Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Conexão à Rede de Painéis Fotovoltaicos via Pontes H em Cascata com Conversor Trifásicos de Seis Braços

Arthur de Queiroz T. B. Mesquita

Campina Grande - PB

Março de 2026

Arthur de Queiroz T. B. Mesquita

Conexão à Rede de Painéis Fotovoltaicos via Pontes H em Cascata com Conversor Trifásicos de Seis Braços

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenadoria de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica - CGEE

Dr. Ing. Cursino Brandão Jacobina, Dr.

(Orientador)

Campina Grande - PB

Março de 2026

Arthur de Queiroz T. B. Mesquita

Conexão à Rede de Painéis Fotovoltaicos via Pontes H em Cascata com Conversor Trifásicos de Seis Braços

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenadoria de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em ____ /____ /____

Dr. Reuben Palmer Rezende de SOuza
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Dr. Ing. Cursino Brandão Jacobina
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande - PB
Março de 2026

Dedico este trabalho aos meus pais,
que me ensinaram desde cedo o valor do conhecimento.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, Wandemberg e Germana, pilares fundamentais na minha educação e na minha criação. Sou eternamente grato por sua dedicação e sacrifício para poderem me proporcionar chegar até aqui. Agradeço aos meus irmãos, Caio e Beatriz, por sempre proporcionarem companheirismo durante essa jornada, e à minha família por todo o apoio prestado.

Agradeço profundamente à minha namorada, Lívia, que, em todos esses anos passados, me apoiou incondicionalmente durante todas as etapas e dividiu este fardo comigo, mesmo nos momentos mais complicados.

Agradeço imensamente a todos os meus amigos que participaram dessa jornada. Meu sincero obrigado por, indiretamente e — na maior parte das vezes — diretamente, me ajudarem a carregar esse peso e tornar essa experiência mais leve, mesmo nas longas noites passadas em branco estudando.

Agradeço ao Professor Cursino pelas oportunidades proporcionadas, todo o conhecimento e sabedoria compartilhados e, especialmente, pela mentoria provida durante todos esses anos. Agradeço também aos colegas do LEIAM pelo conhecimento partilhado, em especial a Jean e Ademar, pela paciência e companheirismo.

“Nada de desgosto, nem de desânimo; se acabas de fracassar, recomeça.“,
(Marcus Aurelius)

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma interface para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica, focada na melhoria da qualidade da energia e suporte à rede. A proposta surge da necessidade de mitigar problemas como a intermitência solar e o sombreamento parcial, que provocam desequilíbrios e distorções nos sistemas de potência atuais. Para isso, foi proposta uma topologia baseada em um conversor de seis braços com um único barramento compartilhado, utilizado como interface entre a geração por painéis fotovoltaicos e a rede elétrica, permitindo que a estrutura atue simultaneamente como interface de geração e filtro ativo de potência. No desenvolvimento do estudo, foram elaboradas a modelagem matemática do sistema, as estratégias de modulação e as malhas de controle hierárquicas. Os resultados, obtidos através de simulações computacionais, validam a eficácia da solução tanto em regime permanente quanto sob condições de desequilíbrio, garantindo estabilidade e baixa distorção harmônica na corrente injetada. O estudo demonstra que a topologia representa uma alternativa robusta e eficiente para a modernização da geração distribuída.

Palavras-chave: Conversores Estáticos. Qualidade de Energia. Sistemas Fotovoltaicos. Geração Distribuída.

Abstract

This work presents the development of an interface for connecting photovoltaic systems to the power grid, focused on improving power quality and grid support. The proposal arises from the need to mitigate issues such as solar intermittency and partial shading, which cause imbalances and distortions in current power systems. To this end, a topology based on a six-arm converter with a single shared bus was proposed, used as an interface between photovoltaic panel generation and the power grid, allowing the structure to act simultaneously as a generation interface and an active power filter. In the study's development, system mathematical modeling, modulation strategies, and hierarchical control loops were established. The results, obtained through computational simulations, validate the effectiveness of the solution in both steady-state and imbalance conditions, ensuring stability and low harmonic distortion in the injected current. The study demonstrates that the topology represents a robust and efficient alternative for the modernization of distributed generation.

