboração do inversor de onda quadrada com carga RL

Como mostrado na figura 12, após a conclusão da montagem da topologia da parte de potência do circuito, alguns sensores foram adicionados com o objetivo de extrair as leituras do comportamento de forma de onda e variáveis para área do Workspace no MATLAB.

Este circuito é composto por um sensor de tensão V1 ligado em paralelo com a carga RL. O sensor juntamente com o bloco Scope fornecem os dados necessários para a extração da forma de onda da variável  $V_{rl}$ .

Nota-se que o sensor de corrente A1 se encontra em série com a fonte DC de alimentação do circuito com as finalidades de gerar a variável  $I_s$  com o auxílio do bloco To Workspace e esboçar a forma de onda da corrente da fonte.



**Figura 12: Inversor de onda quadrada com carga RL simulado no Simscape**  
**Fonte: Autor**

## 2.4 . Análise comparativa dos resultados Simscape com os existentes no livro-texto

A fim de validar as simulações realizadas no *Software* de computação Simscape, foram selecionados alguns circuitos do livro-texto Hart, Daniel W. com o intuito de analisar e comparar os resultados obtidos. Foram selecionados quatro exercícios, um de cada conversor conforme relação abaixo:

- Para o conversor CA-CC, foi utilizado o exercício 3-26 da página 109 encontrado no capítulo 3. (Hart, Daniel W.)
- Para o controlador CA-CA foi utilizado o exercício 5-11 da página 194 encontrado no capítulo 5. (Hart, Daniel W.)
- Para o conversor Buck CC-CC, foi utilizado o exercício 6-4 da página 261 encontrado no capítulo 6. (Hart, Daniel W.)
- Para o Inversor CC-CA, foi utilizado o exercício 8-4 da página 386 encontrado no capítulo 8. (Hart, Daniel W.)

Para a resolução de todos os exercícios listados acima, foram usados os valores dos componentes de cada circuito de acordo com o listado nos enunciados. Através do Bloco *To Workspace* foi possível extrair todas as variáveis necessárias do circuito desenvolvido no Simscape para a plataforma MATLAB, onde os cálculos

matemáticos foram executados. Após este processo, todos os resultados obtidos com as informações retiradas das simulações Simscape foram comparadas com os resultados teórico do livro.

### **3. RESULTADOS OBTIDOS**

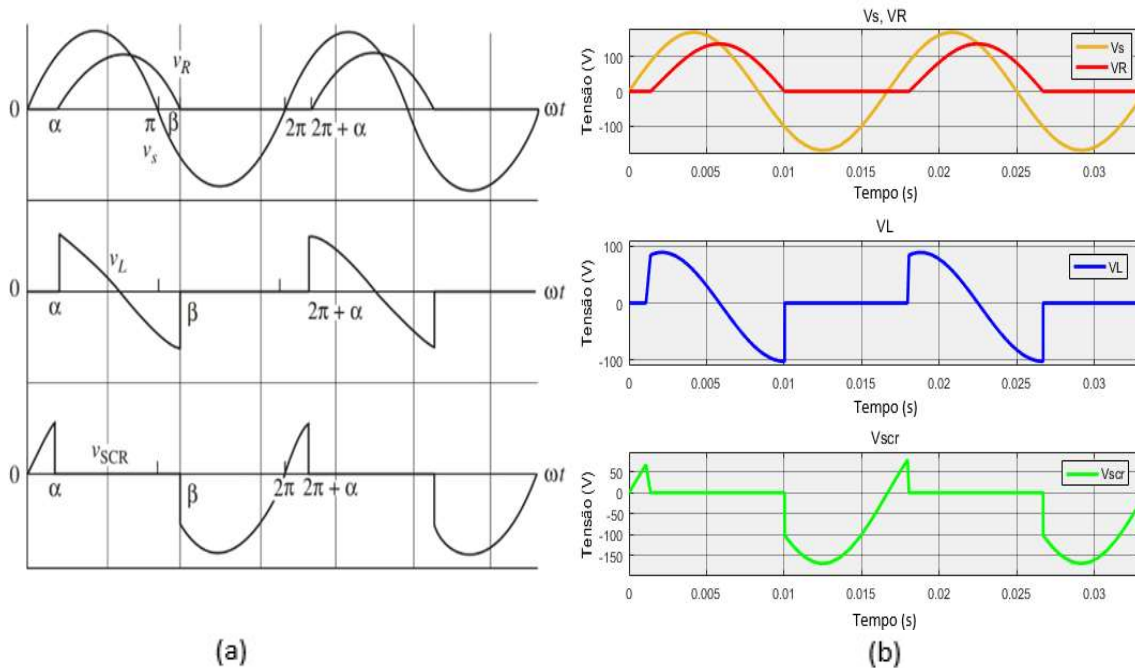
A fim de validar as simulações desenvolvidas neste trabalho, serão apresentados os resultados obtidos através da aplicação de cada simulação à um problema referente do livro-texto Hart, Daniel W. (2012), como descrito no capítulo anterior.

