



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE BELÉM
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

ROSEANA MATA MONTEIRO

**APLICAÇÃO E ANÁLISE DO SOFTWARE PSIM EM PROJETOS DE
SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

Belém, PA
2025

ROSEANA MATA MONTEIRO

**APLICAÇÃO E ANÁLISE DO SOFTWARE PSIM EM PROJETOS DE
SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Belém, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Dr. João Aberides Ferreira Neto

Coorientador(a): Dr. Petrônio Vieira Júnior

Belém, PA

2025

ROSEANA MATA MONTEIRO

APLICAÇÃO E ANÁLISE DO SOFTWARE PSIM EM PROJETOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica, do Campus Universitário de Belém, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação:

Conceito:

Banca Examinadora

Orientador

João Aberides Ferreira Neto

Coorientador

Petrônio Vieira Júnior

Examinador interno

Carlos

Dedico esse trabalho aos meus
amores e minhas paixões.
Obrigada por suas presenças.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro plano, gostaria de agradecer a mim, por me apoiar em todos os momentos, sendo minha maior incentivadora, amiga e companheira. Obrigada, por me compreender dos momentos mais simples aos mais complexos e trabalhosos. Unicamente eu sei o que vivenciei, e quão coragem, colaboração e sobretudo respeito eu tive de ter por mim mesma.

Em segundo plano, agradeço a minha mamãe, Roseane Mata: muito obrigada. A Sra. me incentivou, apoiou, colaborou, cuidou, encorajou; obrigada por ser minha inspiração, alegria, meu mundo; em minha mente somente vem a palavra amor, eu te amo, minha mamãe.

Em terceiro plano, agradeço aos meus irmãos caçulas. Aiko, você é um exemplo de bondade e calma, obrigada por me ensinar a apreciar a vida. Aila, você é minha fonte de coragem, obrigada minha guerreira. Sun, obrigada por me ensinar a descansar e me amar. Joaquim, obrigada por se preocupar comigo. Gael, você é o mais novinho e simplesmente tudo é seu, todo meu amor é teu, você arrombou a porta do meu coração.

Em quarto plano, agradeço a todos aqueles profissionais que tive a chance de desempenhar atividades extracurriculares como monitorias: Prof. Dr. Adônis Leal, Prof. Dr. Roberto Menezes; Prof. Dr. Karlo Queiroz. Além de agradecer aos meus estágios nas empresas: Quadra Engenharia e Albras. Obrigada especial ao técnico eletricitista Marcelo Rayol, e aos aos engenheiros eletricitistas: Roberto Nunes, Yuri Lopes e Wadamys Sampaio. Além do meu orientador e amigo João Aberides, e coorientador Petrônio Vieira. Obrigada por compartilharem experiências e conhecimentos enriquecedores.

Em quinto plano, agradeço a todos meus colegas universitários, em especial ao Pedro Guilherme e ao Alex Henrique, obrigada pelas conversas edificantes e por me socorrerem nas mais variadas situações.

Em sexto plano, agradeço à Sra. Oscarina Brito pelos maravilhosos alimentos preparados, a Sra. não imagina o quão prazeroso eram os momentos que vivenciei na sua lanchonete; sou a fã nº 01 da sua tapioca, cuscuz e café.

Em sétimo plano, agradeço àqueles que não foram citados, todavia contribuíram de algum modo para minha formação. Muito obrigada.

“Não quero ter a terrível limitação de quem vive apenas do que é passível de fazer sentido. Eu não: quero é uma verdade inventada.”

(Clarice Lispector)

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas elétricos e de eletrônica de potência exige ferramentas avançadas que otimizem a análise, o projeto e a simulação desses sistemas. Este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre a aplicação do software PSIM (Power Simulation Software) em projetos voltados para sistemas elétricos e de eletrônica de potência. O PSIM destaca-se pela sua interface intuitiva, robustez e capacidade de realizar simulações precisas em circuitos de potência e controle, sendo amplamente utilizado em ambientes acadêmicos e industriais. A monografia explora as principais funcionalidades do software, abordando suas ferramentas de modelagem e análise, como simulação de circuitos, integração com controle digital e otimização de projetos. Foram realizados estudos de caso que demonstram a eficácia do PSIM na análise de conversores de potência, sistemas de geração distribuída e controle de máquinas elétricas. Os resultados evidenciam que o PSIM proporciona precisão nos resultados, redução do tempo de desenvolvimento e maior confiabilidade em projetos. Conclui-se que o uso do PSIM em projetos de sistemas elétricos e eletrônica de potência é uma abordagem eficiente para enfrentar os desafios tecnológicos do setor, destacando-se como um recurso para engenheiros e pesquisadores.

Palavras-chave: PSIM, projetos, eletrônica, potência, simulação.

ABSTRACT

The growing complexity of electrical systems and power electronics demands advanced tools to optimize the analysis, design, and simulation of these systems. This paper presents a preliminary study on the application of PSIM (Power Simulation) software in projects focused on electrical systems and power electronics. PSIM stands out for its intuitive interface, robustness, and ability to perform accurate simulations of power and control circuits, being widely used in academic and industrial environments. The monograph explores the software's main features, addressing its modeling and analysis tools, such as circuit simulation, integration with digital control, and project optimization. Case studies were conducted to demonstrate PSIM's effectiveness in analyzing power converters, distributed generation systems, and electrical machine control. The results highlight that PSIM ensures result accuracy, reduces development time, and increases project reliability. It is concluded that the use of PSIM in electrical systems and power electronics projects is an efficient approach to addressing the sector's technological challenges, standing out as an resource for engineers and researchers.

Keywords: PSIM, projects, electronics, power, simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.a - Exemplo de circuito (simulação no domínio do tempo).....	10
Figura 1.b - Exemplo de formas de onda (simulação no domínio do tempo).....	10
Figura 2.a - Exemplo de formas de onda (simulação no domínio da frequência)....	11
Figura 2.b - Diagrama de Bode (simulação no domínio da frequência).....	12
Figura 3.a - Exemplo de circuito estático e dinâmico (conversor PWM).....	13
Figura 3.b - Exemplo de circuito estático e dinâmico (regime permanente periódico)...	13
Figura 3.c - Exemplo de circuito estático e dinâmico (transitório de partida do conversor).....	13
Figura 4.a - Circuito inversor de 7 níveis utilizado em simulação.....	14
Figura 4.b - Circuito inversor de 7 níveis utilizado em simulação.....	15
Figura 4.c - Formas de onda obtidas em simulação (inversor de 7 níveis).....	15
Figura 5.a - Circuito compensador PID para o inversor de 7 níveis.....	16
Figura 5.b - Forma de onda da tensão na saída do compensador PID.....	16
Figura 6.a - Retificador trifásico de 6 pulsos: circuito.....	18
Figura 6.b - Formas de onda do retificador trifásico de 6 pulsos.....	19
Figura 7.a - Diagrama de um inversor trifásico baseado em chaveamento PWM....	20
Figura 7.b - Gráfico das tensões de saída do inversor trifásico.....	20
Figura 7.c - Espectro de frequência da tensão de saída do inversor trifásico.....	21
Figura 8.a - Diagrama de um sistema fotovoltaico.....	22
Figura 8.b - Gráficos de resposta do sistema fotovoltaico.....	23
Figura 09 - Página inicial do PSIM.....	27
Figura 10 - Diretório para criação de um novo projeto no PSIM.....	28
Figura 11 - Página inicial de um novo projeto no PSIM.....	28
Figura 12 - Circuito do projeto.....	31
Figura 13 - Formas de tensão de saída (V_o) e de entrada (V_{cel}).....	31
Figura 14 - Formas de onda das correntes no indutor (I_{ind}) e no painel (I_{cel}).....	32
Figura 15 - Formas de onda das correntes na chave (I_{MOSFET}) e no diodo (I_{diodo}).....	32
Figura 16 - Formas de onda para cálculos de potência.....	33
Figura 17 - Transitório de partida do conversor.....	33
Figura 18 - Circuito de comando e potência do conversor Buck utilizando compensador PID.....	38
Figura 19 - Formas de sinal para a chave.....	39
Figura 20 - Tensão de saída e de entrada do circuito Buck.....	39

Figura 21 - Tensão e corrente de saída.....	40
Figura 22 - Tensão e corrente no indutor.....	40
Figura 23 - Corrente na chave e no indutor.....	41
Figura 24 - Circuito em malha fechada no PSIM.....	41
Figura 25 - Transitório de partida do conversor Buck.....	42
Figura 26 - Sinal PWM.....	42
Figura 27 - Formas de onda de tensão na saída correspondente ao capacitor.....	42
Figura 28 - Tensão e corrente no indutor.....	43
Figura 29 - Formas de onda da chave e do indutor.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Comparação entre PSIM e MATLAB/Simulink.....	27
Tabela 02 - Comparação entre PSIM e PSpice.....	28
Tabela 03 - Comparação dos resultados do conversor BOOST.....	56
Tabela 04 - Comparação dos resultados do conversor BUCK.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CC - Corrente Contínua

CV - Corrente e Tensão

DC - Direct Current (Corrente Contínua)

MPPT - Maximum Power Point Tracking

PID - Proportional, Integral, and Derivative (Proporcional, Integral, Derivativo)

PSIM - Power Simulation Software

PWM - Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)

THD - Total Harmonic Distortion (Distorção Harmônica Total)

LISTA DE SÍMBOLOS

C - Capacitância

D - Razão cíclica

f_s - Frequência de chaveamento

I_L - Corrente do indutor

I_{load} - Corrente na carga

K_p, K_i, K_d - Parâmetros do controlador PID

L - Indutância

P_o - Potência de saída

R - Resistência

t_{off} - Tempo desligado do interruptor

t_{on} - Tempo ligado do interruptor

V_{in} - Tensão de entrada

V_o - Tensão de saída

V_{ref} - Tensão de referência

ΔI_L - Ondulação da corrente do indutor

ΔV_o - Ondulação de tensão de saída

η - Eficiência

ω - Frequência angular

Z - Impedância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização e Relevância do Tema	1
1.2. Objetivos do Trabalho	2
1.2.1. Objetivo Geral	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Justificativa da Escolha do Software PSIM	3
1.4. Estrutura do Trabalho	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Conceitos de Sistemas de Energia Elétrica	5
2.1.1. Introdução aos Sistemas de Energia Elétrica	5
2.1.2. Modelagem de Circuitos em Eletrônica de Potência	6
2.2. Simulação Computacional em Engenharia Elétrica	8
2.2.1. Importância das Simulações	8
2.2.2. Aplicação Principais Métodos de Simulação	9
2.3 Principais Componentes e Tipos de Circuitos em Eletrônica de Potência .	17
2.3.1. Retificadores.....	17
2.3.2. Inversores	19
2.3.3. Conversores CA-CC e CC-CA	21
3. O SOFTWARE PSIM	24
3.1. Visão Geral e Histórico do PSIM	24
3.2. Principais Funcionalidades e Ferramentas do PSIM	25
3.2.1. Módulo de Eletrônica de Potência	25
3.2.2. Módulo de Controle de Máquinas Elétricas	25
3.2.3. Simulações com Energias Renováveis	25
3.3 Comparação entre PSIM e Outros Softwares de Simulação	26
3.3.1. MATLAB/Simulink	26
3.3.2. PSpice	27
3.3.3. Vantagens e Limitações do PSIM	28
4. METODOLOGIA	30
4.1. Definição dos Procedimentos e Métodos	30
4.2. Descrição dos Estudos de Caso	31
4.3. Critérios de Avaliação dos Resultados das Simulações	32
5. ESTUDOS DE CASO COM PSIM	34
5.1 Estudo de Caso 1: Conversor CC-CC tipo Boost	34
5.1.1. Descrição do Circuito do estudo de caso	34
5.1.2. Montagem do circuito	35
5.1.3. Resultados da simulação	39
5.2 Estudo de Caso 2: Conversor CC-CC Buck	42
5.2.1. Descrição do Circuito	42
5.2.2. Montagem do circuito	43

5.2.3. Resultados da simulação em malha aberta	47
5.2.4. Resultados da simulação em malha fechada	49
5.3 Modelagem dos conversores	52
5.3.1. Modelagem do conversor Boost	52
5.3.2. Modelagem do conversor Buck	54
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	56
6.1 Discussão dos Resultados e Comparação dos Resultados dos Estudos de Caso	58
7.CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	60
7.1 Conclusão Geral sobre o Uso do PSIM.....	60
7.2 Contribuições do Trabalho	60
7.3 Limitações do Estudo	61
7.4 Sugestões para Trabalhos Futuros	62
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e Relevância do Tema

O rápido avanço da tecnologia tem gerado uma crescente demanda por soluções de energia mais eficientes e confiáveis. Em paralelo, a eletrônica de potência e os sistemas de energia elétrica evoluíram de forma significativa, incorporando novas tecnologias que vão desde fontes renováveis, como a energia solar e eólica, até a miniaturização de componentes e a integração de sistemas digitais para monitoramento e controle. Nesse contexto, ferramentas de simulação têm se tornado essenciais, pois possibilitam aos engenheiros projetar, analisar e otimizar sistemas antes mesmo de construí-los, reduzindo custos e aumentando a eficiência.

Entre as ferramentas de simulação para sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência, o PSIM (Power Simulation Software) se destaca. Este software é amplamente utilizado por engenheiros e pesquisadores na simulação de circuitos eletrônicos e sistemas de controle em eletrônica de potência. Através do PSIM, é possível realizar simulações detalhadas que auxiliam na análise de desempenho de inversores, retificadores, conversores e outros componentes críticos de sistemas de potência. Além disso, sua interface intuitiva e sua capacidade de simular sistemas complexos com precisão fazem dele uma escolha preferencial em universidades e indústrias.

A escolha deste tema para um Trabalho de Curso (TC) é especialmente relevante, uma vez que as tecnologias de simulação têm um papel fundamental na modernização e no desenvolvimento sustentável dos sistemas elétricos. Com o crescente uso de energias renováveis e a necessidade de adaptar redes elétricas para fluxos bidirecionais e consumidores ativos, o PSIM e ferramentas similares tornam-se aliados estratégicos na educação de novos engenheiros e no desenvolvimento de soluções inovadoras. O estudo de sua aplicação permite ao estudante não apenas compreender melhor o funcionamento dos sistemas de potência, mas também desenvolver habilidades que serão úteis no mercado de trabalho.

1.2. Objetivos do Trabalho

Este trabalho visa explorar detalhadamente as funcionalidades e aplicações do software PSIM em projetos de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. A proposta é examinar as capacidades e limitações do PSIM, focando em como ele pode ser usado para simular e analisar sistemas variados, desde os mais simples até os mais complexos. O desenvolvimento deste TCC ajudará a compreender melhor o impacto que o uso de ferramentas de simulação tem na fase de projeto e otimização de sistemas de potência, especialmente em contextos onde a precisão e a eficiência são primordiais.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a aplicação do software PSIM em projetos de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a estrutura e o funcionamento básico do software.
- Analisar as vantagens e desvantagens do PSIM em relação a outras ferramentas de simulação amplamente usadas na área, como o MATLAB/Simulink e o PSpice.
- Simular diferentes circuitos de potência (como retificadores, inversores e conversores).
- Identificar para quais tipos de sistemas o PSIM se mostra mais eficaz.
- Analisar possíveis limitações do software em termos de precisão, complexidade e aplicabilidade.
- Avaliar a usabilidade e a eficiência do PSIM.

1.3. Justificativa da Escolha do Software PSIM

A escolha do PSIM como foco deste trabalho é justificada por diversos fatores. Primeiro, o PSIM é amplamente reconhecido no setor de eletrônica de potência, sendo utilizado em universidades e centros de pesquisa por sua interface amigável e por sua capacidade de simular sistemas complexos em alta velocidade. Sua popularidade é particularmente notável entre engenheiros que trabalham com inversores, retificadores, conversores e sistemas de controle, áreas em que a

precisão e a rapidez de simulação são cruciais para o desenvolvimento de soluções eficazes.

O PSIM também se destaca pela sua capacidade de modelar e simular sistemas de potência interligados com fontes renováveis, como energia solar e eólica, aspectos que são de grande importância na busca por fontes de energia limpa e sustentável. Em um momento em que a transição energética é uma prioridade global, a capacidade de simular tais sistemas é um diferencial para o software e um atrativo para sua utilização no âmbito acadêmico.

Outra justificativa importante é o fato de o PSIM ser uma ferramenta acessível, tanto do ponto de vista da usabilidade quanto do custo, comparado com outros softwares de simulação mais caros e complexos, como o MATLAB/Simulink. Ele oferece uma plataforma versátil que pode ser usada por estudantes e profissionais, e sua curva de aprendizado é considerada mais amigável, o que facilita a introdução de conceitos avançados de eletrônica de potência para iniciantes.

Por fim, a relevância do PSIM neste trabalho reside no fato de que seu uso e estudo permitem que futuros engenheiros tenham um contato prático com as etapas de modelagem, simulação e análise de sistemas de potência. Essa experiência é valiosa para a formação de profissionais capacitados e críticos, que poderão aplicar esse conhecimento na solução de problemas reais, seja no setor industrial, seja no acadêmico.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em capítulos que seguem uma estrutura lógica para explorar de forma ampla e detalhada o uso do PSIM em projetos de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência.

- Capítulo 1 - Introdução: Apresenta o tema, a relevância do PSIM, os objetivos e a justificativa para a escolha do software como ferramenta de simulação.
- Capítulo 2 - Fundamentação Teórica: Este capítulo discute os conceitos teóricos sobre sistemas de potência, eletrônica de potência e simulação computacional, oferecendo uma base para a compreensão das simulações realizadas no PSIM.

- Capítulo 3 - O Software PSIM: Este capítulo apresenta o PSIM, abordando sua interface, funcionalidades, módulos de simulação e as particularidades que o diferenciam de outros softwares de simulação.
- Capítulo 4 - Metodologia: Descreve os procedimentos e os métodos adotados para realizar as simulações e os estudos de caso no PSIM.
- Capítulo 5 - Estudos de Caso com PSIM: Neste capítulo, são apresentados os estudos de caso realizados com o PSIM, incluindo a descrição dos circuitos simulados, os parâmetros de cada simulação e a análise dos resultados obtidos.
- Capítulo 6 - Análise e Discussão dos Resultados: Este capítulo avalia os resultados das simulações, discute as vantagens e limitações do PSIM para cada caso analisado e realiza comparações com resultados teóricos e dados de outros softwares.
- Capítulo 7 - Conclusão e Recomendações: Resume os principais achados do estudo, aponta as contribuições do trabalho para a área de eletrônica de potência e faz sugestões para futuros estudos com o PSIM e outras ferramentas de simulação.

Essa estrutura visa fornecer uma visão ampla e aprofundada do software PSIM, explorando suas capacidades e seu potencial em simulações para projetos de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Conceitos de Sistemas de Energia Elétrica

2.1.1. Introdução aos Sistemas de Energia Elétrica

Os sistemas de energia elétrica são compostos por uma infraestrutura complexa e interconectada que visa assegurar a produção, transmissão, distribuição e o consumo de eletricidade de forma confiável, segura e eficiente. Segundo Oliveira (2019), “os sistemas elétricos constituem um dos pilares do desenvolvimento industrial e urbano, permitindo o acesso à energia em qualquer ponto de uma rede distribuída”.

Para alcançar essa eficiência, o sistema elétrico é dividido em várias etapas principais:

1. **Geração de Energia:** A geração é a primeira etapa do sistema e ocorre em usinas (hidrelétricas, térmicas, nucleares, solares e eólicas) que transformam energia mecânica, térmica ou solar em energia elétrica. “A geração em alta tensão otimiza a transferência de energia a longas distâncias ao reduzir as perdas por efeito Joule durante a transmissão,” aponta Souza (2020).
2. **Transmissão:** Nessa fase, a energia é transportada das usinas para subestações de alta tensão por meio de linhas de transmissão, que frequentemente percorrem longas distâncias. Segundo Lima (2021), “a transmissão em alta tensão é uma prática comum para reduzir as perdas e aumentar a eficiência no transporte de energia elétrica”. O uso de redes de transmissão interligadas permite uma distribuição mais uniforme da energia e reduz o risco de sobrecarga.
3. **Distribuição:** A distribuição é a etapa que leva a energia das subestações até os consumidores finais, como residências e indústrias, geralmente em baixa tensão. Costa (2018) destaca que “as subestações convertem a energia de alta para baixa tensão, adequando-a ao uso final e garantindo a segurança no consumo”.
4. **Consumo:** A energia elétrica é então utilizada em dispositivos variados, desde eletrodomésticos até máquinas industriais. A partir do consumo, verifica-se a eficiência do sistema, especialmente em relação à utilização de energia e minimização de perdas. “A eficiência na etapa de consumo é fundamental

para manter a sustentabilidade e reduzir o desperdício de energia,” observa Gonçalves (2022).