Neste capítulo será possível analisar os gráficos gerados pelo programa Simscape e compará-los com as formas de onda teóricas disponíveis no livro. Serão apresentados também, os resultados numéricos dos cálculos realizados na janela de comando do MATLAB, utilizando as variáveis obtidas do Simscape, os resultados dos cálculos teóricos, juntamente com seus respectivos erros percentuais.

#### **3.1. Retificador de meia onda controlado**

Para obtenção dos resultados e validação da simulação, o exercício 3-26, da página 109 do capítulo 3 do livro-texto Hart, Daniel W. (2012), foi usado como referência. O exercício em questão propõe a obtenção da corrente média na carga RL e a potência absorvida pela carga, com uma fonte CA 120Vrms em 60Hz,  $R=25\Omega$ ,  $L=50\text{mH}$  com um ângulo de disparo de  $30^\circ$ , como mostra a topologia do circuito teórico anteriormente na figura 1.

Na figura 13 abaixo, Temos respectivamente as formas de onda da corrente na carga ( $i_o$ ) sobreposta com a tensão da fonte ( $V_s$ ), a tensão na carga RL ( $V_o$ ) e o comportamento da tensão no SCR ( $V_{scr}$ ).



**Figura 13: Formas de onda do Retificador de meia onda CA-CC (a) Gráfico teórico (Hart, Daniel W. 2012) (b) Gráfico dos resultados a partir do programa Simulado pelo Simscape (Autor).**

Conforme análise, a apresentação gráfica da tensão na carga RL comparada com a tensão de entrada  $V_S$  permite a visualização do comportamento do atraso do ângulo de disparo programado em  $30^\circ$  no SCR.

É possível notar também uma sutil diferença entre as formas de onda teórica e simulada, no tocante a algumas transições, que no gráfico da simulação Simscape, apresenta inclinação diferente de  $90^\circ$  devido ao caráter não-ideal da simulação.

Na tabela 1 abaixo, temos os valores da corrente média, corrente RMS e potência na carga, onde podemos comparar os valores teóricos com os valores obtidos pela plataforma MATLAB/Simscape, utilizados na solução dos itens b e c do problema 3-26 do livro. Todos os cálculos em questão, foram realizados usando-se comandos no Command Window e de forma teórica (apêndice A).

**Tabela 1 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos Simscape do retificador de meia onda controlado**

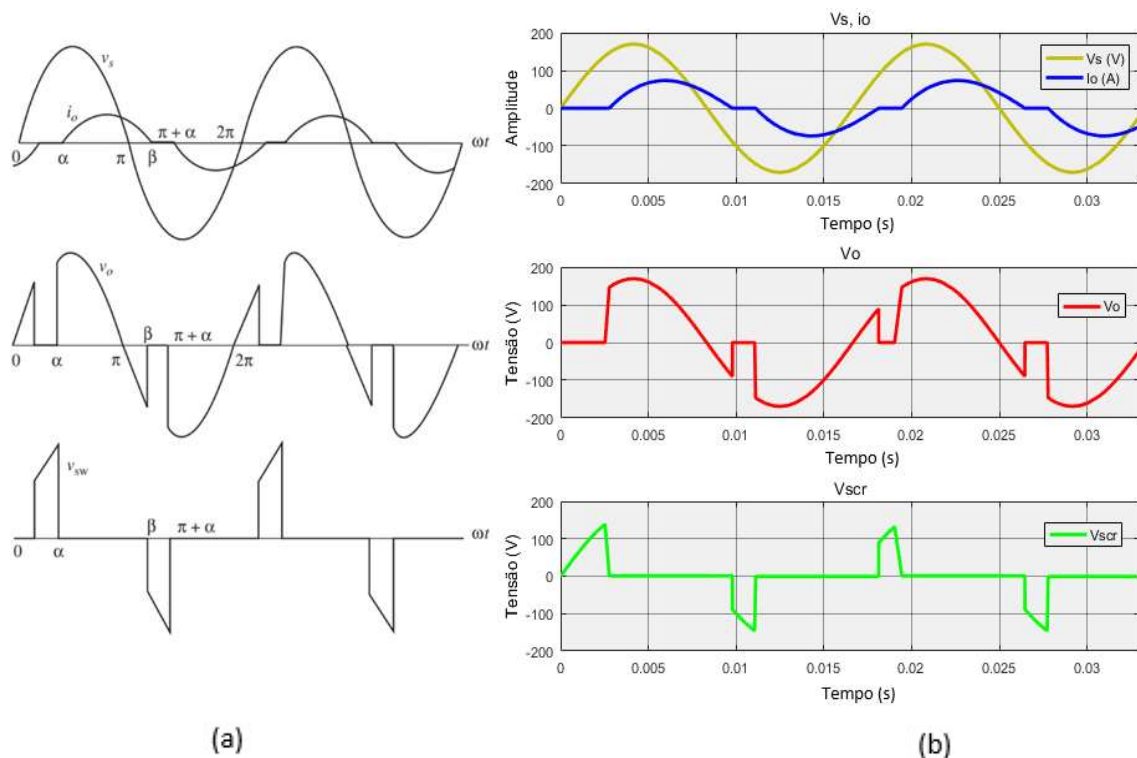
	Teórico	Matlab/Simscape	Erro (%)
Corrente média (A)	1,8	1,78	-1,11
Corrente rms (A)	2,8	2,76	-1,43
Potência na carga (W)	193	190,19	-1,46