Os sistemas de energia elétrica, ao integrarem todas essas etapas, demandam um planejamento rigoroso para minimizar as perdas, otimizar a eficiência e garantir o fornecimento contínuo de eletricidade.

2.1.2. Modelagem de Circuitos em Eletrônica de Potência

A eletrônica de potência é a área que trata do estudo e desenvolvimento de dispositivos e circuitos capazes de converter, controlar e processar energia elétrica de forma eficiente e adaptada às necessidades de cada aplicação. A modelagem de circuitos em eletrônica de potência é fundamental para prever o comportamento dos componentes e garantir a estabilidade e eficiência de sistemas que operam sob diferentes condições de carga e tensão.

A modelagem permite representar matematicamente o funcionamento de componentes como inversores, conversores e retificadores. De acordo com Teixeira (2021), “a modelagem de circuitos é essencial para a previsão de desempenho e para o projeto de sistemas de controle em eletrônica de potência, garantindo a eficiência antes mesmo da construção física do sistema.”

Abaixo estão os modelos principais utilizados na eletrônica de potência:

1. Modelo de Estado: Este modelo permite a representação do circuito como um conjunto de equações diferenciais, facilitando o estudo de comportamento dinâmico dos sistemas. Martins (2019) explica que “o modelo de estado é particularmente útil em análises de sistemas não lineares, onde a resposta dinâmica dos componentes deve ser rigorosamente monitorada.”
2. Modelo Equivalente: Utilizado para simplificar circuitos complexos, o modelo equivalente substitui componentes ou partes do circuito por representações simplificadas. Essa abordagem é importante em simulações, pois reduz o tempo de processamento e permite uma análise mais direta dos pontos principais do circuito. “O modelo equivalente é amplamente aplicado em simulações de circuitos complexos no PSIM, permitindo simplificações que não comprometem significativamente a precisão,” comenta Freitas (2020).

No contexto de engenharia elétrica, a simulação computacional é uma ferramenta indispensável para projetar e otimizar circuitos em eletrônica de potência.

Abaixo estão descritos os principais métodos de simulação utilizados no PSIM, um dos softwares mais usados para modelagem em eletrônica de potência:

- **Simulação no Domínio do Tempo:** Permite analisar como variáveis como tensão e corrente se comportam ao longo do tempo em resposta a diferentes estímulos e condições de carga. "Esse tipo de simulação é fundamental para projetar circuitos de eletrônica de potência, onde a resposta temporal é essencial", ressalta Costa (2022).
- **Simulação no Domínio da Frequência:** Este método avalia a resposta do circuito em relação às frequências de entrada, sendo muito útil em análises de estabilidade e resposta em frequência. Martins (2020) afirma que "a análise de frequência é essencial em sistemas que exigem precisão no controle, como inversores e retificadores de alta potência."
- **Simulação Estática e Dinâmica:** Enquanto a simulação estática examina o circuito em um ponto fixo de operação, a simulação dinâmica permite observar respostas transitórias. Gonçalves (2021) reforça que "a combinação de simulações estática e dinâmica oferece uma visão abrangente e é crucial para otimizar o desempenho de circuitos complexos."
- **Simulação em Circuitos Complexos e Multiníveis:** É essencial para quem deseja aprofundar os seus conhecimentos em eletrônica de potência e controle de sistemas. Este módulo permite a análise precisa de topologias complexas, como conversores multiníveis (NPC, cascata, flying capacitor, entre outros), aplicados em sistemas de alta eficiência e elevada potência. Utilizando o PSIM, uma das ferramentas de simulação mais utilizadas na área, os alunos aprendem a modelar, testar e validar circuitos com diferentes estratégias de modulação e controle. Através de simulações detalhadas, este módulo contribui para o desenvolvimento de competências práticas e teóricas, preparando os utilizadores para desafios reais em projetos industriais e de investigação.

Esses métodos permitem que engenheiros e projetistas realizem análises completas sem a necessidade de protótipos físicos iniciais, economizando tempo e recursos e permitindo a detecção de problemas antes da construção do sistema. No

PSIM, esses métodos são combinados para proporcionar uma experiência de simulação avançada e precisa.

No PSIM, os modelos de circuito desempenham um papel fundamental na simulação de diversos componentes de eletrônica de potência. Abaixo, detalhamos os principais componentes simulados e suas aplicações:

1. Retificadores: Estes circuitos convertem corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) e são amplamente utilizados em fontes de alimentação e sistemas de energia renovável. Lima (2020) destaca que “a simulação de retificadores no PSIM é útil para analisar a eficiência e o comportamento do circuito em diferentes condições de carga.”
2. Inversores: Inversores são dispositivos que convertem CC em CA e são essenciais em sistemas que utilizam fontes de energia DC, como baterias e painéis solares. Gonçalves (2022) comenta que “inversores são críticos em sistemas renováveis, pois permitem a integração de fontes de energia com a rede elétrica, otimizando a eficiência do sistema.”
3. Conversores: Conversores são dispositivos que ajustam a forma da corrente de acordo com as necessidades do sistema. Esses conversores são fundamentais em sistemas que exigem alternância entre as formas de energia, como painéis solares e veículos elétricos. “A simulação de conversores permite ajustar as especificações do sistema para uma operação otimizada,” observa Teixeira (2021).

2.2. Simulação Computacional em Engenharia Elétrica

2.2.1. Importância das Simulações

A simulação computacional é uma técnica indispensável em engenharia elétrica, pois possibilita que engenheiros realizem análises e testes de sistemas complexos sem a necessidade de protótipos físicos. Essa prática não apenas economiza tempo e custos, mas também minimiza os riscos associados ao teste de dispositivos de alta potência e de sistemas críticos. Segundo Sousa (2019), “a simulação computacional permite uma análise detalhada dos sistemas, possibilitando ajustes e verificações prévias que ajudam a garantir a eficiência e a segurança do sistema.”

A importância da simulação computacional em engenharia elétrica tornou-se mais evidente com o aumento da complexidade dos sistemas de energia elétrica e

de eletrônica de potência. Em um cenário onde a busca por eficiência energética e a utilização de fontes renováveis é crescente, os engenheiros precisam ter segurança no desempenho dos sistemas desde as etapas iniciais do projeto. “Com a simulação computacional, é possível prever o comportamento de sistemas sob diferentes condições operacionais, o que permite a análise de cenários adversos sem a necessidade de execução em campo,” afirma Costa (2021).

Para projetos de eletrônica de potência e de sistemas de energia elétrica, o software PSIM destaca-se por sua eficiência em simular componentes como inversores, retificadores, e conversores, além de circuitos complexos. De acordo com Oliveira (2020), "o PSIM permite que o projetista simule desde circuitos de baixa complexidade até sistemas de controle avançado, como os usados em máquinas industriais e dispositivos de conversão de energia renovável." Essa capacidade de simulação detalhada permite que os engenheiros testem sistemas que envolvem não apenas circuitos de potência, mas também a integração de componentes de controle.

O PSIM também se destaca por ser uma ferramenta acessível, intuitiva e eficiente para a simulação de circuitos de eletrônica de potência, oferecendo uma interface que facilita o desenvolvimento e o teste de soluções. Conforme enfatiza Lima (2022), “a facilidade de uso do PSIM, combinada com sua precisão na simulação de sistemas de eletrônica de potência, torna-o uma escolha ideal tanto para projetos acadêmicos quanto para aplicações industriais.”

Os benefícios do uso de simulação computacional se estendem para além das fases iniciais de um projeto. Com a possibilidade de realizar testes exaustivos em ambientes seguros, os engenheiros podem refinar os parâmetros de um sistema antes de sua implementação física. Ramos (2021) aponta que "a simulação computacional em projetos de eletrônica de potência e sistemas elétricos não só reduz o tempo e os custos envolvidos, mas também permite que o sistema seja validado em diferentes condições operacionais antes de sua construção prática."

2.2.2. Aplicação dos Principais Métodos de Simulação

Para a simulação de sistemas em engenharia elétrica, existem vários métodos que variam conforme o objetivo da análise e as características do circuito a ser estudado. Cada método permite uma visão específica do comportamento do

sistema, sendo útil para resolver diferentes tipos de problemas de engenharia. Dentre os métodos mais comuns estão:

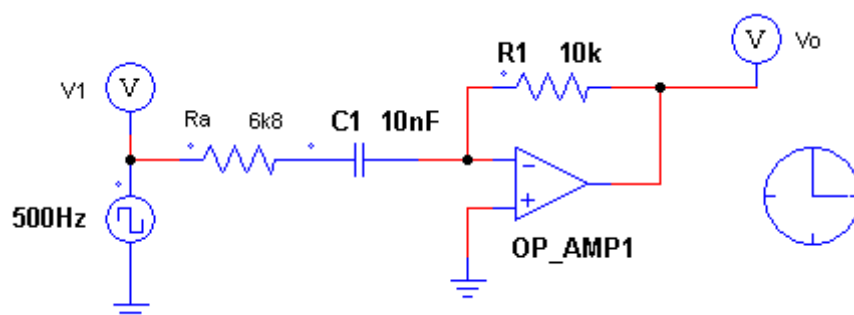
a) Simulação no Domínio do Tempo

A simulação no domínio do tempo é um dos métodos mais utilizados na análise de sistemas elétricos, pois permite observar como as variáveis do circuito (tensão, corrente, potência, etc.) variam ao longo do tempo. Esse método é especialmente útil para entender as respostas transitórias dos circuitos, como picos de corrente e tensão, que ocorrem durante mudanças abruptas de carga ou falhas temporárias. Conforme Nogueira (2020), "a análise no domínio do tempo é indispensável para o estudo das respostas dinâmicas dos sistemas, especialmente em eletrônica de potência, onde é fundamental prever o comportamento em resposta a condições variadas."

Esse método é amplamente utilizado no PSIM, onde engenheiros simulam o comportamento dos circuitos e dispositivos para visualizar, em tempo real, como um sistema reage a alterações em parâmetros como carga ou frequência. Além disso, a simulação no domínio do tempo permite identificar falhas e limitações dos componentes de forma antecipada, ajudando a evitar problemas em aplicações práticas.

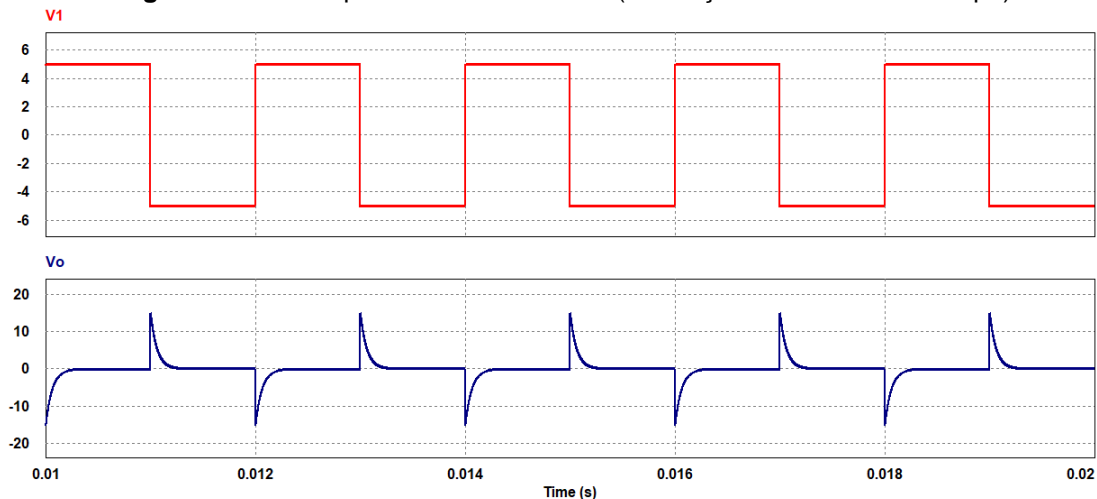
A Figura 1.a apresenta um circuito utilizado para exemplificar uma simulação no domínio do tempo. Trata-se de um circuito diferenciador utilizando amplificador operacional. Na Figura 1.b estão representadas as formas de onda da tensão aplicada na entrada do circuito e da resposta na saída a partir deste tipo de análise.

Figura 1.a – Exemplo de circuito (simulação no domínio do tempo).



Fonte: Autor (2025).

Figura 1.b – Exemplo de formas de onda (simulação no domínio do tempo).



Fonte: Autor (2025).

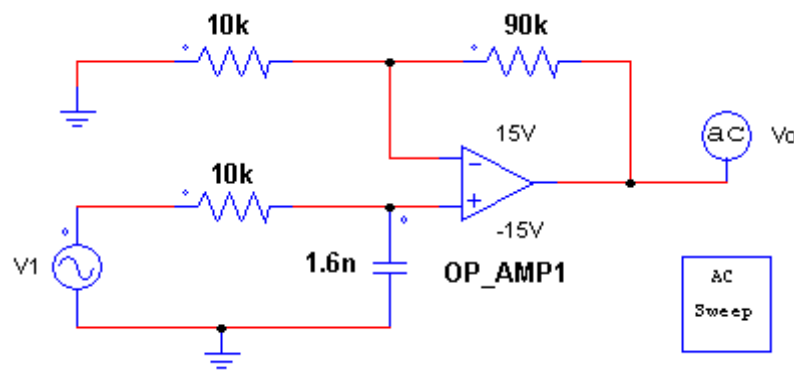
b) Simulação no Domínio da Frequência

A simulação no domínio da frequência é outro método essencial, especialmente em sistemas de controle e de eletrônica de potência que necessitam de uma análise da resposta a uma faixa específica de frequência. Esse tipo de simulação permite observar como o circuito responde a sinais de diferentes faixas de frequência, tornando-se fundamental para o estudo de ressonâncias e estabilidade. "A análise de resposta em frequência é indispensável para sistemas que operam com sinais senoidais e harmônicos, como em inversores de frequência e filtros," menciona Oliveira (2019).

No PSIM, a simulação no domínio da frequência é utilizada para projetar circuitos que necessitam de um desempenho estável em faixas de frequência específicas. Este tipo de análise é comum em projetos que envolvem filtros passivos e ativos, onde a resposta a uma determinada faixa de frequência deve ser controlada para evitar interferências indesejadas.

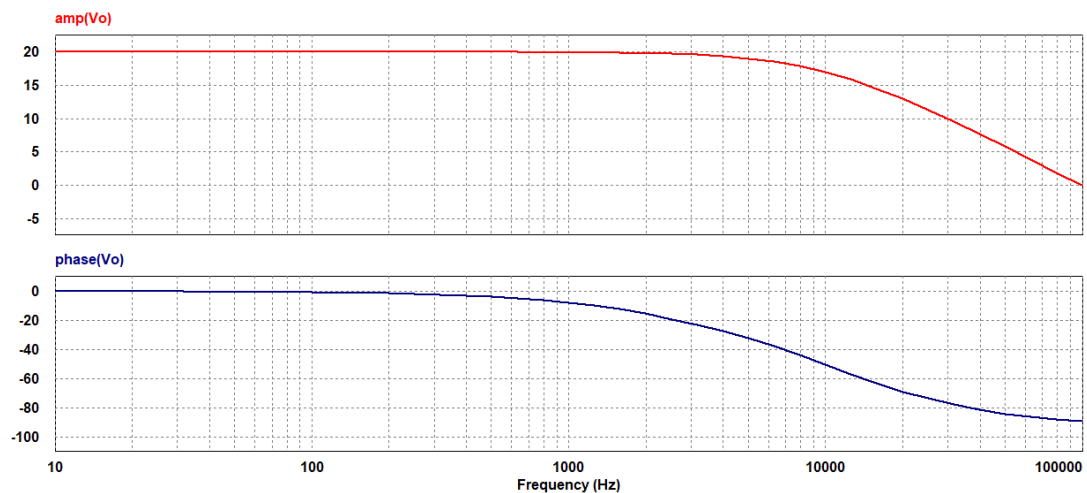
A Figura 2.a apresenta um circuito utilizado para exemplificar uma simulação no domínio da frequência. Trata-se de um filtro ativo passa-baixas utilizando amplificador operacional. Na Figura 2.b estão representadas os diagramas de magnitude e fase (diagrama de *Bode*) obtidos partir deste tipo de análise e simulação no domínio da frequência.

Figura 2.a – Exemplo de formas de onda (simulação no domínio da frequência).



Fonte: Autor (2025).

Figura 2.b – Diagrama de bode (simulação no domínio da frequência).



Fonte: Autor (2025).

c) Simulação Estática e Dinâmica

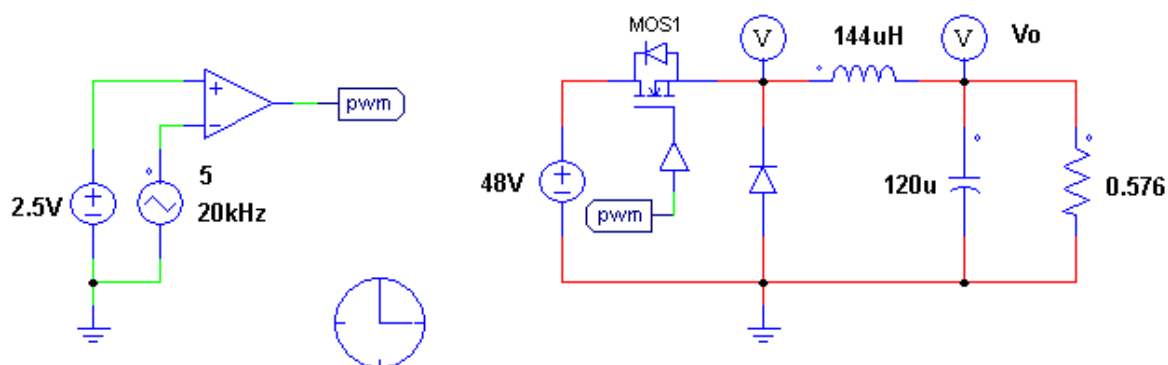
A simulação estática e a simulação dinâmica são métodos fundamentais para avaliar o comportamento de um sistema em condições de operação fixa ou em condições transitórias. A simulação estática permite observar o desempenho do sistema em um ponto de operação específico, enquanto a simulação dinâmica é empregada para analisar as respostas transitórias, identificando como o sistema responde em situações de mudança rápida, como alterações de carga e variações de tensão de entrada. Segundo Santos (2022), "as simulações estática e dinâmica complementam-se, pois juntas proporcionam uma análise completa tanto de pontos operacionais quanto de respostas a estímulos transitórios."

Esses métodos de simulação são amplamente aplicados em circuitos de eletrônica de potência no PSIM, principalmente para analisar inversores e

conversores em condições variáveis. A análise estática permite verificar o comportamento em uma carga constante, enquanto a dinâmica é fundamental para testar circuitos em condições de carga variável, comuns em sistemas de fontes renováveis, como energia solar e eólica.

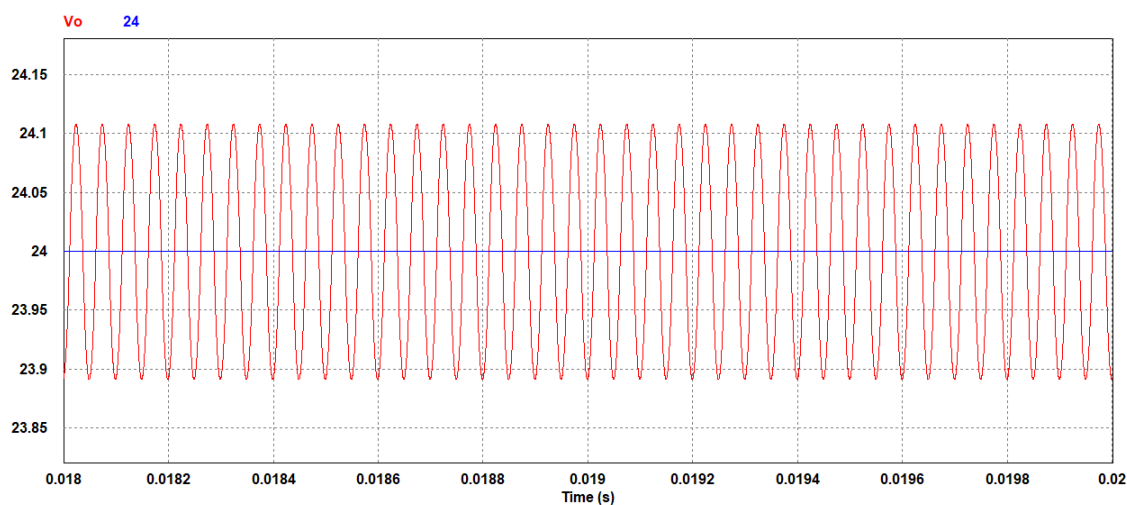
A Figura 3.a apresenta um circuito utilizado para exemplificar uma simulação estática e uma simulação dinâmica. Trata-se de um conversor cc-cc abaixador utilizando MOSFET e modulação por largura de pulso (PWM). Na Figura 3.b está representada a forma de onda da tensão na saída do conversor operando em regime permanente periódico e na Figura 3.c está representada a mesma forma de onda obtida durante o transitório de partida do conversor.

Figura 3.a – Exemplo de circuito estático e dinâmico (conversor PWM).



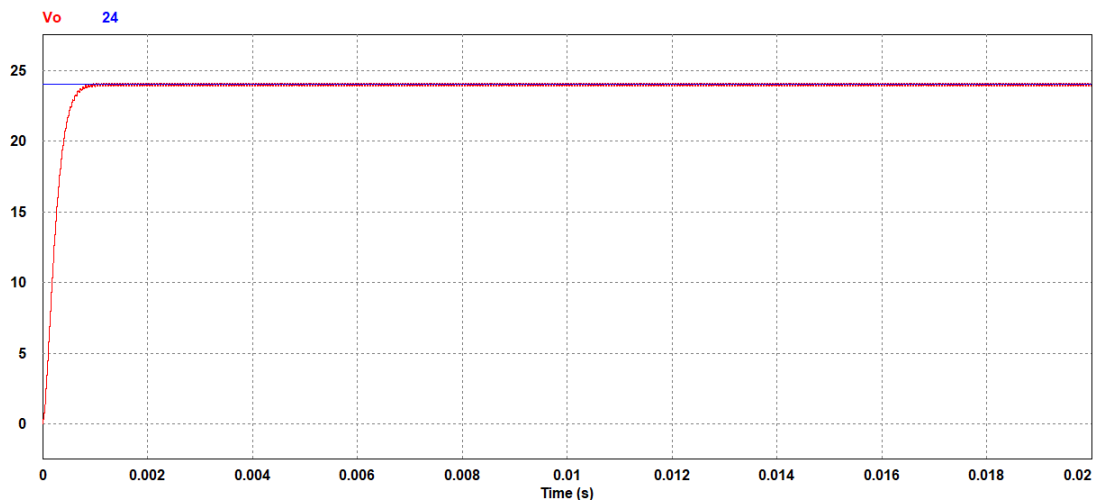
Fonte: Autor (2025).

Figura 3.b – Exemplo de circuito estático e dinâmico (regime permanente periódico).



Fonte: Autor (2025).

Figura 3.c – Exemplo de circuito estático e dinâmico (transitório de partida do conversor).



Fonte: Autor (2025).

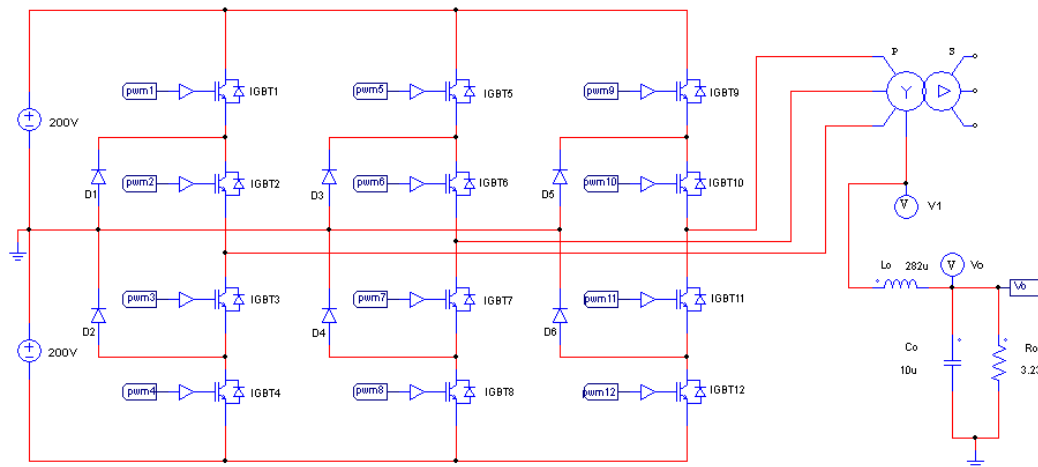
d) Métodos de Simulação em Circuitos Complexos e Multiníveis

Os circuitos multiníveis são bastante comuns em sistemas de eletrônica de potência, especialmente em aplicações industriais de alta potência e em inversores de corrente. Esses circuitos complexos exigem métodos de simulação que permitam analisar o comportamento de cada estágio do circuito. Como aponta Lima (2020), "a simulação de circuitos multiníveis requer softwares que possam processar com precisão as interações entre diferentes componentes e níveis de tensão, proporcionando uma análise detalhada da eficiência e da estabilidade."

O PSIM oferece suporte a esse tipo de simulação, permitindo que engenheiros configurem circuitos multiníveis e testem o desempenho em diversas condições operacionais. Isso é especialmente útil para o desenvolvimento de sistemas que exigem uma alta precisão no controle de tensões e correntes, como inversores de tensão para motores elétricos de grande porte.

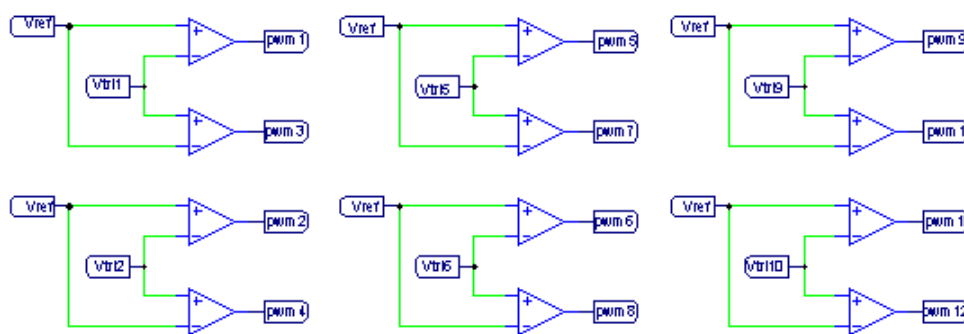
A Figura 4.a apresenta como exemplo, um circuito conversor multinível utilizado em simulação. Trata-se de um inversor de 7 níveis utilizando IGBTs, modulação por largura de pulso senoidal (SPWM) e células de comutação de múltiplos estados (CCME). Na Figura 4.c está representada as formas de onda da tensão na saída do conversor antes e após a filtragem e a forma de onda da corrente na carga.

Figura 4.a – Circuito inversor de 7 níveis utilizado em simulação: (a) circuito de potência e circuito



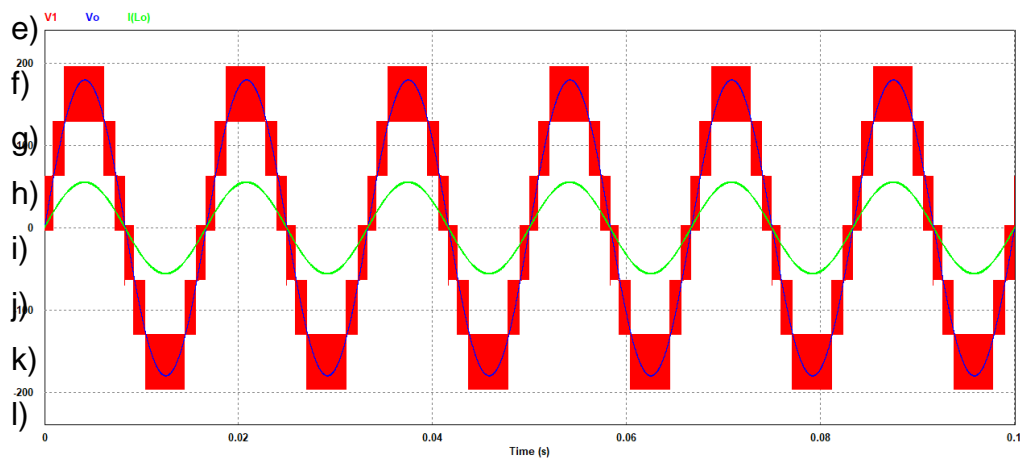
Fonte: Autor (2025).

Figura 4.b – Circuito inversor de 7 níveis utilizado em simulação



Fonte: Autor (2025).

Figura 4.c – Circuito inversor de 7 níveis utilizado em simulação (formas de onda obtidas em simulação)



Fonte: Autor (2025).

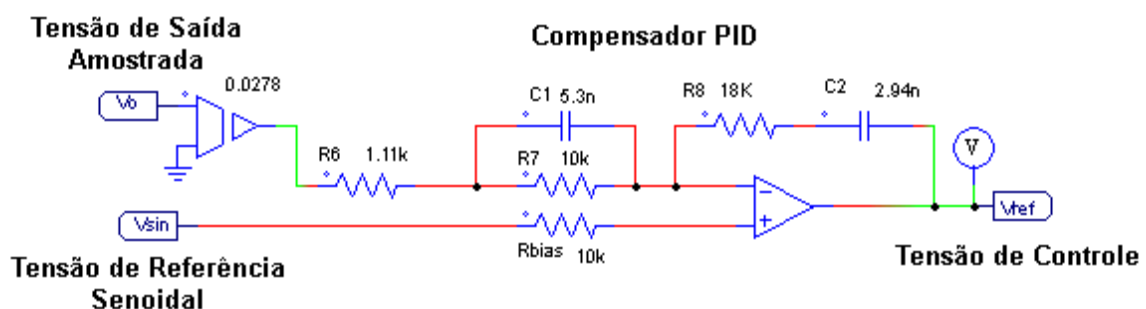
e) Simulação com Integração de Controle

Nos últimos anos, a integração de sistemas de controle avançado nos circuitos de eletrônica de potência tornou-se essencial. A simulação com integração de controle permite que engenheiros testem sistemas de controle de feedback, como PID (Proporcional-Integral-Derivativo), e outros tipos de controladores antes de sua implementação física. Conforme destaca Ferreira (2019), "a simulação de controle integrado possibilita a otimização dos parâmetros de controle em um ambiente seguro, evitando ajustes físicos dispendiosos."

No PSIM, essa simulação é frequentemente utilizada para sistemas que necessitam de controle de precisão, como aqueles que ajustam a velocidade de motores elétricos ou que regulam a tensão de saída em fontes de energia renovável. A capacidade do PSIM de integrar modelos de controle facilita o ajuste dos parâmetros para que o sistema opere com eficiência máxima, mantendo a estabilidade necessária.

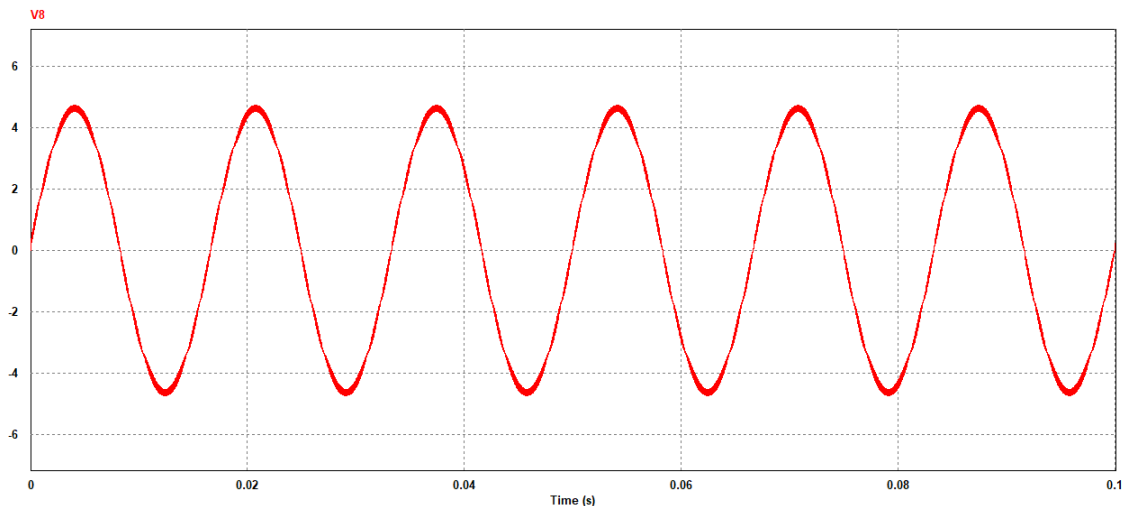
A Figura 5.a apresenta um circuito utilizado para exemplificar uma simulação com integração de sistemas de controle. Trata-se de um circuito compensador PID com amplificador operacional utilizado para gerar a tensão de controle para o circuito de comando do inversor de 7 níveis representado na Figura 4.a. Na Figura 5.b está representada a forma de onda da tensão de controle obtida na saída do compensador PID.

Figura 5.a – Circuito compensador PID para o inversor de 7 níveis: (a) circuito;



Fonte: Autor (2025).

Figura 5.b – Circuito compensador PID para o inversor de 7 níveis: (b) forma de onda da tensão na saída do compensador.



Fonte: Autor (2025).

A variedade de métodos de simulação disponíveis no PSIM permite que os engenheiros adaptem o software a diversas necessidades de análise e controle, simulando desde circuitos simples até sistemas complexos de eletrônica de potência. Como afirma Cardoso (2021), "a flexibilidade dos métodos de simulação é uma das principais vantagens dos softwares de análise em engenharia elétrica, proporcionando precisão e economia de recursos."

Diante disso, constata-se que a simulação é essencial para garantir a eficiência, a segurança e a confiabilidade de sistemas complexos antes de sua implementação física. O software PSIM, com suas ferramentas de simulação em diversos domínios e suportes a métodos complexos de análise, demonstra ser uma escolha valiosa para engenheiros que buscam otimizar a performance e a segurança de sistemas de energia elétrica e de eletrônica de potência.

2.3. Principais Componentes e Tipos de Circuitos em Eletrônica de Potência

A eletrônica de potência estuda a conversão, controle e adaptação da energia elétrica por meio de componentes e circuitos especializados, utilizados para transformar correntes e tensões de acordo com as necessidades do sistema. Segundo Lima (2020), "os circuitos de eletrônica de potência representam o núcleo de funcionamento dos sistemas modernos de energia, especialmente em aplicações industriais e de energia renovável." Nesse contexto, o software PSIM surge como uma ferramenta relevante para projetar, simular e analisar circuitos de eletrônica de

potência, permitindo avaliar o desempenho de dispositivos como retificadores, inversores e conversores, que são essenciais para diversos tipos de aplicação.

2.3.1. Retificadores

Os retificadores são dispositivos que convertem corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), sendo amplamente utilizados em fontes de alimentação e sistemas de energia renovável. De acordo com Santos (2021), "os retificadores são fundamentais para transformar a energia CA gerada em CC, permitindo o funcionamento de sistemas que requerem corrente contínua, como baterias, sistemas de armazenamento de energia e eletrônicos de consumo."

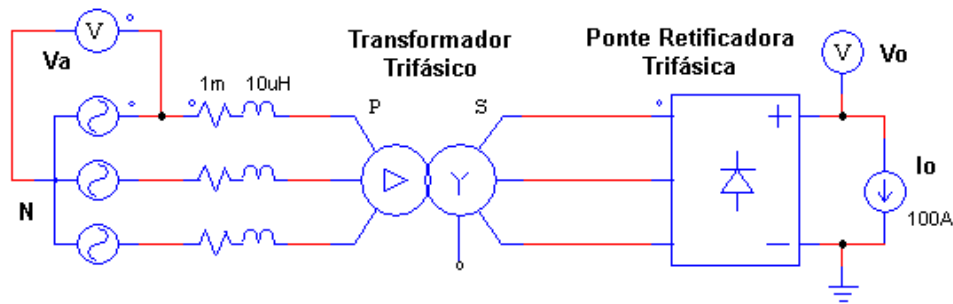
Existem dois tipos principais de retificadores:

1. Retificadores Monofásicos: Utilizados em aplicações de baixa potência, como carregadores de bateria de dispositivos móveis e pequenos eletrodomésticos. Segundo Almeida (2019), "os retificadores monofásicos são adequados para aplicações residenciais e comerciais de menor escala, onde a demanda de energia não é tão elevada."
2. Retificadores Trifásicos: Comuns em aplicações industriais e sistemas de alta potência. "Para suportar as altas demandas de potência e garantir uma conversão eficiente, os retificadores trifásicos são preferidos em sistemas industriais e redes de distribuição de larga escala," observa Ferreira (2020).

No PSIM, os retificadores podem ser simulados para avaliar o comportamento da tensão e corrente de saída sob diferentes condições de carga e variáveis de entrada. O software permite ajustar os parâmetros dos retificadores e simular possíveis interferências ou quedas de tensão que possam ocorrer na operação prática.

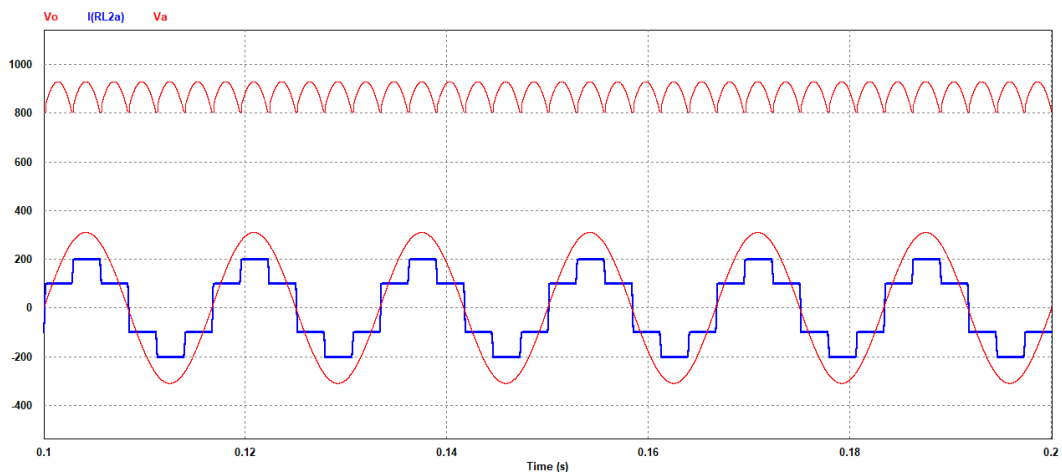
A Figura 6.a apresenta um circuito utilizado para exemplificar uma simulação de um retificador. Trata-se de um retificador trifásico de 6 pulsos, isolado em baixa frequência, utilizando diodos de potência e um transformador em conexão Δ -Y. Na Figura 6.b estão representadas as formas de onda da tensão e corrente na entrada e da tensão na saída do conversor obtidas em simulação computacional no PSIM.

Figura 6.a – Retificador trifásico de 6 pulsos: (a) circuito



Fonte: Autor (2025).

Figura 6.b – Retificador trifásico de 6 pulsos: (b) formas de onda.



Fonte: Autor (2025).

Segundo Dias (2022), "a simulação de retificadores no PSIM é essencial para prever o comportamento do sistema e ajustar parâmetros de projeto, como a frequência de comutação e as tensões de entrada." Essas simulações ajudam a antecipar problemas e otimizar a eficiência antes da implementação prática do retificador.

2.3.2. Inversores

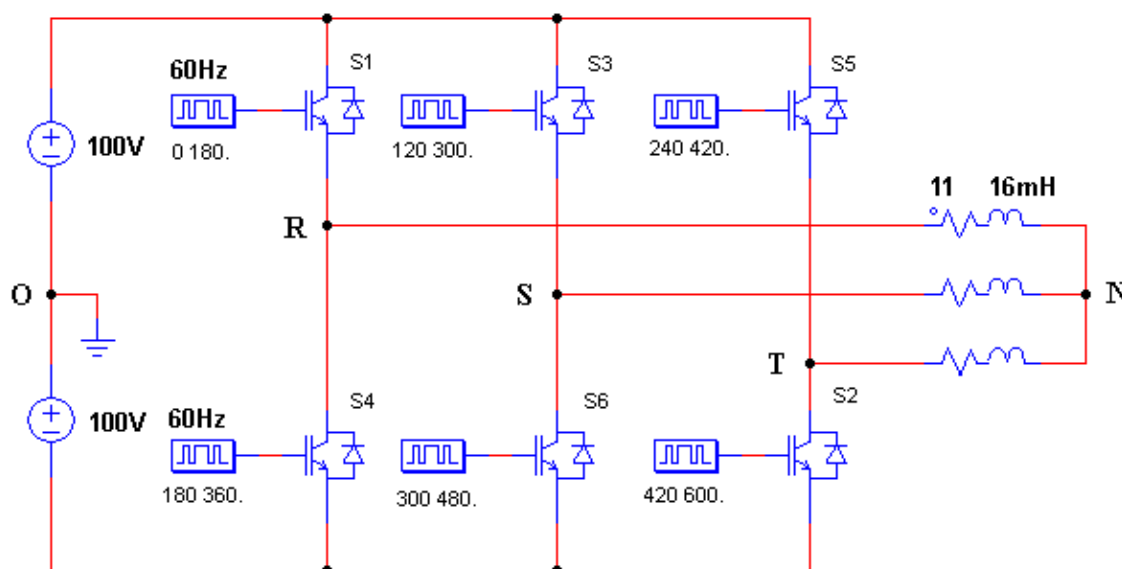
Os inversores convertem corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), permitindo a alimentação de dispositivos que requerem uma tensão alternada para operar. Esses dispositivos são cruciais em sistemas fotovoltaicos e outras aplicações que dependem de fontes de energia CC, como baterias e veículos elétricos.