Podemos notar que a partir destes resultados, que as simulações possuíram uma baixa margem de erro, que também pode ser explicada pela característica não-ideal das simulações, assim como se calculados com valores de um circuito real.

### **3.2. Controlador monofásico com carga RL**

Para se obter os resultados e validação da simulação, o exercício 5-11, da página 194 do capítulo 5 do livro-texto Hart, Daniel W., foi usado como referência. O exercício em questão propõe a obtenção da corrente RMS na carga, a corrente RMS em cada um dos SCR's e a potência absorvida pela carga. No caso tem-se uma fonte CA de 120Vrms em 60Hz,  $R=18\Omega$ ,  $L=30\text{mH}$  com um ângulo de disparo de  $60^\circ$ , como mostra a topologia do circuito teórico apresentado anteriormente na figura 2.

Na figura 14 abaixo, temos respectivamente as formas de onda da corrente na carga ( $i_o$ ) sobreposta com a tensão da fonte ( $v_s$ ), a tensão na carga ( $v_o$ ) e o comportamento da tensão no SCR ( $V_{scr}$ ).



**Figura 14: Formas de onda do Controlador monofásico CA-CA (a) Gráfico teórico (Hart, Daniel W. 2012) (b) Gráfico dos resultados a partir do programa Simulado pelo Simscape (Autor).**

Conforme mostra a figura, a apresentação gráfica da corrente na carga ( $i_o$ ) sobreposta a tensão de entrada ( $v_s$ ) permite a visualização do comportamento do ângulo de disparo programado em  $60^\circ$  nos SCR's ligados em antiparalelo.

É possível notar também uma sutil diferença na figura 14, no tocante à inclinação de algumas transições, que no gráfico da simulação Simscape, apresenta uma leve rampa com inclinação diferente de  $90^\circ$  devido ao caráter não-ideal da simulação.

Na tabela 2 abaixo, temos os valores de corrente RMS na carga, corrente RMS nos SCR's e potência na carga, dispostos para permitir a comparação dos valores teóricos com valores obtidos pela plataforma MATLAB/Simscape, utilizados na solução dos itens b, c e d do problema 5-11 do livro. Todos os cálculos para a obtenção dos valores tabelados, foram realizados usando-se comandos no Command Window e de forma teórica (apêndice B).