Os principais tipos de inversores são:

1. Inversor de Tensão: Projeta uma tensão de saída constante, útil para alimentar motores e equipamentos que requerem um nível de tensão específico. De acordo com Pereira (2021), "o inversor de tensão é amplamente utilizado em acionamentos de motores CA, permitindo controle preciso e economia de energia."
2. Inversor de Frequência: Regula a frequência de saída, ajustando a velocidade de motores elétricos. "Os inversores de frequência desempenham um papel importante no controle de velocidade de motores, particularmente em indústrias onde a precisão é essencial," afirma Silva (2020).

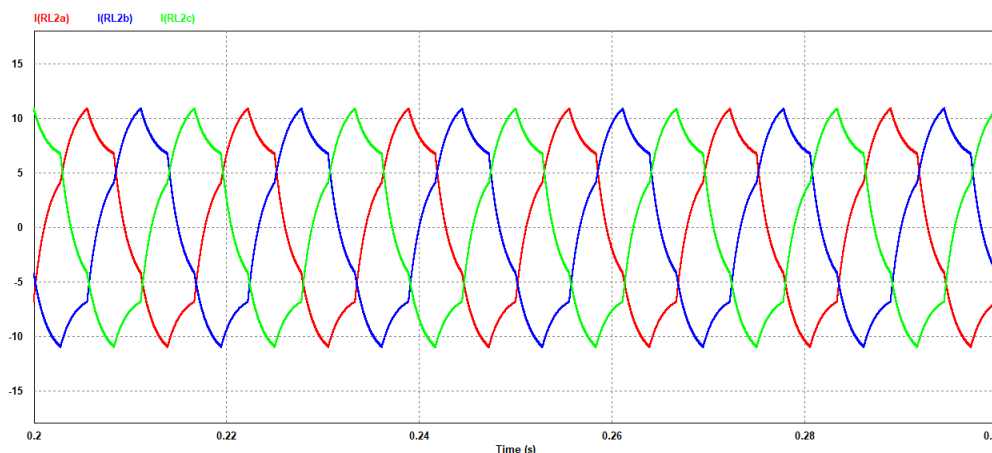
A simulação de inversores no PSIM permite que engenheiros projetem inversores que se adaptem a diferentes cargas e demandas de operação, observando aspectos como estabilidade de frequência e controle de amplitude. "O uso do PSIM para simulação de inversores possibilita observar o comportamento dinâmico dos sistemas e otimizar o desempenho dos circuitos" destaca Oliveira (2021).

Figura 7.a – Diagrama de um inversor trifásico baseado em chaveamento PWM.



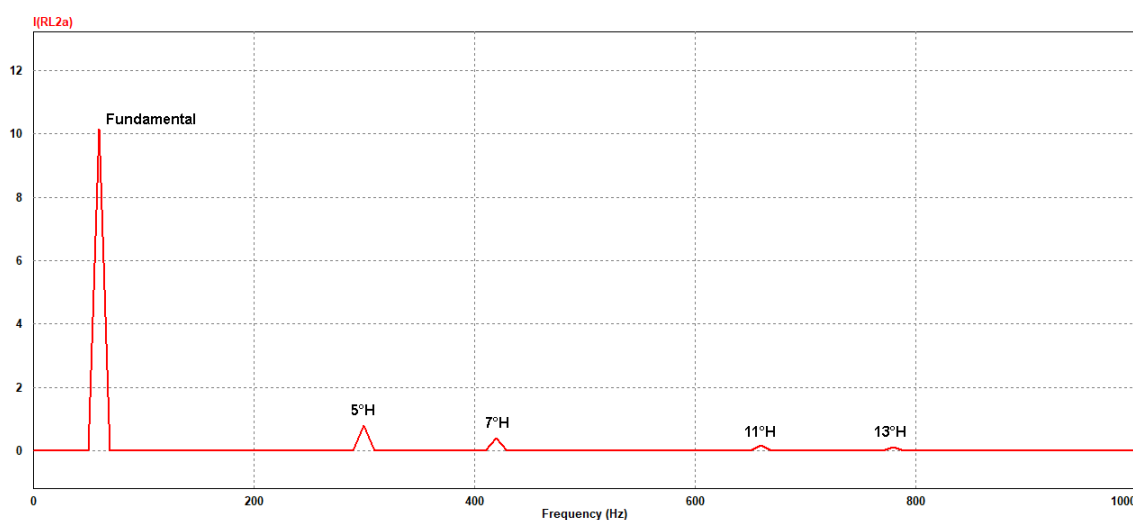
Fonte: Autor (2025).

Figura 7.b – Gráfico das tensões de saída do inversor trifásico.



Fonte: Autor (2025).

Figura 7.c – Espectro de frequência da tensão de saída do inversor trifásico.



Fonte: Autor (2025).

Além disso, as simulações ajudam a prever o comportamento do sistema em situações de sobrecarga ou condições extremas, evitando falhas e assegurando um funcionamento seguro e eficiente. Um dos recursos mais utilizados no PSIM é o ajuste das variáveis de frequência e tensão para estudar o comportamento dos inversores em sistemas de energia renovável, como eólicos e fotovoltaicos.

2.3.3. Conversores CA-CC e CC-CA

Conversores são dispositivos essenciais que ajustam a forma e amplitude da energia elétrica para atender às necessidades do sistema, convertendo CA em CC (CA-CC) ou CC em CA (CC-CA). Segundo Costa (2019), "os conversores são fundamentais para sistemas de armazenamento e geração de energia, facilitando a integração de fontes renováveis e baterias com a rede elétrica."

Os dois tipos principais de conversores são:

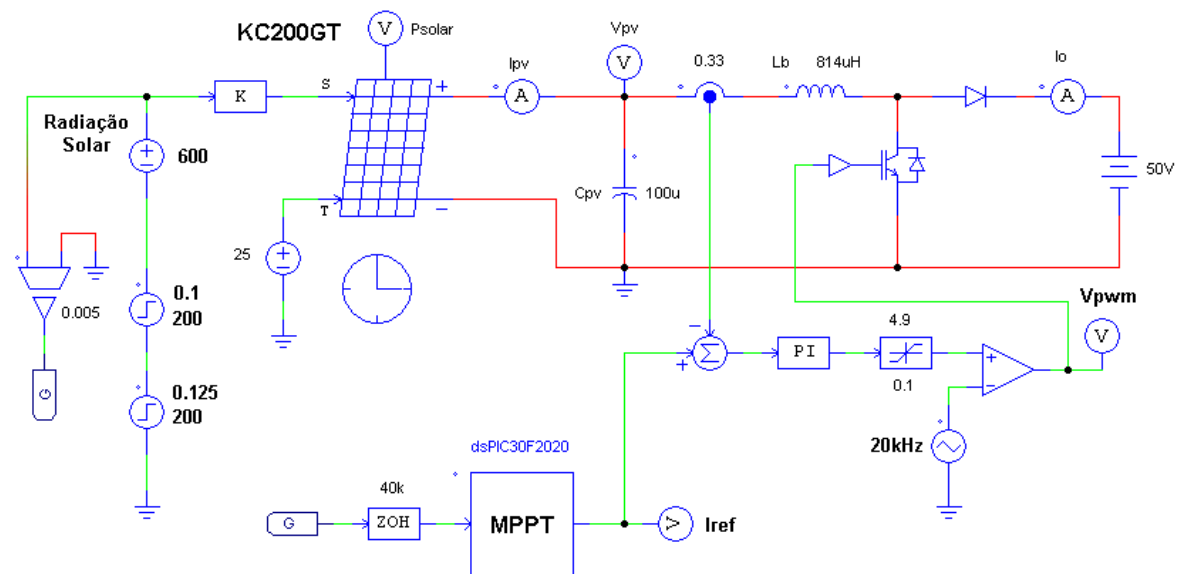
1. Conversores CA-CC: Utilizados em carregadores de bateria e fontes de alimentação, onde a corrente alternada é convertida em corrente contínua para o uso em, por exemplo, dispositivos eletrônicos e sistemas de energia solar. "Os conversores CA-CC permitem a transformação da energia da rede em um formato compatível com dispositivos eletrônicos, sendo amplamente aplicados em fontes de alimentação," comenta Ferreira (2020).
2. Conversores CC-CA: Utilizados em sistemas, por exemplo, fotovoltaicos e veículos elétricos, onde a energia gerada em CC precisa ser convertida para CA para ser integrada à rede ou usada em dispositivos que requerem uma entrada alternada. "Os conversores CC-CA possibilitam que a energia gerada por fontes renováveis seja compatível com a rede elétrica," afirma Moreira (2018).

No PSIM, a simulação de conversores permite que engenheiros ajustem e verifiquem a eficiência dos dispositivos sob diversas condições. As simulações são úteis para avaliar a estabilidade da tensão de saída e o controle de qualidade da energia, especialmente em aplicações onde a precisão e estabilidade são essenciais, como em inversores de energia solar.

De acordo com Carvalho (2021), "a simulação de conversores no PSIM é uma ferramenta poderosa para projetar sistemas de energia solar e veículos elétricos, permitindo otimizar a eficiência e segurança do sistema." Essa análise ajuda a identificar possíveis pontos de falha e assegurar a conformidade com padrões de segurança, o que é essencial em projetos de larga escala e aplicações industriais.

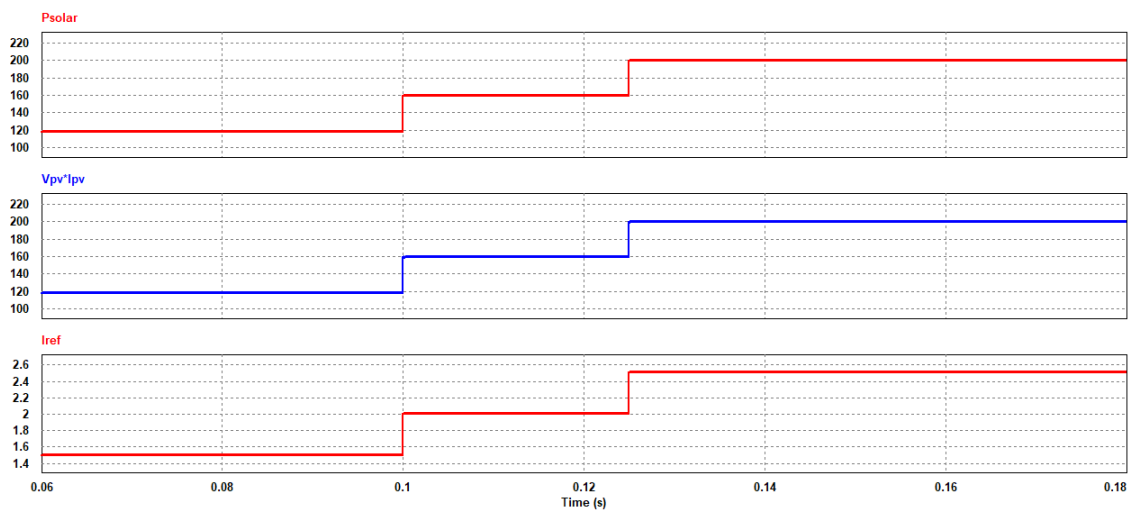
Com os recursos do PSIM, é possível projetar, ajustar e prever o comportamento de retificadores, inversores e conversores, facilitando a implementação prática e melhorando a eficiência e segurança dos sistemas de energia elétrica. Esta fundamentação teórica apresenta uma base sólida para o desenvolvimento do projeto, destacando o papel da eletrônica de potência e do PSIM como ferramentas de análise e otimização em engenharia elétrica.

Figura 8.a – Diagrama de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Autor (2025).

Figura 8.b – Gráficos de resposta do sistema fotovoltaico.



Fonte: Autor (2025).

3. O Software PSIM

3.1. Visão Geral e Histórico do PSIM

O PSIM é um software amplamente utilizado para simulação de sistemas de potência e eletrônica de potência. Projetado para realizar simulações rápidas e precisas, o PSIM tornou-se uma ferramenta essencial para engenheiros e pesquisadores, proporcionando uma plataforma robusta para desenvolvimento, análise e validação de circuitos e sistemas complexos de energia. Desde sua criação, tem sido utilizado em setores que variam desde projetos acadêmicos até aplicações industriais.

O PSIM foi desenvolvido pela Powersim Inc., uma empresa especializada em softwares de simulação de sistemas de energia e eletrônica de potência. Lançado inicialmente na década de 1990, o PSIM rapidamente ganhou destaque por sua eficiência e precisão. Ao longo dos anos, o software evoluiu, incorporando novos recursos e módulos para atender às crescentes demandas da indústria e do meio acadêmico. Atualmente, ele é uma ferramenta modular que oferece uma interface intuitiva e permite simulações complexas com rapidez e flexibilidade.

O PSIM permite a simulação de uma ampla gama de sistemas, incluindo fontes de energia renovável, sistemas de controle de potência e circuitos eletrônicos complexos. Suas principais características incluem:

- **Rapidez de Simulação:** Desenvolvido para oferecer alto desempenho e baixa latência em simulações.
- **Flexibilidade:** Módulos como o SimCoder e o Motor Control Design facilitam a integração com controladores de hardware e possibilitam uma análise detalhada.
- **Interface Intuitiva:** O software é conhecido por sua interface amigável, que permite uma curva de aprendizado mais suave para novos usuários.
- **Avanços Recentes e Integrações:** O PSIM continua a evoluir, integrando recursos para simulações de sistemas em malha fechada, algoritmos avançados de controle e modelagem de componentes específicos de energia. Com o avanço dos veículos elétricos e das energias renováveis, o PSIM vem incorporando módulos dedicados para analisar esses sistemas com precisão.

3.2. Principais Funcionalidades e Ferramentas do PSIM

O PSIM oferece uma vasta gama de funcionalidades que atendem a diversos campos da engenharia elétrica e eletrônica, com destaque para eletrônica de potência, controle de máquinas elétricas e simulações com energias renováveis. Este software é conhecido por sua interface amigável e simplicidade de configuração, que facilitam o trabalho de modelagem e simulação.

3.2.1. Módulo de Eletrônica de Potência

O módulo de eletrônica de potência é um dos principais atrativos do PSIM, proporcionando a capacidade de simular conversores de energia como inversores, conversores CC-CC, entre outros circuitos essenciais em sistemas de energia.

- **Funcionalidades e Vantagens:** O módulo permite a configuração de topologias de circuitos e a simulação de diferentes modos de operação, sendo capaz de analisar as respostas de frequência e a eficiência energética. "O PSIM possibilita simulações de alta fidelidade, necessárias para o estudo e aprimoramento de topologias complexas de conversores" (Santos, 2022).

3.2.2. Módulo de Controle de Máquinas Elétricas

O módulo de controle de máquinas elétricas permite a simulação de sistemas de controle para motores e geradores, possibilitando a análise de diferentes estratégias de controle, como controle por campo orientado (FOC), controle direto de torque (DTC) e controle escalar.

- **Funcionalidades e Vantagens:** Esse módulo é essencial para projetistas que trabalham com máquinas de corrente alternada e corrente contínua. Segundo o especialista em sistemas de controle, "o PSIM facilita o estudo de sistemas de controle avançados para motores de indução e síncronos, oferecendo bibliotecas prontas para simulação e modelagem" (Andrade, 2023).

"A precisão dos modelos e o suporte para diferentes estratégias de controle tornam o PSIM ideal para estudar o comportamento dinâmico de motores em diferentes cenários operacionais" (Moreira, 2023).

3.2.3. Simulações com Energias Renováveis

O PSIM também oferece suporte para simulações voltadas para o setor de energias renováveis, como sistemas fotovoltaicos, eólicos e híbridos. Esse módulo é

crucial para o desenvolvimento de sistemas de geração distribuída, cada vez mais presentes em micro e redes inteligentes.

- **Funcionalidades e Vantagens:** O módulo de energias renováveis permite simulações que integram painéis solares, turbinas eólicas, inversores e baterias, considerando condições de irradiação solar e velocidade do vento variáveis. "O PSIM oferece modelos dinâmicos de fontes renováveis que possibilitam uma análise detalhada dos impactos de variações de energia na rede" (Soares, 2024).

"A possibilidade de simular condições reais no PSIM, como sombreamento parcial em painéis fotovoltaicos e perfis de carga variáveis, é um diferencial para projetos de energia renovável" (Nunes, 2022).

A versatilidade do software PSIM, combinada com sua precisão e diversidade de módulos, faz com que ele seja um recurso indispensável tanto na indústria quanto no meio acadêmico.

3.3. Comparação entre PSIM e Outros Softwares de Simulação

O PSIM é uma ferramenta de simulação desenvolvida principalmente para análise de circuitos e sistemas de energia elétrica, com foco em eletrônica de potência, controle de máquinas e redes de energia. Ele se destaca pela rapidez de simulação e pela simplicidade de sua interface de modelagem, tornando-o uma opção bastante prática para engenheiros e pesquisadores.

Para entender melhor o papel do PSIM, é interessante compará-lo com outros dois softwares amplamente utilizados na área: o MATLAB/Simulink e o PSpice. Essas comparações podem ajudar a destacar os principais pontos fortes e fracos do PSIM em relação aos requisitos de diferentes tipos de projeto.

3.3.1. MATLAB/Simulink

O MATLAB/Simulink é uma das ferramentas mais conhecidas e amplamente utilizadas para simulação de sistemas dinâmicos. Desenvolvido pela MathWorks, o MATLAB/Simulink fornece uma plataforma poderosa que combina o ambiente de programação do MATLAB com a simulação gráfica de sistemas no Simulink, sendo amplamente empregado em várias áreas, incluindo sistemas de controle, processamento de sinais, eletrônica e engenharia de energia elétrica.

Tabela 01 – Comparação entre PSIM e MATLAB/Simulink

Comparação entre PSIM e MATLAB/Simulink

Característica	PSIM	MATLAB/Simulink
Interface	Simples e Intuitiva	Complexa, com uma curva de aprendizado maior
Tempo de Simulação	Mais rápido para simulações eletrônicas	Pode ser mais lento para simulações complexas
Precisão	Alta precisão em circuitos de potência	Alta precisão em sistemas complexos e multifuncionais
Integração	Suporte limitado a alguns softwares	Alta integração com outras ferramentas MathWorks
Custo	Mais acessível	Geralmente mais caro devido aos pacotes adicionais

Fonte: Autor (2025)

3.3.2. PSpice

O PSpice é uma versão da ferramenta SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), utilizada principalmente para simulação de circuitos eletrônicos. Desenvolvido para simulação em nível de componentes, o PSpice é especialmente útil para análise de circuitos de baixa frequência e simulação de componentes analógicos e digitais.

Tabela 02 – Comparação entre PSIM e PSpice

Comparação entre PSIM e PSpice

Características	PSIM	PSpice
Modelos de Componentes	Diversidade de modelos para eletrônica de potência	Focado em componentes eletrônicos de baixa frequência
Facilidade de Uso	Alta, com foco em eletrônica de potência	Média, com curva de aprendizado acentuada para novos usuários
Desempenho em Simulação	Rápido para circuitos de potência	Geralmente mais lento em circuitos de potência complexos
Precisão	Alta para eletrônica de potência	Alta para circuitos eletrônicos gerais
Ambiente de Simulação	Interativo e visual	Mais técnico e menos intuitivo

Fonte: Autor (2025)

3.3.3. Vantagens e Limitações do PSIM

O PSIM possui várias vantagens que o tornam atraente para simulação em projetos de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. Contudo, ele também apresenta algumas limitações que devem ser consideradas ao selecionar uma ferramenta de simulação.

- Vantagens do PSIM
 1. Rapidez de Simulação: O PSIM é otimizado para simulações rápidas, especialmente em circuitos de eletrônica de potência.
 2. Interface Intuitiva: A interface gráfica do PSIM é simples e intuitiva, facilitando o aprendizado e o uso para iniciantes e profissionais.

3. Especialização em Eletrônica de Potência: O PSIM é projetado para simulações de conversores, inversores, retificadores, entre outros sistemas de potência.
 4. Precisão em Circuitos de Potência: Oferece alta precisão em modelos específicos de eletrônica de potência, comparável a outras ferramentas de simulação de alta precisão.
- Limitações do PSIM
 1. Funcionalidade Limitada para Sistemas Complexos: O PSIM, apesar de robusto em eletrônica de potência, é limitado para simulação de sistemas complexos e interdisciplinares.
 2. Integração com Outras Ferramentas: O suporte do PSIM para integração com outros softwares é limitado quando comparado com o MATLAB/Simulink, que possui ampla compatibilidade.
 3. Curva de Aprendizado para Modelos Avançados: Embora a interface seja simples, alguns recursos avançados podem exigir conhecimento especializado.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta monografia foi desenvolvida com o intuito de avaliar a aplicabilidade e eficiência do software PSIM em projetos de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. Os procedimentos e métodos selecionados baseiam-se em uma análise prática, com simulações e estudo de caso que representa situação real de sistemas de energia. Além disso, foram estabelecidos critérios de avaliação específicos para validar os resultados das simulações.

4.1. Definição dos Procedimentos e Métodos

Nesta seção, são apresentados os principais procedimentos e métodos utilizados na aplicação do PSIM, tanto para simulações quanto para a análise dos resultados.

- Escolha do Software PSIM: A seleção do PSIM como ferramenta de simulação baseia-se em suas funcionalidades e capacidade de simulação de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. O PSIM permite a modelagem precisa de circuitos e sistemas de controle, fornecendo resultados detalhados que são essenciais para projetos desta natureza.
- Modelagem dos Componentes: Os componentes principais do sistema de energia e eletrônica de potência, como conversores, inversores, filtros e transformadores, foram modelados no PSIM para representar fielmente as características reais desses dispositivos. Cada componente foi parametrizado de acordo com os valores encontrados em situações reais ou em especificações de fabricantes.
- Procedimento de Simulação: Para o caso estudado, foi realizado um conjunto de simulações com diferentes cenários, alterando variáveis de entrada, carga e condições de operação. Os procedimentos seguiram uma sequência que inclui:
 - Definição dos parâmetros iniciais do sistema e dos componentes.
 - Configuração do ambiente de simulação no PSIM, incluindo a seleção de topologias de circuitos adequadas.
 - Realização das simulações, com controle dos intervalos de tempo e precisão dos resultados.

- Coleta e exportação dos dados gerados pelo PSIM para posterior análise.
- Métodos de Análise dos Resultados: Os resultados obtidos nas simulações foram analisados qualitativamente e quantitativamente.

4.2. Descrição dos Estudos de Caso

Foram selecionados estudos de caso para representar cenários práticos em sistemas de energia e eletrônica de potência. A seguir, descrevem-se os casos escolhidos e os objetivos específicos de cada simulação.

- Estudo de Caso 1: Conversor CC-CC tipo Boost:

Este estudo de caso aborda o desenvolvimento e a simulação de um conversor CC-CC do tipo Boost, projetado para otimizar a eficiência em sistemas de energia renovável, com foco em instalações fotovoltaicas. O conversor Boost foi modelado utilizando o software PSIM, que permitiu uma análise detalhada de seu comportamento em resposta a variações de carga e flutuações na geração de energia solar.

O objetivo principal deste estudo é avaliar a eficiência do conversor Boost e a estabilidade da tensão de saída em condições variáveis de entrada, típicas de sistemas fotovoltaicos sujeitos a oscilações na irradiância solar. A análise incluiu:

- I. Avaliação de eficiência energética: Verificar a capacidade do conversor de maximizar a transferência de energia do painel fotovoltaico para a carga.
- II. Estabilidade da tensão de saída: Garantir que o conversor mantenha uma saída estável, apesar das flutuações de tensão e corrente de entrada.

- Estudo de Caso 2: Conversor Buck para Aplicações em Veículos Elétricos

Neste estudo de caso, foi analisado um conversor CC-CC tipo Buck, onde a necessidade de reduzir a tensão de entrada para níveis mais baixos e estáveis é essencial. A simulação foi realizada utilizando o software PSIM, permitindo a análise da estabilidade do sistema e a resposta do conversor diante de variações na tensão de entrada e em diferentes condições de carga.

O objetivo é avaliar a capacidade do conversor Buck em manter a tensão de saída estável ao longo de uma ampla gama de condições de carga e de entrada,

garantindo assim a eficiência e a segurança dos componentes eletrônicos do veículo.

- Estudo de Caso 3: Conversor CC-CC Isolado – Full-Bridge

Este estudo de caso explora a aplicação de um conversor CC-CC isolado de topologia Full-Bridge, com foco na eficiência energética e na confiabilidade do sistema em aplicações de potência. Este tipo de conversor é amplamente utilizado em sistemas que requerem isolamento galvânico e alta precisão no controle de tensão de saída, como em redes de distribuição de energia e sistemas industriais de alta potência.

O objetivo é analisar o desempenho do conversor CC-CC Full-Bridge na regulação de tensão e corrente, avaliando a sua eficácia em situações que demandam robustez e controle de qualidade de energia. A meta é comprovar a eficiência do sistema na redução de ruídos, na compensação de flutuações de carga e na minimização de perdas, promovendo maior estabilidade e confiabilidade na rede.

- Estudo de Caso 4: Conversor CC-CA Trifásico

Este estudo analisa os resultados de simulação computacional de um inversor (conversor CC-CA) trifásico com a utilização da modulação PWM senoidal. Este tipo de modulação é amplamente empregada nos inversores, pois produz formas de onda da tensão de saída e corrente na carga com um conteúdo harmônico reduzido, elevando, desta forma, a qualidade de energia entregue pelo conversor.

Nesse caso, a Distorção Harmônica Total (THD) é utilizada como critério essencial no estudo das formas de onda produzidas na saída do conversor, permitindo uma análise detalhada na qualidade dos sinais de saída.

4.3. Critérios de Avaliação dos Resultados das Simulações

Para avaliar os resultados das simulações, foram definidos critérios baseados nos principais parâmetros de desempenho de sistemas de energia e eletrônica de potência.

- Eficiência Energética: O software PSIM permite calcular a eficiência do sistema simulando as perdas nos componentes. A eficiência foi avaliada com base na energia de entrada e saída, sendo os resultados comparados com padrões do setor.

- Estabilidade: A resposta do sistema às variações de carga e entrada foi analisada para verificar sua estabilidade e confiabilidade. Um sistema estável deve ser capaz de manter seu comportamento em condições normais e

5. ESTUDOS DE CASO COM PSIM

O PSIM é uma ferramenta poderosa amplamente utilizada para simulação de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. A seguir, são apresentados cinco estudos de caso aplicando o software PSIM para simulação de conversores CC-CC e sistemas de controle PWM. Cada estudo de caso é dividido em quatro etapas: descrição do circuito, definição dos parâmetros, modelagem do sistema e simulação dos resultados.

5.1. Estudo de Caso 1: Conversor CC-CC tipo Boost

O conversor Boost é um tipo de conversor CC-CC que eleva a tensão de entrada para uma tensão de saída maior. É utilizado em aplicações onde há necessidade de uma tensão maior que a disponível na fonte. O circuito básico consiste em um indutor, um diodo, um capacitor e um interruptor (geralmente um transistor MOSFET).

5.1.1. Descrição do Circuito do estudo de caso

Este estudo de caso apresenta o desenvolvimento e a análise de um conversor Boost projetado para operar em modo de condução contínua (CC). O conversor foi projetado para atender uma aplicação específica, na qual a tensão de saída é regulada em 100 V, mesmo com variações na tensão de entrada fornecida por um arranjo de painéis fotovoltaicos.

A tensão de entrada varia entre 42 V e 54 V, sendo nominalmente de 48 V. A frequência de comutação do conversor foi fixada em 40 kHz, proporcionando um equilíbrio entre o tamanho dos componentes passivos e a eficiência do sistema. A potência nominal de saída é de 1000 W, sendo esta uma exigência de carga projetada para a aplicação.

O projeto do indutor foi desenvolvido para limitar a ondulação da corrente a 10% do valor médio. Essa restrição foi adotada para minimizar perdas e garantir um funcionamento eficiente do conversor, mesmo em diferentes condições de operação. Adicionalmente, o filtro de saída foi projetado para assegurar que a ondulação da tensão de saída não exceda 1 V, atendendo aos requisitos de estabilidade e qualidade da tensão fornecida à carga.

O rendimento teórico esperado do conversor foi estimado em 96%, considerando as perdas associadas aos semicondutores e aos componentes passivos. A razão cíclica de operação do conversor é ajustada de forma dinâmica para manter a tensão de saída média em 100 V, compensando as flutuações na tensão de entrada e as variações na carga.

Este conversor é uma solução adequada para sistemas fotovoltaicos, onde a tensão de entrada pode variar devido a mudanças na irradiância solar. O projeto garante que a energia gerada pelos painéis seja eficientemente convertida para alimentar cargas ou ser integrada a sistemas de armazenamento.

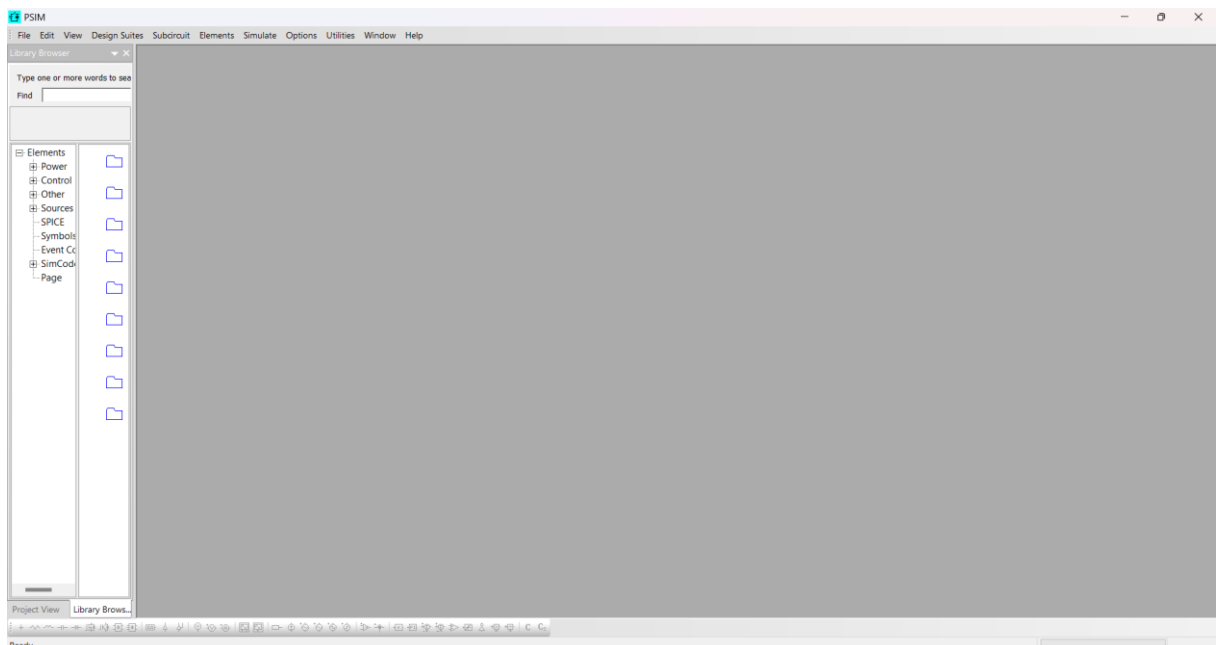
O estudo destaca a importância de um design cuidadoso dos componentes passivos e de estratégias de controle apropriadas para maximizar o desempenho de conversores Boost. Os resultados teóricos obtidos indicam que o conversor projetado atende os requisitos de aplicação, oferecendo uma operação estável, eficiente e confiável.

5.1.2 Montagem do circuito

a) Configuração Inicial

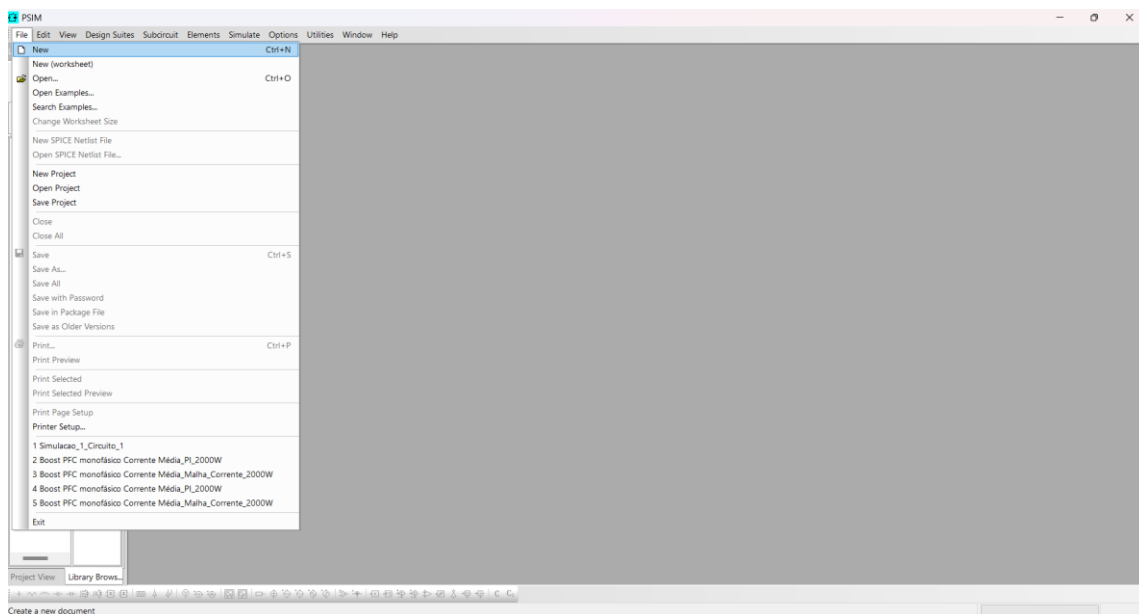
- Abrir o software PSIM: Inicie o PSIM e crie um novo projeto, selecionando uma área de trabalho em branco.
- Definir o ambiente de simulação: Configure os parâmetros básicos de simulação (tempo total de simulação, passo de cálculo, etc.) acessando o menu *SimulationControl*. A figura 09 mostra a página inicial do PSIM.

Figura 09 – Página inicial do PSim.



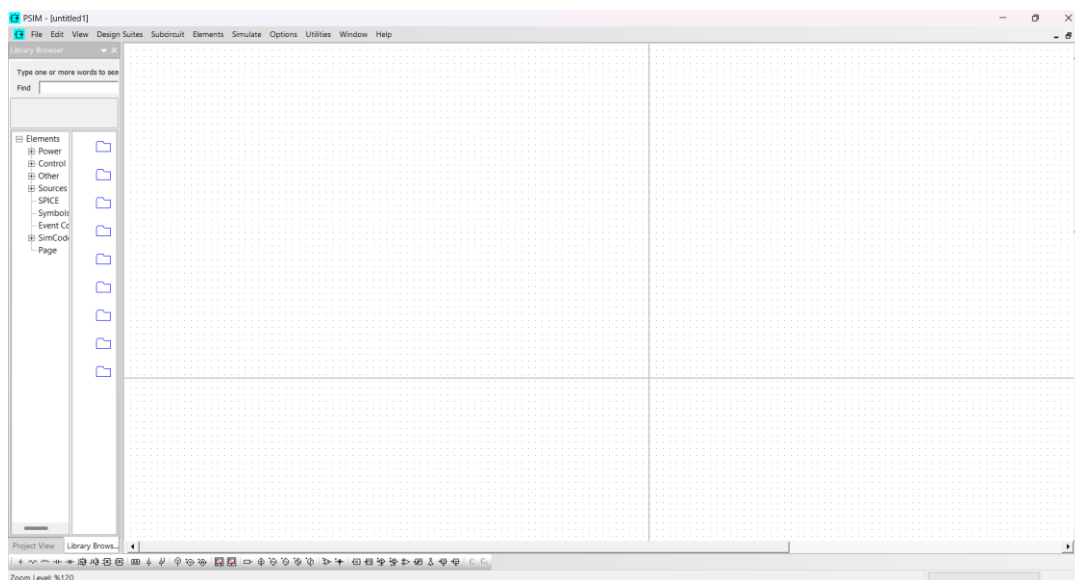
A passo que as figura 10 exhibe que ao clicar em “File” é exibido opções, e entre elas aparece a “New” que corresponde a criação de um novo projeto. Enquanto isso, a figura 11 exhibe a página em branco do novo projeto criado no PSIM.

Figura 10 – Diretório para criação de um novo projeto no PSim



Fonte: Autor (2025)

Figura 11 – Página inicial de um novo projeto no PSim



Fonte: Autor (2025)

b) Inserção dos Componentes

- Fonte de tensão DC: Adicione uma fonte de tensão DC para representar a entrada do conversor. No menu lateral, selecione "*Sources*" > "*DC Source*" e defina a tensão nominal (48 V) e a faixa de variação (42 V a 54 V, se necessário).
- Indutor: Insira um indutor do menu "*Elements*" > "*L*". Configure o valor de indutância baseado no cálculo do seu projeto, garantindo a operação em modo de condução contínua (CC).
- Diodo: Adicione um diodo a partir de "*Elements*" > "*Diode*". Selecione um modelo com características apropriadas para a corrente e tensão de operação.
- Capacitor: Insira um capacitor do menu "*Elements*" > "*C*". Ajuste a capacitância para atender à ondulação de tensão especificada (≤ 1 V).
- Interruptor controlado (MOSFET): Adicione um MOSFET do menu "*Elements*" > "*MOSFET*". Certifique-se de configurar os parâmetros como tensão de bloqueio e corrente máxima.
- Resistor de carga: Insira um resistor para representar a carga a partir de "*Elements*" > "*R*". Configure o valor de resistência para simular a potência de saída de 1000 W (com tensão de saída de 100 V).

c) Inserção do Módulo Solar

- Adicionar modelo do painel fotovoltaico:
 1. No menu lateral, vá até "*Elements*" > "*Renewable Energy*" > "*Solar Panel*".
 2. Insira o componente na área de trabalho.
 3. Configure os parâmetros do painel fotovoltaico, como corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), ponto de potência máxima (V_{mp} e I_{mp}), irradiância padrão (1000 W/m²) e temperatura (25 °C).
- Configurar irradiância e temperatura variáveis (opcional):
Insira controladores para variar irradiância e temperatura, simulando

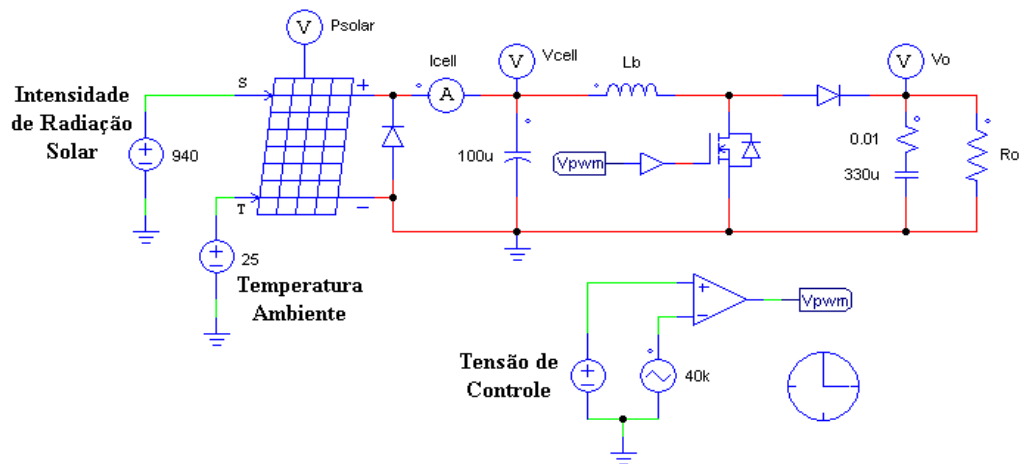
condições reais de operação. Para isso, use fontes de sinal no *menu "Control"* > *"SignalSources"* para representar mudanças na irradiância solar.

d) Conexão dos Componentes

1. Fonte PV ao Indutor:
 - Conecte o terminal positivo do módulo solar ao indutor.
 - Ligue o terminal negativo do módulo à terra.
2. Indutor ao Nó MOSFET/Diodo:
 - Conecte a outra extremidade do indutor ao nó entre o MOSFET (dreno) e o diodo (ânodo).
3. Diodo ao Capacitor e à Carga:
 - Ligue o cátodo do diodo ao nó positivo do capacitor e ao resistor de carga.
 - Conecte o terminal negativo do capacitor e da carga à terra.
4. MOSFET à Terra:
 - Conecte a fonte do MOSFET à terra.
5. Circuito de Controle:
 - Insira um bloco PWM para controlar o MOSFET:
 - Configure a frequência de 40 kHz.
 - Conecte a saída do PWM ao gate do MOSFET.
 - Adicione sensores de tensão e corrente para alimentar o controle de realimentação:
 - Conecte um sensor de tensão no nó da carga.
 - Ligue um sensor de corrente no indutor.
 - Use um bloco de Comparação para comparar a tensão de saída com o valor de referência (100 V) e ajustar a razão cíclica do PWM.