**Tabela 2 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos no Simscape do controlador monofásico com carga RL**

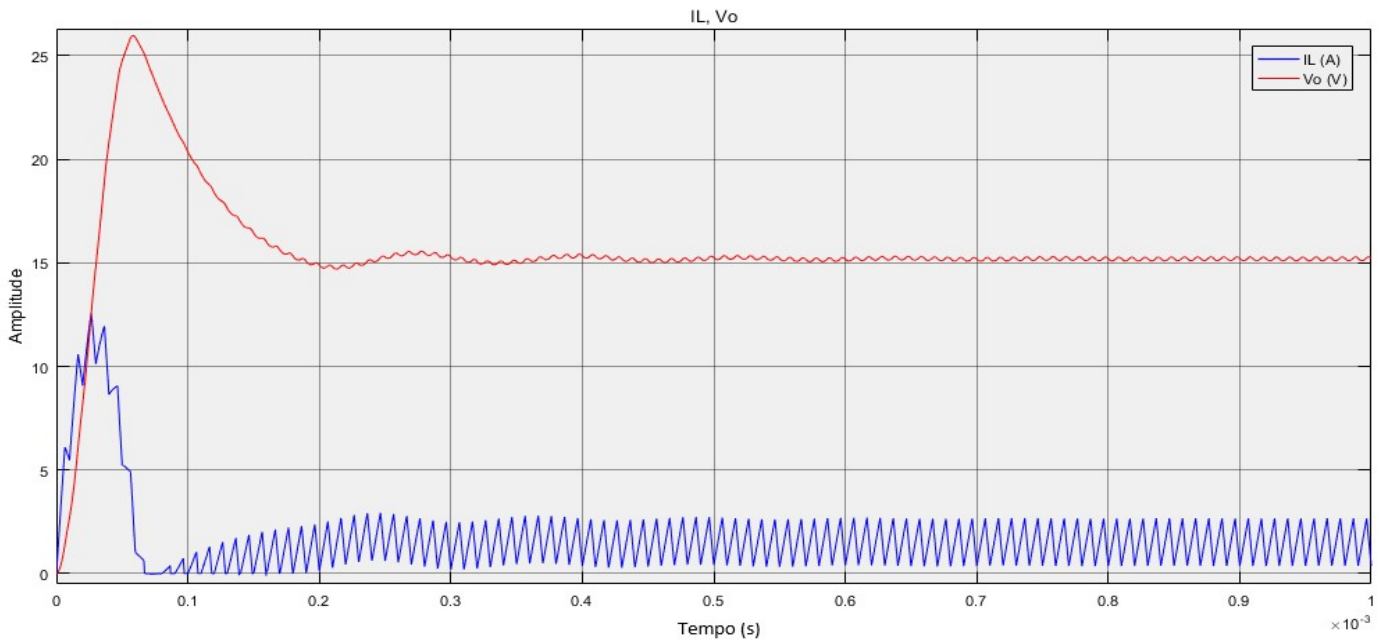
	Teórico	Matlab/Simscape	Erro (%)
Corrente rms na carga (A)	4,87	4,79	-1,64
Corrente rms nos SCR's (A)	3,44	3,39	-1,45
Potência na carga (W)	427	413,34	-3,2

Podemos notar que a partir destes resultados, que as simulações possuíram uma baixa margem de erro, que também pode ser explicada pela característica não-ideal das simulações, assim como se calculados com valores de um circuito real.

### **3.3. Conversor Buck**

Para se obter os resultados e validação da simulação, o exercício 6-4, da página 261 do capítulo 6 do livro-texto Hart, Daniel W. (2012), foi usado como referência. O exercício em questão propõe a obtenção a tensão de saída na carga, a corrente máxima e mínima no indutor e a tensão de ondulação na saída, com uma fonte CC de 24V,  $D=0,65$ ;  $R=10\Omega$ ;  $L=25\mu\text{H}$ ;  $C=15\mu\text{F}$  e uma frequência de chaveamento de 100kHz, como mostra a topologia do circuito teórico apresentada anteriormente na figura 3.

Na figura 15 abaixo, é apresentado o comportamento da forma de onda da tensão na carga ( $V_o$ ), sobreposto a forma de onda encontrada da corrente do indutor ( $I_L$ ).