A figura 12 exibe o circuito do projeto montado.

Figura 12 – Circuito do projeto



Fonte: Autor (2025)

e) Configuração dos Parâmetros de Simulação

1. Ajuste da simulação:

- Configure o tempo de simulação para observar o comportamento dinâmico do sistema (ex.: 50 ms).
- Certifique-se de que o passo de cálculo é adequado (ex.: 1 μ s) para captar detalhes das formas de onda.

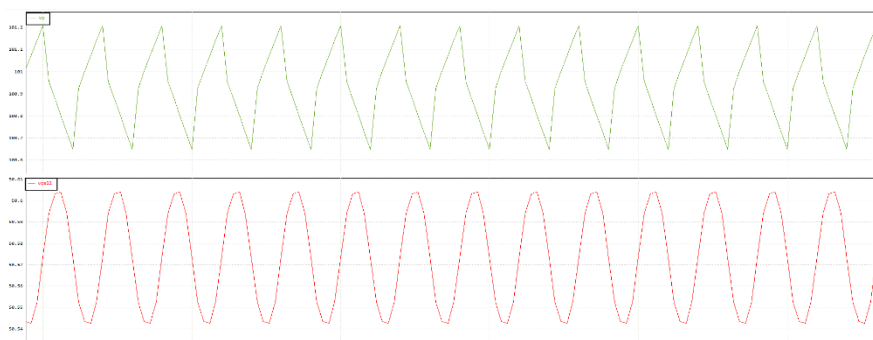
2. Configuração do controlador MPPT (opcional):

- Adicione um controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking) para otimizar a extração de energia do módulo solar.

5.1.3 Resultados da simulação

Então o circuito foi simulado e foram obtidas as seguintes formas de ondas nos elementos medidores. Exibe-se na figura 13 a tensão V_o e a tensão V_{cel} :

Figura 13 – Formas de Tensão de Saída (V_o) e de Entrada (V_{cel})



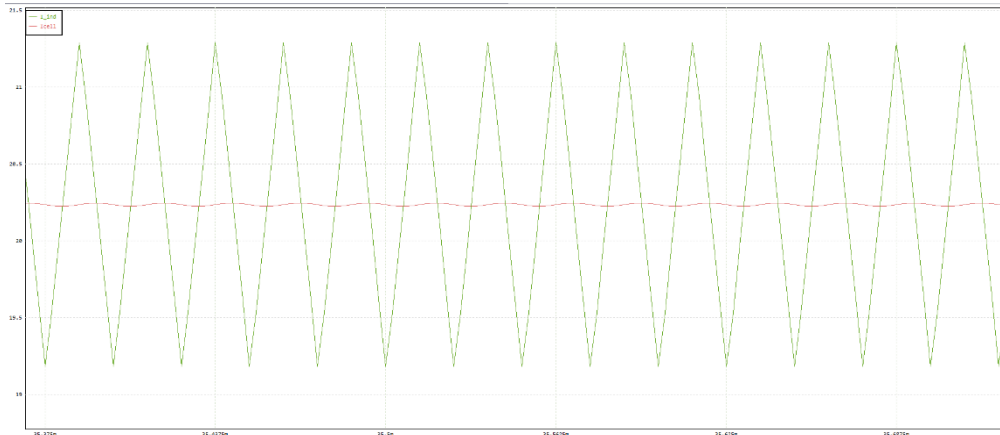
Fonte: Autor (2025)

Então é possível calcular a ondulação no capacitor, onde:

$$\% = \frac{V_{ond(p-p)}}{V_{medio}} = \frac{0.557}{100.93} = 0,55 \%$$

A figura 14 mostra a corrente I_{ind} e no painel I_{cel} .

Figura 14 - Formas de onda das correntes no indutor (I_{ind}) e no painel (I_{cel})



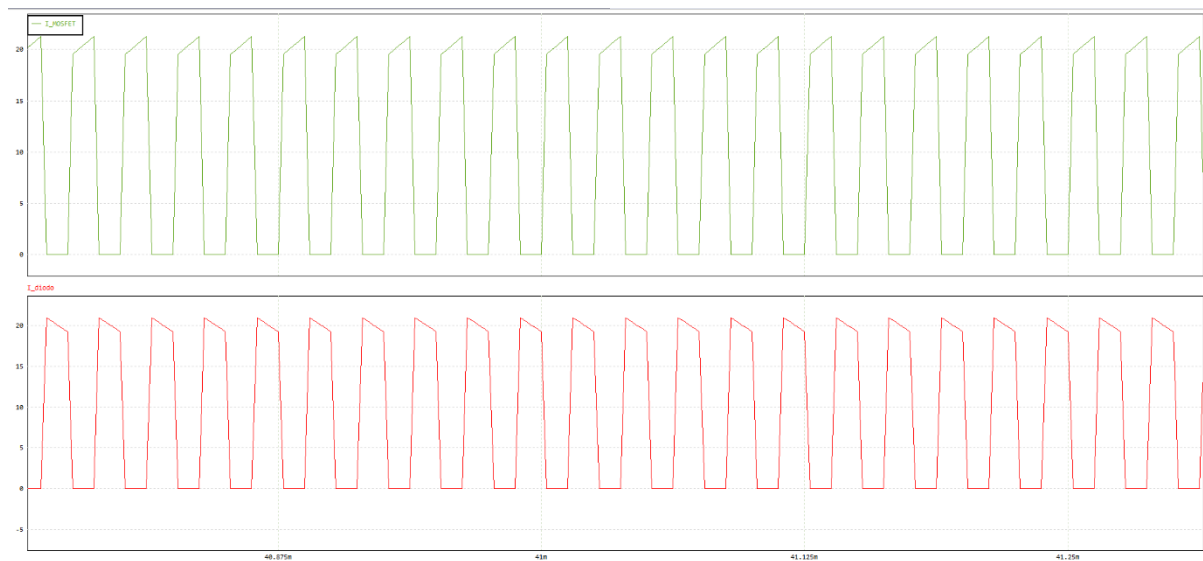
Fonte: Autor (2025)

Sendo assim, a ondulação no de corrente no indutor é dada por:

$$\% = \frac{I_{ond(p-p)}}{I_{l(med)}} = \frac{2.09}{20.23} = 10,33 \%$$

A figura 16 mostra o formado das correntes na chave e no diodo.

Figura 15 – Formas de onda das correntes na chave (I_{MOSFET}) e no diodo (I_{diodo})



Fonte: Autor (2025)

A figura 16 exibe a corrente I_{Ro} e a tensão V_o , que servirão para o cálculo de potências e rendimento. E a figura 17 mostra o transitório de partida do conversor.

Figura 16 – Formas de onda para os cálculos da potência de saída, entrada e rendimento



Fonte: Autor (2025)

Calculando os dados citados na figura:

$$P_{in} = V_{in}I_{in}$$

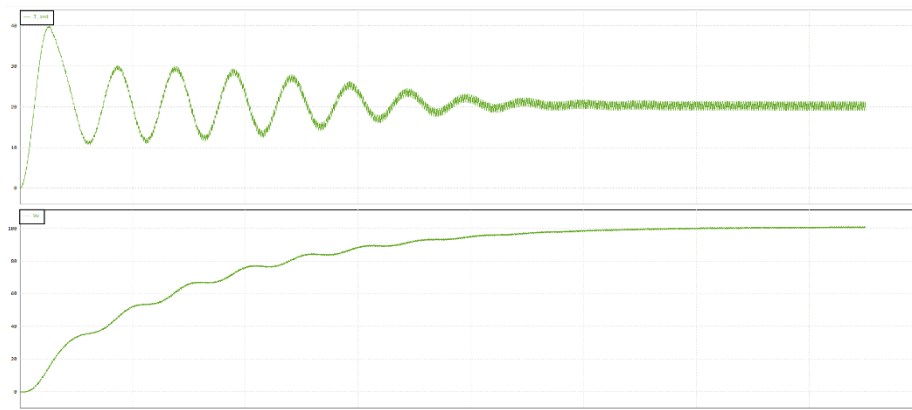
$$P_{in} = (50.57)(20.23) \Rightarrow P_{in} = 1023.03 \text{ W}$$

$$P_{out} = V_{out}I_{out}$$

$$P_{out} = (100.93)(10.09) \Rightarrow P_{out} = 1018.38 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1018.38}{1023.03} = 0,99$$

Figura 17 – Transitório de partida do conversor



Fonte: Autor (2025)

5.2 Estudo de Caso 2: Conversor CC-CC tipo Buck

O conversor Buck reduz a tensão de entrada para uma tensão de saída inferior. Ele é composto por um interruptor, um diodo, um indutor e um capacitor de filtro na saída. Este tipo de conversor é amplamente utilizado em fontes de alimentação.

5.2.1 Descrição do Circuito

Este estudo de caso aborda o dimensionamento e a simulação de um conversor Buck operando no modo de condução contínua (MCC). O objetivo principal é analisar o comportamento do conversor sob condições específicas de operação, considerando parâmetros de dimensionamento para os componentes passivos, desempenho em malha aberta e resposta dinâmica em malha fechada.

O conversor Buck em análise é projetado para fornecer uma tensão de saída de $V_o=24\text{ V}$ a partir de uma tensão de entrada de $V_{in}=48\text{ V}$, com uma frequência de chaveamento de $f_s=40\text{ kHz}$. A potência nominal de saída é de $P_o=500\text{ WP}$. O projeto do conversor considera uma eficiência de 98% ($\eta=98\%$) garantindo elevada performance energética. Os parâmetros desse projeto são:

1. Corrente no Indutor (I_L): A ondulação máxima permitida na corrente do indutor é de 10% do valor médio, o que exige um dimensionamento preciso do indutor (L) para garantir a operação em MCC.
2. Tensão de Saída (V_o): A ondulação de tensão de saída é limitada a $\Delta V_o=0,5\text{ V}$, definindo o dimensionamento do capacitor (C) para assegurar uma saída estável.
3. Malha Aberta: O controle em malha aberta mantém a tensão de saída regulada em $V_o=24\text{ V}$, com o sinal de controle ajustado manualmente para a estabilização do sistema.
4. Malha Fechada: Na simulação com malha fechada, um compensador PID é implementado para gerar o sinal de controle, assegurando a regulação precisa da tensão de saída e a resposta adequada a perturbações.

Serão realizadas simulações para avaliar o comportamento do conversor em ambas as condições de controle: malha aberta e malha fechada. O modelo em

malha aberta demonstrou a capacidade de manter a tensão de saída em $V_o=24V$, mas com limitações na resposta a variações de carga e entrada. A implementação do compensador PID em malha fechada otimiza o desempenho dinâmico, reduzindo a oscilação e o tempo de resposta do sistema.

5.2.2 Montagem do circuito

a) Início do Projeto

- Abrir o PSIM:
 - Clique no ícone do PSIM para abrir o software.
 - No menu superior, vá para *File > New Circuit* para criar um novo projeto.
- Configuração do Ambiente:
 - Acesse *Simulate > SimulationControl* no menu superior.
 - Configure os seguintes parâmetros:
 - Tempo total de simulação: $T_{sim}=50$ ms
 - Intervalo de passo de simulação (ΔT): 1 μ s
 - Clique em *OK* para salvar as configurações.

b) Inserção de Componentes

Na barra lateral esquerda, localize a *Library Toolbox*, que contém os componentes do PSIM. Use os grupos e siga os passos abaixo:

b.1) Fonte de Tensão DC

1. Na *Library Toolbox*, vá até *Power > Sources*.
2. Arraste o ícone de uma *DC Voltage Source* para a área de trabalho.
3. Clique duas vezes na fonte para abrir o menu de configuração.
 - Defina a tensão de entrada: $V_{in}=48$ V $V_{in} = 48$ V.
 - Clique em *OK*.

b.2) Interruptor Controlado (MOSFET)

1. Na *Library Toolbox*, vá até *Power > Switches*.
2. Escolha o *MOSFET* e arraste-o para o circuito.
3. Adicione um *Gate Driver*:
 - Vá até *Control > PWM*.

- Insira um *PWM Controller* e conecte sua saída (Gate) ao terminal de controle do MOSFET.

b.3) Diodo de Rápida Recuperação

1. Vá para *Power > Switches*.
2. Arraste um *Diode* para o circuito.
3. Conecte o diodo em paralelo com o indutor (a polaridade do diodo deve permitir a circulação da corrente de retorno).

b.4) Indutor e Capacitor

1. Indutor:

- Acesse *Power > Passive Elements>Inductor*.
- Arraste um indutor (L) para o circuito.
- Clique duas vezes no indutor para configurar o valor, que pode ser calculado usando a fórmula:

$$L = \frac{(V_{in} - V_o) \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s}$$

- Insira o valor calculado e clique em *OK*.

2. Capacitor:

- Vá para *Power > Passive Elements> Capacitor*.
- Insira um capacitor (C) no circuito.
- Configure o valor para limitar a ondulação da tensão de saída ($\Delta V_o=0,5V$), usando:

$$C = \frac{I_o}{\Delta V_o \cdot f_s}$$

- *Clique em OK*.

b.5) Carga Resistiva

- Vá para *Power > Passive Elements> Resistor*.
- Insira um resistor (RRR) na saída para representar a carga.
- Configure o valor com base na potência de saída ($P_o=500WP$) e na tensão:

$$R = \frac{V_o^2}{P_o}$$

c) Conexões do Circuito

1. Use a ferramenta de cabeamento:

- Clique no ícone de *Wire Tool* na barra superior ou pressione *W*.
- Conecte os componentes de acordo com o circuito típico do conversor Buck:
 - *Fonte DC* → *MOSFET* → *Indutor* → *Capacitor* → *Resistor (carga)*.
 - Conecte o diodo em paralelo com o indutor.

2. Verifique todas as conexões:

- Certifique-se de que não há fios soltos ou conexões incorretas.
- Para ajustar as posições, use a ferramenta *Select Tool*.

d) Configuração do PWM

1. Clique duas vezes no *PWM Controller*.

2. Configure os seguintes parâmetros:

- Frequência de chaveamento: $f_s=40$ kHz.
- Razão cíclica inicial (D): 50%.

3. Clique em *OK*.

e) Simulação em Malha Aberta

1. Adicione blocos de medição:

- Vá para *Elements>MeasurementProbes*.
- Insira sondas para:
 - Medir a tensão de saída (V_o).
 - Medir a corrente no indutor (I_L).

2. Execute a simulação:

- Clique em *Simulate>RunSimulation* ou pressione *F5*.

3. Analise os resultados:

- Vá para *Simulate>Waveform Display* para visualizar as formas de onda da tensão e corrente.

f) Simulação em Malha Fechada (Controle PID)

1. Inserir o Controlador PID:

- Vá para *Control>Compensator>PID* e insira o componente.
- Conecte a saída da sonda de tensão ao controlador PID.

2. Configuração do PID:

- Clique duas vezes no PID e configure os valores de K_p , K_i , e K_d para otimizar a resposta do sistema.
- Conecte a saída do PID ao gerador PWM.

3. Realimentação:

- Garanta que o sinal de tensão de saída realimentado seja comparado ao valor de referência ($V_{ref}=24V$).

4. Executar a Simulação:

- Repita o procedimento de simulação e observe os resultados no escopo.

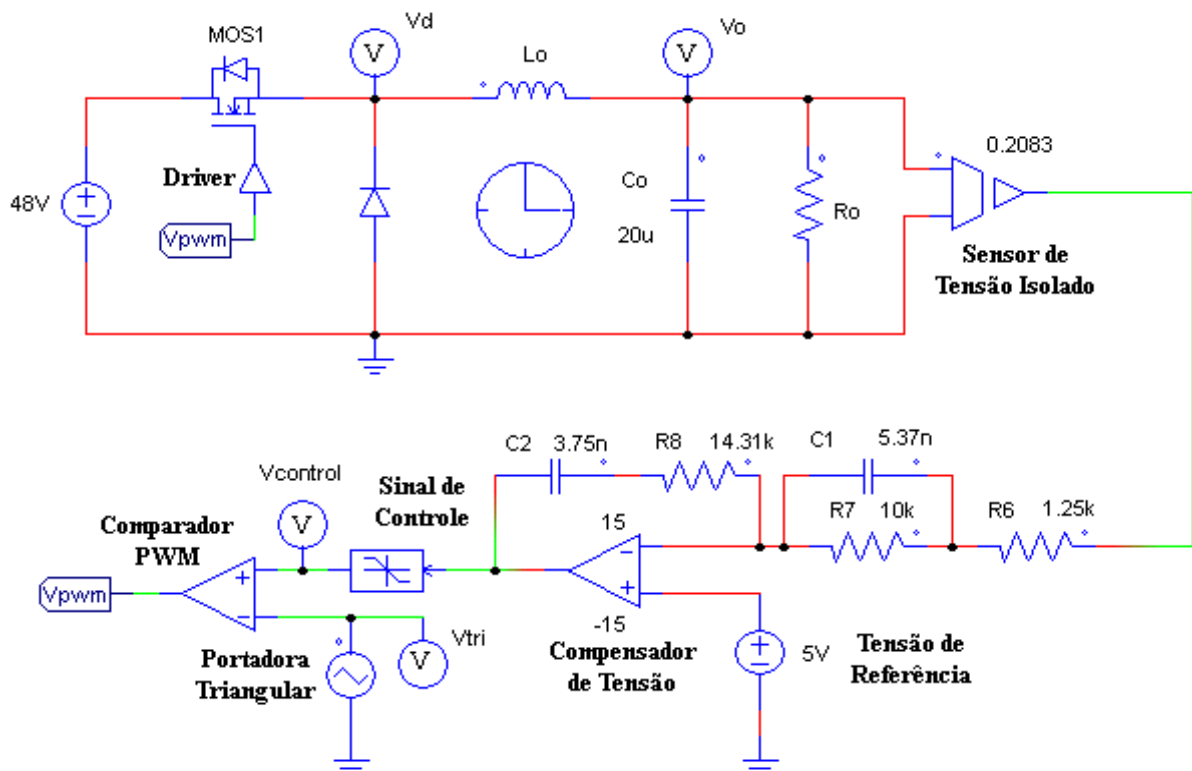
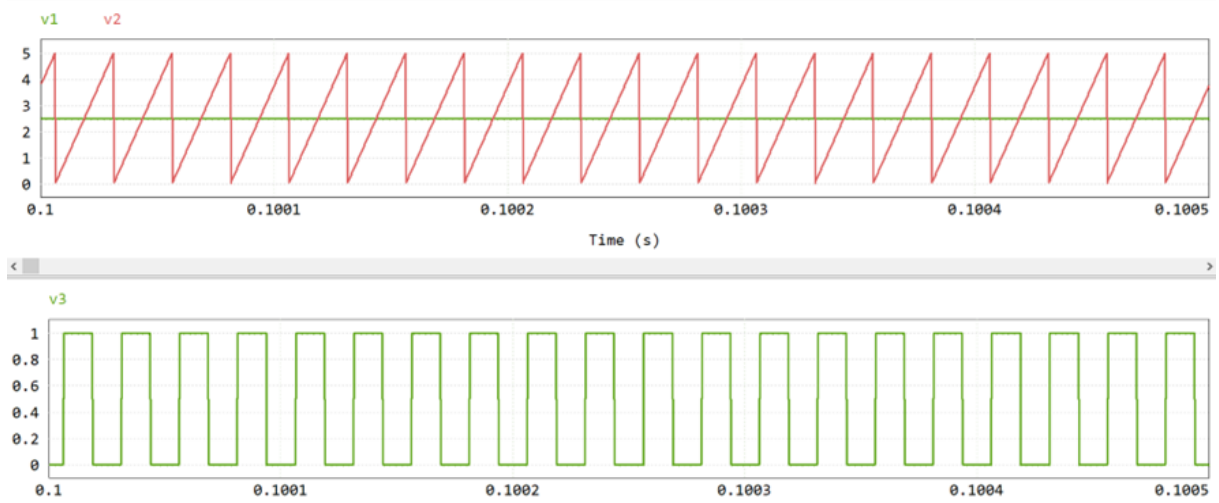