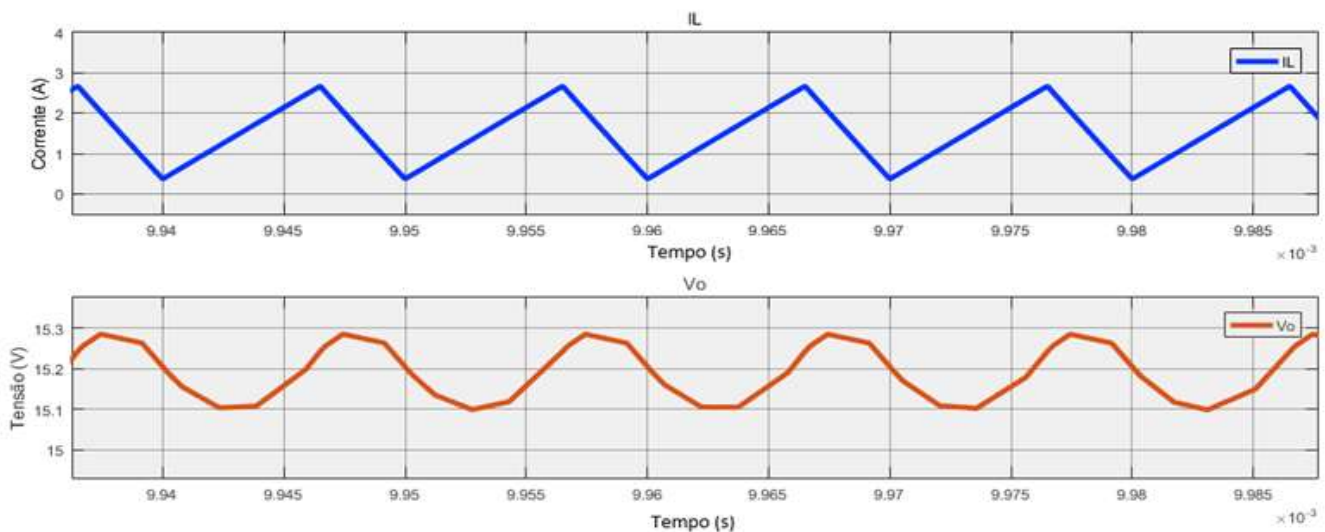


**Figura 15: Formas de onda no Conversor Buck**

**Fonte: Autor**

Podemos observar que o comportamento da tensão na carga e da corrente no indutor se caracteriza como uma resposta subamortecida no qual se pode avaliar o tempo de pico, o *Overshoot* e sua fase de acomodação, regime transitório.

Na figura 16 abaixo, para que se possa ilustrar de forma mais clara, foi ampliado o gráfico para mostrar os comportamentos da forma de onda em sua fase estável, regime estacionário. Deste modo é possível analisar que o conversor se encontra em modo contínuo de funcionamento, a corrente não toca o zero, podendo analisar-se os *ripples* de corrente e tensão.



**Figura 16: Forma de onda ampliada na saída do Conversor Buck**

**Fonte: Autor**

Na tabela 3 abaixo, temos os valores da tensão média de saída ( $V_o$ ), correntes máxima e mínima no indutor e a tensão de ondulação na saída na fonte ( $\Delta V_o$ ), utilizados na solução dos itens b, c e d do problema 6-4 do livro. Todos os cálculos para a obtenção dos valores tabelados, foram realizados usando-se comandos no *Command Window* e de forma teórica (apêndice C).

**Tabela 3 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos Simscape do conversor Buck**

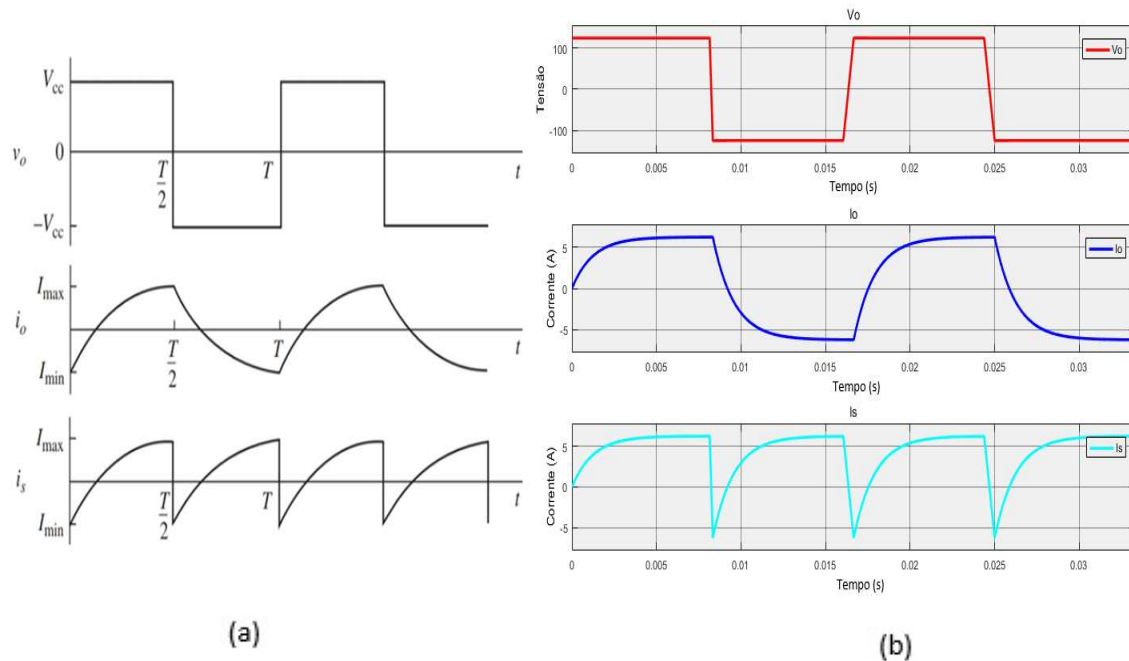
	Teórico	Matlab/Simscape	Erro (%)
Tensão na saída ( $V_o$ )	15,6	15,22	-2,44
corrente máxima no indutor (A)	2,65	2,67	0,75
corrente mínima no indutor (A)	0,47	0,37	-21,28
Tensão de ondulação na saída (V)	0,182	0,187	2,75

Podemos notar que a partir destes resultados, que as simulações possuíram uma baixa margem de erro, que também pode ser explicada pela característica não-ideal das simulações, assim como se calculados com valores de um circuito real.

### 3.4. Inversor de onda quadrada

Para se obter os resultados e validação da simulação, o exercício 8-4, da página 386 do capítulo 8 do livro-texto Hart, Daniel W., foi usado como referência. O exercício em questão propõe a obtenção da corrente RMS na carga, a corrente média na fonte, com uma fonte CC de 125V, uma frequência de saída em 60Hz,  $R=20\Omega$ ,  $L=25\text{mH}$ , como mostra a topologia do circuito teórico apresentado anteriormente na figura 2.

Na figura 17 abaixo, Temos respectivamente as formas de onda da tensão na carga ( $V_o$ ), a corrente na carga ( $i_o$ ) e o comportamento da corrente na fonte ( $i_s$ ).



**Figura 17: Forma de onda do Inversor de onda quadrada CC-CA (a) Gráfico teórico (Hart, Daniel W. 2012) (b) Gráfico dos resultados a partir do programa Simulado pelo Simscape (Autor).**

É possível notar uma sutil diferença entre a figura 17(a) e 17(b), na análise da tensão na carga ( $V_o$ ), que no gráfico da simulação Simscape, apresenta uma leve rampa, diferente de  $90^\circ$ , na onda quadrada devido ao caráter não-ideal da simulação.

Na tabela 4 abaixo, temos os valores da corrente RMS na carga e a corrente média da fonte, dispostos para comparar os valores teóricos com valores obtidos pela plataforma MATLAB/Simscape, utilizados na solução dos itens b e c do problema 8-4 do livro. Todos os cálculos para a obtenção dos valores tabelados, foram realizados usando-se comandos no Command Window e de forma teórica (apêndice D).

**Tabela 4 - Comparação dos resultados teóricos com os resultados obtidos no Simscape do inversor de onda quadrada**

	Teórico	MATLAB/Simscape	Erro (%)
Corrente RMS na carga (A)	5,45	5,36	-1,65
Corrente média na fonte (A)	4,75	4,76	0,21

Podemos notar que a partir destes resultados, que as simulações possuíram uma baixa margem de erro para os valores da corrente RMS na carga, e da corrente média na fonte, o que também pode ser explicada pela característica não-ideal das simulações, assim como se calculados com valores de um circuito real

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a simulação de quatro conversores, demonstrando as conversões básicas da Eletrônica de Potência, utilizando a plataforma Simscape/MATLAB.

Adotando o uso do bloco Simulink Converter foi possível o aumento das possibilidades de controle das chaves semicondutoras e análise das formas de onda em qualquer ponto do circuito.

Com o uso do bloco To Workspace foi possível extrair variáveis de qualquer ponto do circuito e enviar para o Command *Window* do MATLAB, facilitando e simplificando os cálculos que se desejam explorar na simulação.

Assim sendo, a plataforma Simscape se mostrou uma excelente ferramenta educacional para o estudo e análise de circuitos em Eletrônica de Potência e outras áreas da Engenharia Elétrica, para estudantes e até mesmo projetistas.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, Ashfaq. **Eletrônicas de potência/Ashfaq Ahmed**; tradução Bazán Tecnologia e Linguística; revisão técnica João Antônio Martino - São Paulo. Prentice Hall, 2000. ISBN 85-87918-03-06.

Rodrigues, Isac Zilli., **Eletrônica Industrial**. Disponível em: < <http://users.upf.br/~busatorodrigo/novidades/Elctr%F4nica%20de%20Pot%EAnncia.pdf> > Acesso em: 28 de Abril de 2021

Eletrônica de potência – Introdução a disciplina. **Tecnoblog**: J. A. Pomilio. Disponível em: < <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/hist.pdf>>. Acesso em: 18 de Abril. de 2021

Hart, Daniel W. **Eletrônica de Potência/análise e projetos de circuitos**. 1st Edição. AMGH Editora Ltda, 2012.

MATLAB for Artificial Intelligence. **Tecnoblog**: MathWorks. Página inicial. Disponível em: < <https://www.mathworks.com/> >. Acesso em: 15 de jun. de 2020.