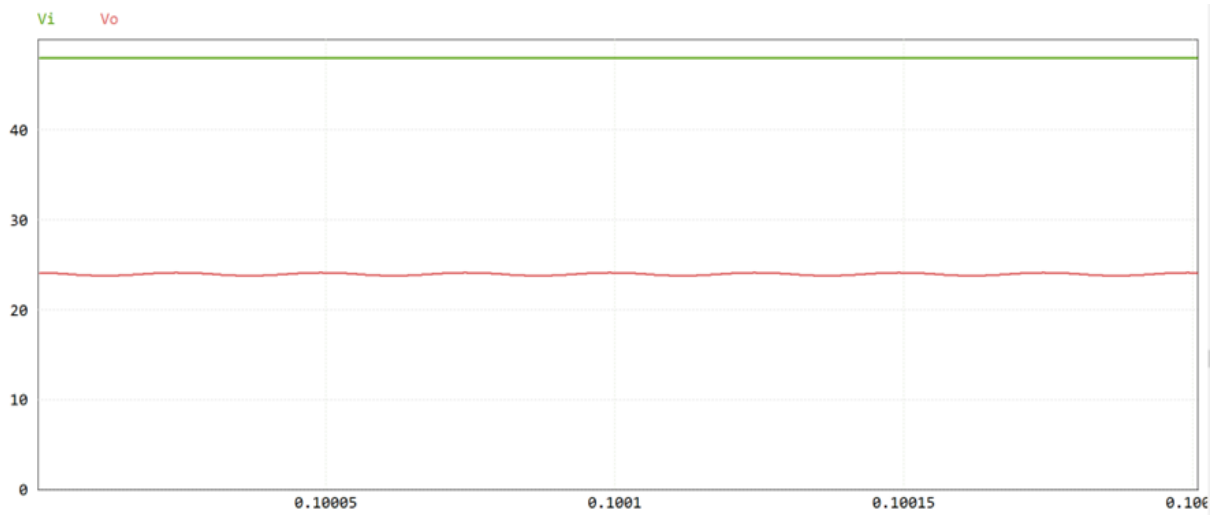
Figura 18 - Circuito de comando e potência do conversor (Buck) utilizando um compensador PID

5.2.3 Resultados da simulação em malha aberta:

Figura 19 – Formas de sinal para a chave

Fonte: Autor (2025)

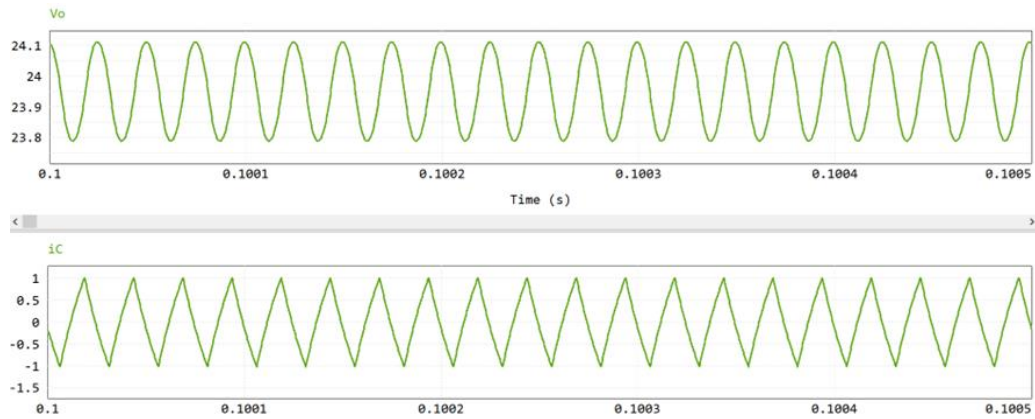
O gráfico da tensão na entrada e da tensão de saída é apresentado abaixo:

Figura 20 – Tensão de saída e de entrada

Fonte: Autor (2025)

O gráfico abaixo apresenta a tensão na saída e a corrente no capacitor:

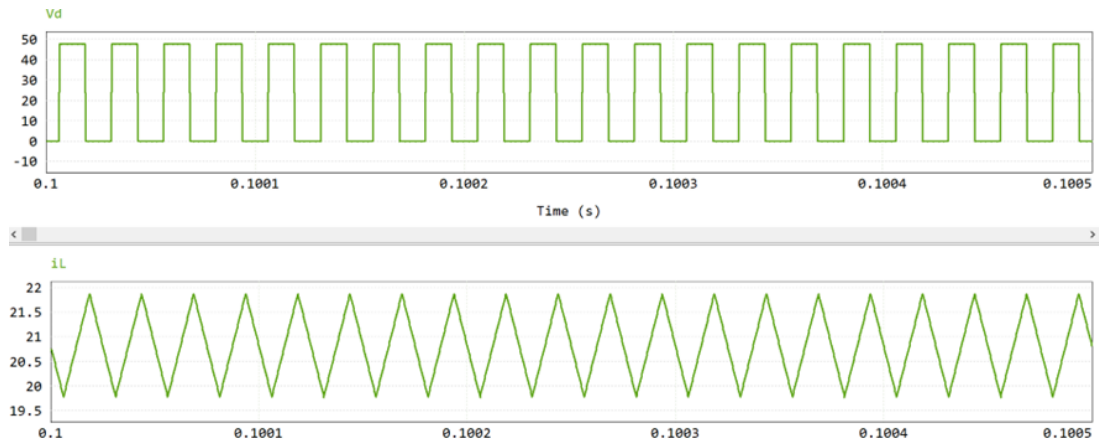
Figura 21 – Tensão e Corrente de saída



Fonte: Autor (2025)

O gráfico abaixo apresenta a tensão no indutor e a corrente no indutor:

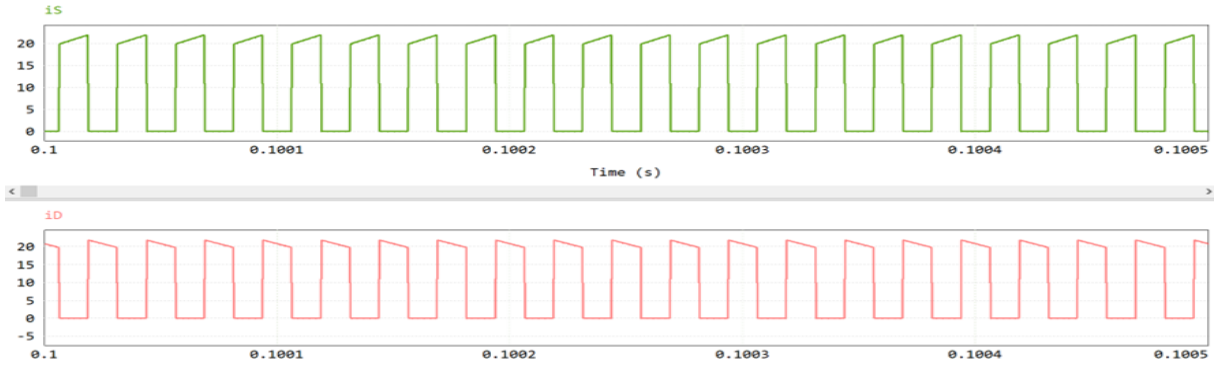
Figura 22 – Tensão e Corrente no indutor



Fonte: Autor (2025)

Por fim, é apresentada a relação entre corrente na chave e corrente no diodo:

Figura 23– Corrente na chave e no indutor

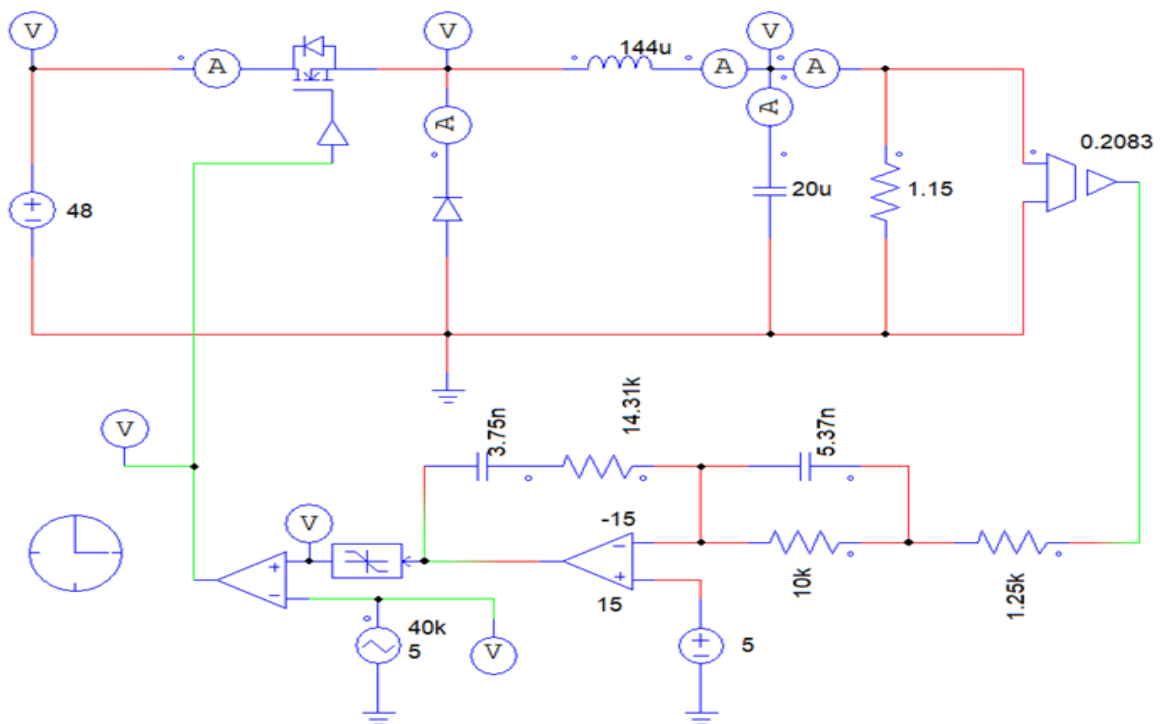


Fonte: Autor (2025)

5.2.4 Resultados da simulação em malha fechada:

Para a simulação de malha fechada foi implementado o seguinte circuito de controle:

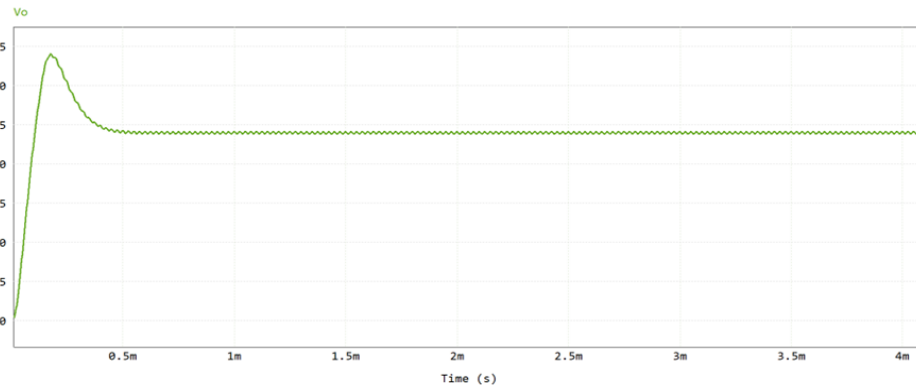
Figura 24 – Circuito montado em malha fechada no PSIM



Fonte: Autor (2025)

A curva mostrando o regime transitório e permanente da tensão é mostrada abaixo:

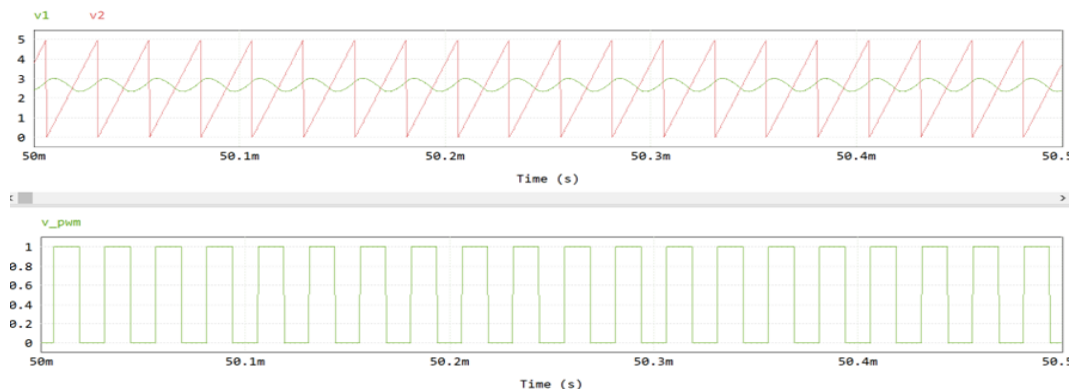
Figura 25 – Transitório de partida do conversor Buck



Fonte: Autor (2025)

O gráfico que representa a geração do sinal PWM é apresentado a seguir:

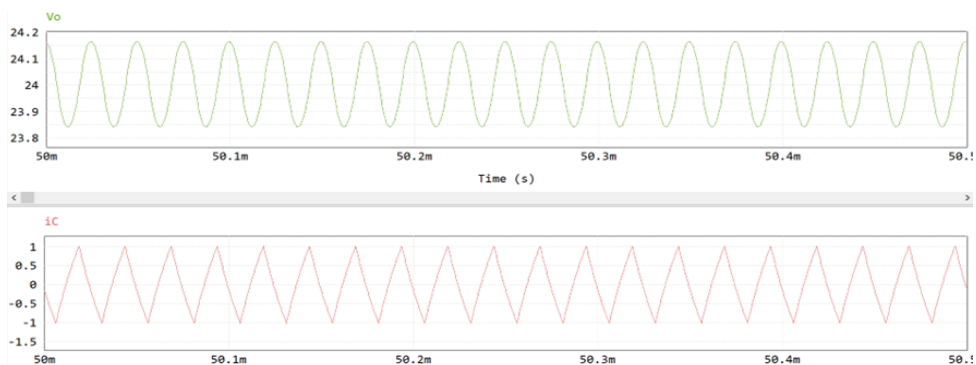
Figura 26 – Sinal PWM



Fonte: Autor (2025)

O gráfico abaixo apresenta a tensão de saída e a corrente no capacitor:

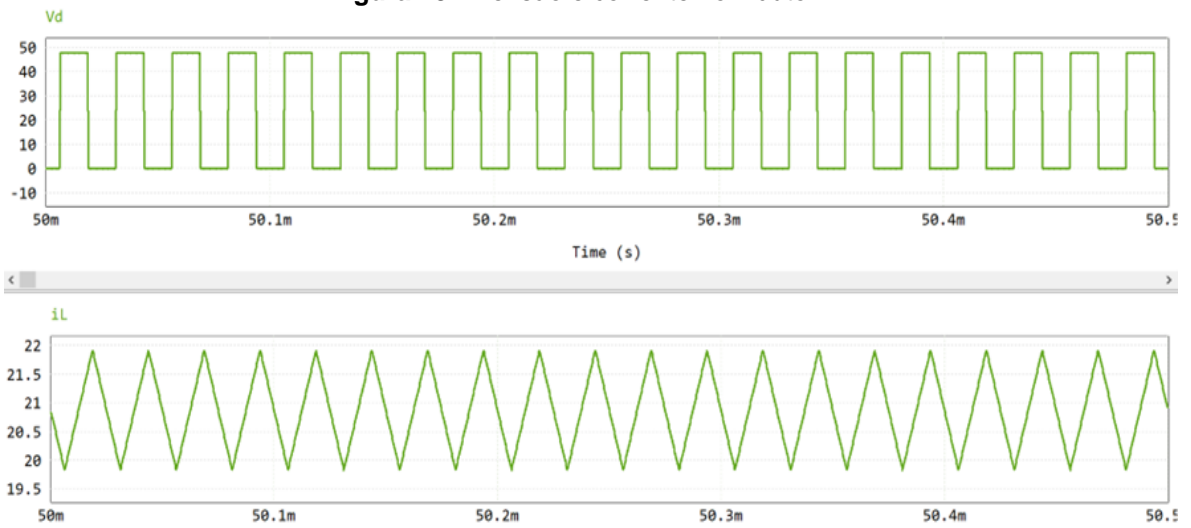
Figura 27 – Formas de onda de tensão na saída correspondente ao capacitor



Fonte: Autor (2024)

O gráfico abaixo apresenta a tensão no indutor e a corrente no indutor:

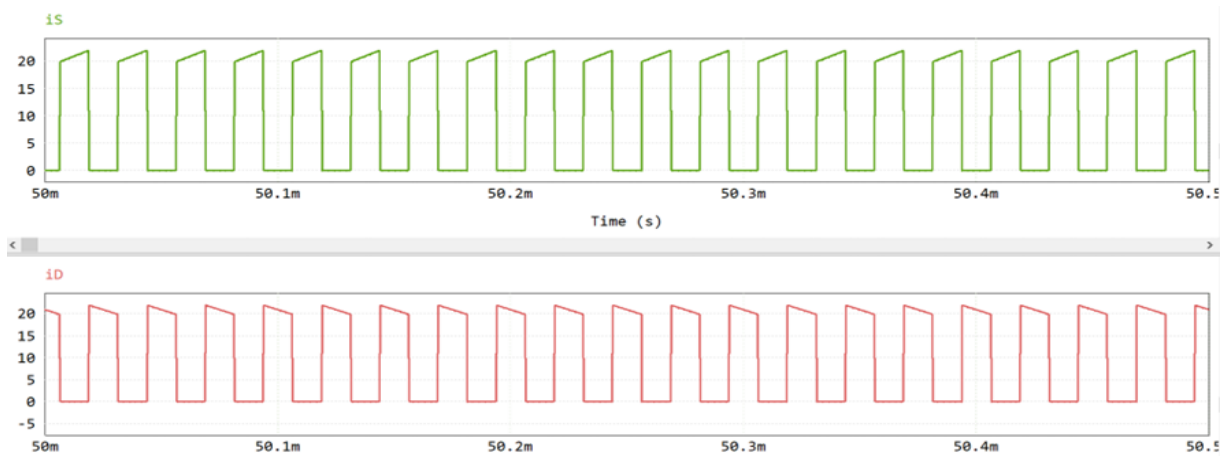
Figura 28 – Tensão e corrente no indutor



Fonte: Autor (2025)

Por fim, é apresentada a relação entre corrente na chave e corrente no diodo:

Figura 29 – Formas de onda da chave e do indutor



Fonte: Autor (2025)

5.3 Modelagem dos conversores

5.3.1 Modelagem do conversor Boost

A modelagem é realizada de acordo com as equações de funcionamento do conversor Boost:

a) Razão cíclica

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{48}{100} = 0,52$$

b) Corrente nominal de saída e Resistência nominal de carga

$$I_o = \frac{P_o}{V_o}$$

$$I_o = \frac{1000}{100} = 10 \text{ A}$$

c) Cálculo do resistor de carga

$$R_o = \frac{V_o}{I_o}$$

$$R_o = \frac{100}{10} = 10 \Omega$$

d) Determinação da indutância

$$P_i = \frac{P_o}{\eta}$$

$$P_{in} = \frac{1000}{0,96} = 1041,6 \text{ W}$$

$$I_{in} = \frac{P_i}{V_i}$$

$$I_{in} = \frac{1041,6}{48} = 21,7 \text{ A}$$

$$\Delta_{iL} = 0,1 * I_{in}$$

$$\Delta_{iL} = 0,1 * 21,7 = 2,17 \text{ A}$$

$$L_b = \frac{V_o}{4 * \Delta_{iL} * F_s}$$

$$L_b = \frac{100}{4 * 2,17 * 4 \times 10^4} = 288 \mu\text{H}$$

e) Determinação da capacitância

$$C_o = \frac{I_o * D}{\Delta V_o * F_s}$$

$$C_o = \frac{10 * 0,52}{1 * 40 * 10^3} = 130 \mu\text{F}$$

$$I_{max} = I_i + \frac{\Delta_{iL}}{2}$$

$$I_{max} = 21,7 + \frac{2,17}{2} = 22,785 \text{ A}$$

$$R_{semax} = \frac{\Delta V_o}{I_{max}}$$

$$R_{semax} = \frac{1}{22,785} = 0,0438 \Omega$$

$$R_e = 0,01 \Omega$$

f) Determinação da resistência de carga crítica

$$I_{i\text{crit}} = \frac{\Delta_{iL}}{2}$$

$$I_{i\text{crit}} = \frac{2,17}{2} = 1,085 \text{ A}$$

$$I_{o\text{crit}} = I_{i\text{crit}} * (1 - D) * \eta$$

$$I_{o\text{crit}} = 1,085 * (1 - 0,52) * 0,96 = 0,499 \text{ A}$$

$$R_{o\text{crit}} = \frac{V_o}{I_{o\text{crit}}}$$

$$R_{o\text{crit}} = \frac{100}{0,499} = 200,4 \Omega$$

$$P_{o\text{min}} = V_o * I_{o\text{crit}}$$

$$P_{o\text{min}} = 100 * 0,499 = 49,9 \text{ W}$$

$$\frac{P_{o\text{min}}}{P_o} = \frac{49,9}{1000} * 100 = 4,99\%$$

g) Ondulação da corrente do indutor

$$\Delta_{iL} = 2,17 \text{ A}$$

h) Ondulação da tensão do capacitor

$$\Delta\% = \frac{V_{ond(p-p)}}{V_{medio}} = \frac{1}{100} = 1\%$$

i) Valor médio da corrente no indutor

$$I_{L\text{med}} = I_i = 21,7 \text{ A}$$

j) Valor eficaz da corrente no indutor

$$I_{caef} = \frac{\Delta_{iL}}{2 * \sqrt{3}} = \frac{2,17}{2 * \sqrt{3}} = 0,626 \text{ A}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{I_i^2 + (I_{caef})^2}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{21,7^2 + 0,626^2} = 21,709 \text{ A}$$

k) Valor eficaz da corrente no capacitor

$$I_{C_{ef}} = \sqrt{I_{D_{ef}}^2 - I_o^2}$$

$$I_{C_{ef}} = \sqrt{15,04^2 - 10^2} = 11,233 \text{ A}$$

l) Valor médio da corrente na chave

$$I_{chave_{med}} = D * I_{L_{med}}$$

$$I_{chave_{med}} = 0,52 * 21,7 = 11,284$$

m) Valor eficaz da corrente na chave

$$I_{chave_{ef}} = \sqrt{D} * I_{L_{ef}}$$

$$I_{chave_{ef}} = \sqrt{0,52} * 21,709 = 15,654 \text{ A}$$

n) Valor médio da corrente no diodo

$$I_{D_{med}} = (1 - D) * I_i$$

$$I_{D_{med}} = (1 - 0,52) * 21,7 = 10,416 \text{ A}$$

o) Valor eficaz da corrente no diodo

$$I_{D_{ef}} = \sqrt{1 - D} * I_{L_{ef}}$$

$$I_{D_{ef}} = \sqrt{1 - 0,52} * 21,709 = 15,04 \text{ A}$$

p) Valor médio da corrente de entradas

$$I_i = 21,7 \text{ A}$$

q) Rendimento do conversor

$$\eta = 0,96$$

5.3.2 Modelagem do conversor Buck

a) Razão cíclica

$$D = \frac{V_o}{V_i} = \frac{48V}{24V} = 0,5$$

b) Corrente nominal de saída e Resistência nominal de carga

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{500W}{24V} = 20,83A$$

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} = \frac{24V}{20,83A} = 1,15\Omega$$

c) Cálculo da Indutância

$$\Delta i_L = 0,1 \cdot 20,83A = 2,083A$$

$$L = \frac{V_o(1-D)}{\Delta i_L \cdot f_s} = \frac{24V \cdot 0,5}{2,083A \cdot (40 \cdot 10^3)Hz} = 144\mu H$$

d) Cálculo da Capacitância

$$R_{se} = \frac{\Delta V_o}{\Delta i_L} = 0,24\Omega$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o(1-D)}{8 \cdot L \cdot C_o \cdot F_s^2} = \frac{24 \cdot 0,5}{8 \cdot 144 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot (40 \cdot 10^3)^2} = 0,325V$$

e) Valores Médios e Eficazes

$$I_{Lmed} = I_o = 20,83A$$

$$I_{cef} = \frac{\Delta i_L}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,601A$$

$$I_{Lef} = \sqrt{I_{cef}^2 + I_o^2} = 20,83A$$

$$I_{Smed} = D \cdot I_o = 0,5 \cdot 20,83 = 10,41A$$

$$I_{Sef} = \sqrt{D} \cdot I_{Lef} = 14,73A$$

$$I_{Dmed} = (1-D) \cdot I_o = 0,5 \cdot 20,83 = 10,41A$$

$$I_{Def} = \sqrt{(1-D)} \cdot I_{Lef} = 14,73A$$

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = 510,2W$$

$$I_i = \frac{P_i}{V_i} = \frac{510,2}{48} = 10,62A$$

f) Corrente de carga mínima para a condução contínua

$$I_{ocrit} = \frac{\Delta i_L}{2} = 1,041 A$$

6. RESULTADOS

Nesta secção, são analisados e discutidos os resultados obtidos na aplicação do software PSIM em diferentes projetos de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. Esta análise engloba comparações entre estudos de caso.

- Estudo de Caso 1: Conversor CC-CC tipo Boost.

Tabela 03 – Comparação dos resultados do conversor BOOST

Parâmetro	Valor Calculado	Valor Simulado
Razão Cíclica	0,52	0,52
Ondulação da Corrente no Indutor	10%	10,33%
Ondulação da Tensão no Capacitor	1%	0,55%
Valor Médio da Corrente Na Carga	10 A	10,09 A
Valor Médio da Corrente no Indutor	21,7 A	20,23 A
Valor Eficaz da Corrente no Indutor	21,709 A	23,24 A
Valor Eficaz da Corrente o Capacitor	11,233 A	9,02 A
Valor Médio da Corrente na Chave	11,284 A	10,36 A
Valor Eficaz da Corrente na Chave	15,654 A	14,437 A
Valor Médio da Corrente no Diodo	10,416 A	10,029 A
Valor Eficaz da Corrente no Diodo	15,04 A	14,19 A
Valor Médio da Corrente de Entrada	21,7 A	20,23 A

Rendimento do Conversor	0,96	0,99
-------------------------	------	------

Fonte: Autor (2024)

- Estudo de Caso 2: Conversor CC-CC tipo Buck.

Tabela 04 – Comparação dos resultados do conversor BUCK

Parâmetro	Valor Calculado	Valor Simulado (Malha Aberta)	Valor Simulado (Malha Fechada)
Razão Cíclica	0,5	0,5	0,5
Ondulação da Corrente no Indutor	2,083 A	2,088 A	2,083 A
Ondulação da Tensão no Capacitor	0,325 V	0,322 V	0,322 V
Valor Médio da Corrente Na Carga	20,83 A	20,82 A	20,87 A
Valor Médio da Corrente no Indutor	20,83 A	20,82 A	20,88 A
Valor Eficaz da Corrente no Indutor	20,83 A	20,83 A	20,89 A
Valor Eficaz da Corrente o Capacitor	0,6 A	0,59	0,6 A
Valor Médio da Corrente na Chave	10,41 A	10,42 A	10,50 A
Valor Eficaz da Corrente na Chave	14,73 A	14,74 A	14,82 A
Valor Médio da Corrente no Diodo	10,41 A	10,40 A	10,37 A

Valor Eficaz da Corrente no Diodo	14,73 A	14,71 A	14,71 A
Valor Médio da Corrente de Entrada	10,62 A	10,63 A	10,71
Rendimento do Conversor	0,98	0,98	0,98

Fonte: Autor (2024)

Ao comparar os resultados, observou-se que o PSIM apresentou precisão, sendo eficaz na previsão de comportamentos de tensão, corrente e eficiência. Contudo, o tempo de simulação variou dependendo da complexidade do circuito, sendo mais eficiente para sistemas de menor ordem. Adicionalmente, o PSIM demonstrou maior adequação para projetos envolvendo eletrônica de potência em comparação com sistemas de energia elétrica de larga escala, onde a integração com outros softwares foi necessária.

6.1 Discussão dos Resultados e Comparação com Dados Teóricos

Os resultados obtidos foram comparados com dados teóricos disponíveis em literatura técnica e medições experimentais realizadas. A precisão dos modelos do PSIM foi validada através da análise de parâmetros-chave como eficiência energética, ondulação de tensão, e resposta transitória. Principais Conclusões da Comparação com Dados Teóricos:

- **Fidelidade dos Modelos:** Os modelos do PSIM incorpora comportamento real ao comportamento teórico, especialmente em sistemas dominados por componentes passivos e dispositivos semicondutores.
- **Limitações Identificadas:** Os resultados mostram que o PSIM é limitado na simulação de redes elétricas em larga escala, onde interações entre múltiplos subsistemas e fenômenos de propagação de ondas são mais pronunciados. Isso reflete a necessidade de integrar o PSIM com outros softwares especializados para complementar as análises.

Discussão Crítica: O PSIM provou ser uma ferramenta poderosa para a prototipagem e validação de projetos de eletrônica de potência, mas não substitui análises mais abrangentes exigidas em sistemas de energia elétrica de maior

complexidade. Além disso, a dependência de configurações manuais para otimização do tempo de simulação e integração com outros softwares pode impactar negativamente sua aplicabilidade em projetos com prazos curtos.

Recomendações Finais: Com base nos resultados discutidos, recomenda-se o uso do PSIM como ferramenta principal em projetos focados em eletrônica de potência e como ferramenta complementar em análises de sistemas integrados. Além disso, a adoção de treinamentos específicos no software pode maximizar sua eficiência e usabilidade em cenários complexos.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta seção apresenta uma síntese do estudo sobre o uso do software PSIM na área de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. São discutidas as principais conclusões do trabalho, suas contribuições, as limitações identificadas e sugestões para futuros estudos que possam complementar ou expandir as descobertas e aplicações observadas.

7.1 Conclusão Geral sobre o Uso do PSIM

O uso do PSIM (Power Simulation) no contexto de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência tem mostrado ser uma ferramenta versátil e eficaz, com grande aplicabilidade em projetos e simulações que exigem precisão e eficiência no desenvolvimento e análise de circuitos complexos. Em termos gerais, o PSIM se destacou pela facilidade de uso, pela interface amigável e pelas diversas bibliotecas especializadas, que contribuem para uma experiência de simulação integrada e focada nas necessidades da engenharia de potência.

A conclusão geral deste estudo confirma que o PSIM oferece um ambiente robusto para simular cenários variados, que vão desde o comportamento dinâmico de sistemas elétricos a análises de eficiência energética em conversores de potência. Este estudo evidenciou que a utilização do PSIM proporciona uma redução significativa de tempo e recursos no processo de prototipagem de sistemas, oferecendo uma alternativa segura e econômica para os testes iniciais de projetos.

Além disso, o PSIM revelou-se eficaz no ensino e aprendizado de conceitos complexos na área de energia elétrica e eletrônica de potência, sendo uma ferramenta amplamente recomendada em cursos de engenharia. Sua capacidade de apresentar simulações com animações e gráficos de fácil entendimento contribui para uma melhor compreensão teórica e prática dos sistemas.

7.2 Contribuições do Trabalho

Este trabalho contribuiu de maneira significativa para o entendimento das funcionalidades e potencialidades do PSIM no contexto de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. As principais contribuições podem ser descritas a seguir:

1. Análise das Funcionalidades do PSIM: O estudo aprofundado das funcionalidades do PSIM permitiu identificar quais ferramentas e recursos são mais úteis em determinados tipos de projeto. Este mapeamento das

características do software representa uma contribuição prática importante para profissionais e estudantes que buscam uma ferramenta eficiente para simulação de sistemas de potência.

2. Estudo Comparativo: A comparação entre o PSIM e outros softwares de simulação, como MATLAB/Simulink e PSCAD, forneceu insights valiosos sobre as vantagens e desvantagens do PSIM em relação a essas plataformas. Constatou-se que, em muitas aplicações, o PSIM se destaca pela simplicidade e pela rapidez, características desejáveis em aplicações que requerem análises rápidas de desempenho e comportamento de sistemas elétricos.
3. Aplicação em Projetos Reais: O desenvolvimento de estudos de caso utilizando o PSIM em projetos reais de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência demonstrou na prática os benefícios e limitações da plataforma. Esses estudos mostraram que o PSIM consegue simular com eficiência diversos tipos de conversores e sistemas de controle de potência, validando a viabilidade do software para implementação em ambientes de produção.
4. Contribuição Acadêmica e Pedagógica: O trabalho reforça o valor do PSIM como ferramenta de ensino, que facilita o aprendizado em engenharia de potência. A partir deste estudo, estudantes e professores podem obter uma visão clara de como utilizar o software em atividades pedagógicas, tornando o processo de ensino-aprendizagem mais dinâmico e eficaz.

7.3 Limitações do Estudo

Embora o PSIM apresente diversas vantagens, o estudo identificou algumas limitações que impactam o seu uso em determinados contextos, sendo importante destacar essas limitações para que futuras pesquisas e aplicações possam contornar ou minimizar tais obstáculos. As principais limitações observadas foram:

1. Capacidade de Simulação em Grandes Redes: Em simulações que envolvem redes de grande escala, o PSIM pode apresentar limitações em termos de processamento e detalhamento. Por exemplo, em sistemas de distribuição complexos, o software pode apresentar dificuldades em lidar com todos os elementos e variáveis do sistema sem que haja perda de desempenho.

2. **Integração com Outros Softwares:** Apesar de o PSIM ser eficiente em muitos aspectos, a integração com outras ferramentas de engenharia, como MATLAB e PSCAD, pode ser complexa. Essa limitação se apresenta especialmente para usuários que necessitam de uma interoperabilidade completa entre softwares para análise de dados e simulações complementares, o que pode restringir o uso do PSIM em contextos que exigem essa integração contínua.
3. **Limitações no Controle Avançado e nas Bibliotecas de Componentes:** Em comparação com outras ferramentas de simulação, o PSIM possui um número limitado de componentes especializados e opções para o desenvolvimento de controles avançados, como sistemas de controle baseados em inteligência artificial ou aprendizado de máquina. Essa limitação pode restringir o uso do PSIM para pesquisadores que buscam explorar novas tecnologias de controle e previsão em sistemas de potência.
4. **Dependência da Capacidade Computacional:** O desempenho do PSIM é altamente dependente da capacidade de processamento do equipamento utilizado. Em computadores com menor capacidade, o tempo de simulação pode ser significativamente elevado, o que limita sua aplicabilidade para projetos que exigem alta velocidade de processamento, como testes em tempo real ou em projetos que envolvem múltiplas simulações simultâneas.
5. **Limitações na Documentação e Suporte:** Embora o PSIM possua uma interface amigável, alguns recursos e ferramentas não estão suficientemente documentados, o que pode dificultar o entendimento pleno de suas funcionalidades. Essa carência de documentação pode ser uma barreira para novos usuários e uma limitação para o uso extensivo de todas as potencialidades do software.

7.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nas descobertas e nas limitações identificadas ao longo deste estudo, algumas sugestões para trabalhos futuros foram formuladas com o objetivo de incentivar pesquisas que possam complementar ou expandir o uso do PSIM no setor de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência:

1. **Desenvolvimento de Estudos de Integração:** Pesquisas futuras poderiam focar na integração do PSIM com outros softwares, como MATLAB e LabVIEW, para análise e simulação de sistemas híbridos. Esse tipo de integração

poderia permitir uma abordagem mais abrangente e precisa na simulação de redes complexas e no controle de múltiplos subsistemas.

2. Exploração de Sistemas de Controle Inteligente: Dada a crescente importância dos sistemas de controle inteligente, uma linha de pesquisa interessante seria a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina e inteligência artificial no PSIM. Esse tipo de estudo poderia investigar como essas tecnologias podem ser incorporadas ao software para melhorar o desempenho dos sistemas simulados.
3. Otimização de Simulações para Sistemas em Grande Escala: Estudos que investiguem a possibilidade de otimizar o PSIM para aplicações em redes de energia de grande escala, como redes inteligentes (smart grids) e microrredes, são recomendados. Estes estudos podem explorar tanto o desenvolvimento de novas bibliotecas especializadas quanto o uso de hardware acelerador, como GPUs, para aumentar a capacidade de processamento do PSIM em simulações complexas.
4. Estudo sobre Interfaces de Usuário e Documentação: Considerando as dificuldades encontradas na documentação e no suporte do PSIM, recomenda-se que estudos futuros proponham melhorias na interface do usuário e no suporte técnico, bem como na criação de tutoriais e guias detalhados para usuários de diferentes níveis. Esse tipo de pesquisa contribuiria para facilitar a adoção do PSIM em contextos educativos e industriais.
5. Simulação de Aplicações Emergentes: Outra sugestão interessante para trabalhos futuros é investigar o uso do PSIM em aplicações emergentes, como a integração de veículos elétricos e energias renováveis na matriz energética. Estudos que simulem esses sistemas no PSIM podem gerar dados e insights relevantes para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e eficazes.
6. Desenvolvimento de Novas Bibliotecas de Componentes: O desenvolvimento de novas bibliotecas, incluindo componentes para controle avançado e simulação de energias renováveis, como sistemas fotovoltaicos e eólicos, é uma linha de pesquisa promissora. Estas bibliotecas ajudariam a ampliar as aplicações do PSIM para áreas de energia limpa e sustentabilidade.

7. Avaliação do Desempenho Computacional: Trabalhos que investiguem o impacto do desempenho computacional em diferentes tipos de hardware para o PSIM podem fornecer informações úteis para orientar a escolha de equipamentos adequados para o uso do software, especialmente em projetos de maior complexidade.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power System Control and Stability**. 2. ed. Iowa: Wiley-IEEE Press, 2003.
- BARBOSA, F. S.; OLIVEIRA, J. C. **Análise de Circuitos de Potência com PSIM**. 1. ed. São Paulo: Editora Técnica, 2015.
- BOYLE, G. **Renewable Electricity and the Grid: The Challenge of Variability**. 1. ed. London: Earthscan, 2007.
- CARVALHO, L. M.; SILVA, M. P. **Introdução ao PSIM para Engenharia de Potência**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CHENG, W.; DU, Y.; ZHANG, J. **Simulation of Power Electronics in PSIM**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2019.
- COSTA, F. M. **Fundamentos de Sistemas de Energia Elétrica**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2018.
- DUTRA, R. M.; GONÇALVES, S. R. **Modelagem de Conversores com PSIM**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2021.
- FREITAS, A. C. **Simulação Computacional em Eletrônica de Potência**. 2. ed. Belo Horizonte: EdUFU, 2016.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. 1. ed. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.
- LEE, F. C.; LIU, D. Y. **Design and Control of Power Converters**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- LOPES, A. J. **PSIM na Análise de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. Recife: Editora Universitária, 2022.
- MAKSIMOVIC, D.; CUELLAR, A. **Computer-Aided Analysis in Power Electronics Using PSIM**. 1. ed. San Francisco: Morgan & Claypool, 2021.
- MENG, X.; CHEN, W. **Introduction to Power Electronics Simulation with PSIM**. 1. ed. New York: CRC Press, 2017.

- MOTA, P. R.; ALVES, J. R. **Eletrônica de Potência: Práticas e Aplicações com PSIM**. 1. ed. Curitiba: Editora Positivo, 2019.
- NAGANO, K. F.; SANTOS, V. A. **Guia Prático para Simulação de Sistemas de Energia com PSIM**. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 2020.
- ONG, C. M. **Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB and Simulink**. 1. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- PEREIRA, S. L. **Aplicações Avançadas de PSIM em Eletrônica de Potência**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2021.
- PRASAD, S.; VASUDEVAN, D. **Power Electronics Simulation Using PSIM**. 1. ed. Boston: Artech House, 2018.
- SANTOS, L. A.; MENDES, R. S. **Modelagem de Sistemas de Energia Elétrica com PSIM**. 1. ed. Brasília: Senac, 2020.
- SILVA, T. A. **Sistemas de Potência: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2015.
- SOUZA, J. C. **PSIM e MATLAB na Engenharia Elétrica**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- SU, H.; YANG, C. **Introduction to Renewable Energy Simulation with PSIM**. 1. ed. New York: Springer, 2019.
- TAKASHI, S.; WATANABE, Y. **Advanced Simulation Techniques for Power Systems**. 1. ed. Tokyo: Springer, 2021.
- TRINDADE, M. R. **Eletrônica de Potência e Simulação Computacional**. 2. ed. Salvador: EdUFBA, 2018.
- VARAIYA, P.; WU, F. F. **Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions**. 1. ed. New York: Elsevier, 2021.
- VASCONCELOS, H. F.; MARTINS, R. L. **PSIM e Aplicações Práticas em Eletrônica de Potência**. 1. ed. São Paulo: Makron Books, 2022.
- WANG, Y.; CHEN, X. **Simulation of Smart Grids and Renewable Energy Systems with PSIM**. 1. ed. Oxford: Wiley, 2021.
- XIAO, Z.; LIU, X. **Control Techniques in Power Electronics with PSIM**. 1. ed. Boston: MIT Press, 2018.