Uso do Partsim para simulação de circuitos de corrente alternada. **Tecnoblog**: Instituto federal Santa Catarina. Disponível em: <[https://wiki.sj.ifsc.edu.br/index.php/Use\\_do\\_Partsim\\_para\\_simula%C3%A7%C3%A3o\\_de\\_circuitos\\_de\\_corrente\\_alternada](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/index.php/Use_do_Partsim_para_simula%C3%A7%C3%A3o_de_circuitos_de_corrente_alternada)>

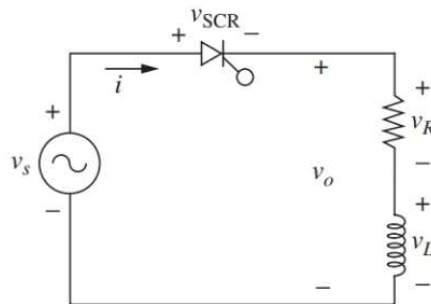
## 6. APÊNDICES

### Apêndice A – Cálculos Retificador de meia onda

#### Cálculos teóricos:

Solução do problema utilizado no item 3.1

3-26 Um retificador de meia onda controlado tem uma fonte CA de 120 V rms em 60 Hz. A carga RL tem uma  $R = 25\Omega$  e  $L = 50$  mH. O ângulo de atraso é de  $30^\circ$ . Determine (a) uma expressão para a corrente na carga, (b) a corrente média e (c) potência absorvida pela carga.



Angulo de extinção:  $\beta = 3,79\text{rad} = 217^\circ$  (é obtido numericamente com o MATLAB)

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i(\omega t) d(\omega t)$$

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{0,524}^{\beta} [5,42\text{sen}(\omega t - 0,644) + 1,32 e^{\frac{-\omega t}{0,754}}] d(\omega t)$$

$$I_o = 1,80A$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i^2(\omega t) d(\omega t)}$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{0,524}^{\beta} [5,42\text{sen}(\omega t - 0,644) + 1,32 e^{\frac{-\omega t}{0,754}}]^2 d(\omega t)}$$

$$I_{\text{rms}} = 2,80A$$

$$P = I_{\text{rms}}^2 R = (2,80)^2 (25) = 193W$$

**Script do MATLAB utilizado para solucionar o problema do item 3.1:**

```
>> Io=(1/(0.0167))*trapz(tout,Im)
Io =
```

1.7787

```
>> lm2=lm.^2;
```

```
>> lrms=sqrt((1/(0.0167))*trapz(tout,lm2))
```

```
lrms =
```

```
2.7582
```

```
>> P=(lrms.^2)*25
```

```
P =
```

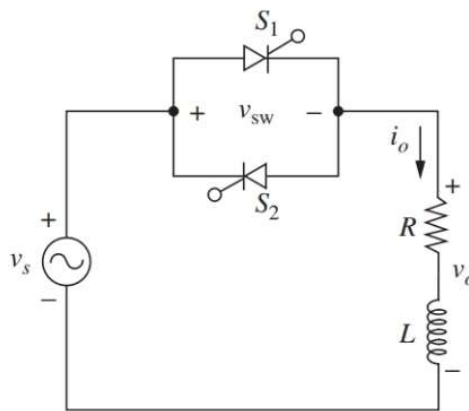
```
190.1940
```

## Apêndice B – Cálculo Controlador de tensão monofásico

### Cálculos teóricos:

Solução do problema utilizado no item 3.2

5-11 O controlador de tensão CA monofásico da Fig. 5-4a tem uma fonte de 120 V rms 60 Hz. A carga RL em série tem  $R = 18 \Omega$  e  $L = 30 \text{ mH}$ . O ângulo de atraso  $\alpha = 60^\circ$ . Determine (a) uma expressão para a corrente, (b) a corrente rms na carga, (c) a corrente rms em cada um dos SCRs e (d) a potência absorvida pela carga, (e) esboce as formas de onda da tensão na saída e a tensão nos SCRs.



Ângulo de extinção:  $\beta = 3,696 \text{ rad}$   
 $= 212^\circ$  (é obtido numericamente com o MATLAB)

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i^2(\omega t) d(\omega t)}$$

$$I_{o, \text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{1,047}^{\beta} [7,98 \text{sen}(\omega t - 0,561) - 19,75 e^{\frac{-\omega t}{0,628}}]^2 d(\omega t)}$$

$$I_{o, \text{rms}} = 4,87$$

$$I_{\text{rms, SCR}} = \frac{4,87}{\sqrt{2}} = 3,44 \text{ A}$$

$$P = I_{\text{rms}}^2 R = (4,87)^2 (18) = 427 \text{ W}$$

**Script do MATLAB utilizado para solucionar o problema do item 3.2:**

```
>> Iq=I0.^2;
```

```
>> Irms=sqrt((1/(0.0167))*trapz(tout,lq
```

```
Irms =
```

```
4.7920
```

```
>> IrsmSCR=(Irms)/(sqrt(2))
```

```
IrsmSCR =
```

```
3.3885
```

```
>> P=(Irms.^2)*(18)
```

```
P =
```

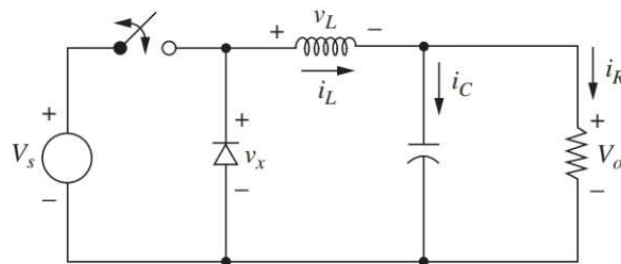
```
413.3383
```

## Apêndice C – Cálculos Conversor Buck

### Cálculos teóricos:

Solução do problema utilizado no item 3.3

6-4 O conversor Buck da Fig. 6-3a tem os seguintes parâmetros:  $V_s = 24\text{ V}$ ,  $D = 0,65$ ,  $L = 25\text{ }\mu\text{H}$ ,  $C = 15\text{ }\mu\text{F}$  e  $R = 10\text{ }\Omega$ . A frequência de chaveamento é de  $100\text{ kHz}$ . Determine (a) A tensão na saída, (b) As correntes máxima e mínima no indutor e (c) A tensão de ondulação na saída.



$$V_o = V_s D = (24)(0,65) = 15,6V$$

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} = \frac{15,6}{10} = 1,56A$$

$$\Delta i_L = \frac{V_o}{L} (1 - D) T = \frac{15,6}{25(10)^{-6}} (1 - 0,65) \frac{1}{100000} = 2,18A$$

$$I_{L, \max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = 1,56 + \frac{2,18}{2} = 2,65A$$

$$I_{L, \min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = 1,56 - \frac{2,18}{2} = 0,47A$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o(1 - D)}{8LCf^2} = \frac{15,6(1 - 0,65)}{8(25)(10)^{-6}(15)(10)^{-6}(100000)^2} = 0,182$$

### Script do MATLAB utilizado para solucionar o problema do item 3.3

```
>> Vox=Vo(27000:53558);
```

```
>> Voxmedio=mean(Vox)
```

```
Voxmedio =
```

```
15.2186
```

```
>> ILx=IL(27000:53558);
```

```
>> ILxmax=max(ILx)
```

```
ILxmax =
```

```
2.6699
```

```
>> ILxmin=min(ILx)
```

```
ILxmin =
```

```
0.3707
```

```
>> Voxmax=max(Vox)
```

```
Voxmax =
```

```
15.2851
```

```
>> Voxmin=min(Vox)
```

```
Voxmin =
```

```
15.0978
```

```
>> Vond=Voxmax-Voxmin
```

```
Vond =
```

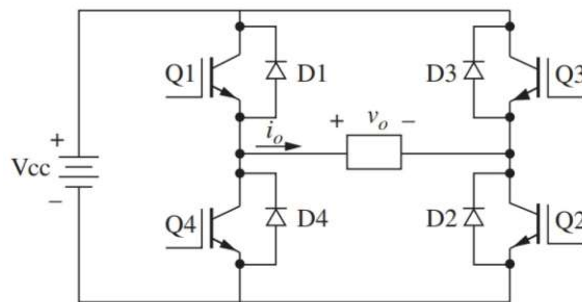
```
0.1873
```

## Apêndice D – Cálculos Inversor de onda quadrada

### Cálculos teóricos:

Solução do problema utilizado no item 3.4

8-4 Um inversor de onda quadrada tem uma fonte CC de 125 V, uma frequência de saída de 60 Hz e uma carga RL em série com  $R = 20 \Omega$  e  $L = 25$  mH. Determine (a) uma expressão para a corrente na carga, (b) a corrente rms na carga, (c) a corrente média na fonte.



$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{120} \int_0^{\frac{1}{120}} [(6,25 - 12,5)e^{\frac{-t}{0,00125}}]^2 dt}$$

$$I_{rms} = 5,45A$$

$$P = I^2_{rms} R = (5,45)^2 (20) = 594W$$

$$I_s = \frac{P}{V_{dc}} = \frac{594}{125} = 4,75A$$

**Script do MATLAB utilizado para solucionar o problema do item 3.4:**

```
>> Iq=Io.^2;
```

```
>> Irms=sqrt((1/(0.0167))*trapz(tout,Iq))
```

```
Irms =
```

5.3683

```
>> Ismed=(1/(0.0167))*trapz(tout,Is)
```

Ismed =

4.7571