Keywords: Static Converters. Power Quality. Photovoltaic Systems. Distributed Generation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Topologia do inversor monofásico em ponte completa (ponte-H). 6
Figura 2 – Topologia clássica de um inversor trifásico. 7
Figura 3 – Topologia do conversor multinível em pontes-H em cascata (CHB). . . 9
Figura 4 – Estrutura básica de um filtro ativo de potência em derivação. 11
Figura 5 – Estrutura básica de um filtro ativo de potência série. 11
Figura 6 – Topologia do conversor 2x3L. 17
Figura 7 – Plano vetorial das tensões do conversor 2x3L. 20
Figura 8 – Diagrama de controle geral do sistema. 21
Figura 9 – Diagrama de controle do conversor 2x3L. 22
Figura 10 – Diagrama de controle da cascata CHB. 23
Figura 11 – Tensão da rede (e_g) e correntes (i_g) em regime permanente. 26
Figura 12 – Corrente no lado da geração (i_l). 27
Figura 13 – Tensões dos barramentos da fase 1 (V_{dc} e V_{dc_1k}). 27
Figura 14 – Tensões do conversor no lado da rede (v_{gh}) e seu valor médio. 28
Figura 15 – Tensões no lado da geração (v_{hs}) e seu valor médio. 29
Figura 16 – Tensão resultante da cascata (e_{l1}) e seu valor médio. 29
Figura 17 – Correntes contínuas das células da fase 1 ($i_{dc_{1k}}$) durante o evento de sombreamento. 30
Figura 18 – Tensões dos barramentos da fase 1 (V_{dc} e V_{dc_1k}) sob sombreamento parcial. 31
Figura 19 – Tensão no lado da geração (v_{hs}) e seu valor médio ($\bar{v}_{hs}$). 32
Figura 20 – Corrente no lado da geração (i_l) sob condição de sombreamento parcial. 32
Figura 21 – Tensão de polo da célula (e_{l1}) e seu valor médio ($\bar{e}_{l1}$) sob sombreamento. 33
Figura 22 – Tensão do conversor no lado da rede (v_{gh}) e seu valor médio ($\bar{v}_{gh}$). . . . 33
Figura 23 – Tensão da rede elétrica (e_g) e corrente da rede (i_g) durante o transitório de potência. 34
Figura 24 – Tensão da rede (e_g), corrente da rede (i_g) e tensão do barramento do 2x3L (V_{dc}). 35
Figura 25 – Tensão do barramento do 2x3L (V_{dc}), tensão da rede (e_g) e correntes das fases 1 e 2 da rede (i_{g_1} e i_{g_2}). 36
Figura 26 – V_{dc}, tensões do lado da rede (v_{gh_2}), do lado da geração (v_{hs_2}) e corrente da rede da fase 2 (i_{g_2}). 36
Figura 27 – Corrente do barramento da ponte 1 da célula 1 ($i_{dc_{11}}$) e tensões dos barramentos CC das células da fase 1 ($V_{dc_{1k}}$). 37

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros utilizados 25
Tabela 2 – Ganhos proporcionais e integrais utilizados para os controladores do sistema. 26
Tabela 3 – Parâmetros utilizados no ensaio experimental 35

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APF	Filtro Ativo de Potência (*Active Power Filter*)
CC	Corrente Contínua
CHB	Pontes-H em Cascata (*Cascaded H-Bridge*)
FC	Capacitores Flutuantes (*Flying Capacitors*)
FV	Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking*)
NPC	Ponto Neutro Grampeado (*Neutral Point Clamped*)
PCC	Ponto de Acoplamento Comum (*Point of Common Coupling*)
PI	Proporcional-Integral
PLL	Malha de Captura de Fase (*Phase-Locked Loop*)
PR	Proporcional-Ressonante
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PS-PWM	Modulação com Portadoras Defasadas(*Phase Shift Pulse Width Modulation*)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation*)
RMS	Valor Eficaz (*Root Mean Square*)
SAPF	Filtro Ativo de Potência em Derivação (*Shunt APF*)

SPWM	Modulação por Largura de Pulso Senoidal(*Sinusoidal Pulse Width Modulation*)
SVM	Modulação Vetorial (*Space Vector Modulation*)
THD	Distorção Harmônica Total (*Total Harmonic Distortion*)
VSI	Inversores de Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverters*)

Sumário

1 INTRODUÇÃO . . . 1
1.1 Contextualização . . . 1
1.2 Objetivo Geral . . . 2
1.3 Objetivos Específicos . . . 2
1.4 Organização do Trabalho . . . 3

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . 4
2.1 Geração Distribuída . . . 4
2.1.1 Sistemas Fotovoltaicos . . . 4
2.1.2 Interface com a Rede Elétrica . . . 5
2.2 Conversores Estáticos . . . 5
2.2.1 Inversores de Fonte de Tensão . . . 6
2.2.1.1 Inversores Monofásicos . . . 6
2.2.1.2 Inversores Trifásicos . . . 6
2.2.2 Conversores Multiníveis . . . 7
2.2.2.1 Conversores em Pontes-H em Cascata (CHB) . . . 7
2.3 Qualidade de Energia . . . 8
2.3.1 Distúrbios que degradam a qualidade de energia . . . 9
2.3.2 Filtros Ativos de Potência . . . 10
2.3.2.1 Filtro Ativo de Potência em Derivação (Shunt) . . . 10
2.3.2.2 Filtro Ativo de Potência Série . . . 10
2.4 Estratégias de Modulação . . . 11
2.4.1 Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM) . . . 12
2.4.2 Modulação com Portadoras Defasadas (PS-PWM) . . . 12
2.4.3 Injeção de Tensão Homopolar . . . 13
2.5 Controle de Conversores Conectados à Rede . . . 13
2.5.1 Malha de Captura de Fase (PLL) . . . 13
2.5.2 Controlador Proporcional-Integral (PI) . . . 14
2.5.3 Controlador Proporcional-Ressonante (PR) . . . 14
2.6 Revisão Bibliográfica . . . 15

3 METODOLOGIA . . . 17
3.1 Modelagem do Sistema . . . 17
3.2 Estratégia de Modulação . . . 19
3.2.1 Conversor 2x3L . . . 19
3.2.2 Pontes-H em Cascata . . . 20

3.3 Projeto dos Controladores 21
3.3.1 Controle do Conversor 2x3L 21
3.3.2 Controle das Pontes-H em Cascata 23
3.3.2.1 Controle Global 23
3.3.2.2 Controle Individual 24

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 25
4.1 Resultados de Simulação 25
4.1.1 Operação em Regime Permanente 25
4.1.2 Operação sob Sombreamento Parcial 30
4.2 Resultados Experimentais 34

5 CONCLUSÕES 38
5.1 Conclusão 38
5.2 Considerações Finais 38

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 40

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A matriz energética mundial atravessa um período de transição sem precedentes, impulsionado por metas globais de descarbonização e pela necessidade de mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Esse movimento fomenta a substituição progressiva de fontes fósseis por alternativas renováveis e incentiva a expansão da geração distribuída (GD) em diferentes níveis de potência. Nesse contexto, a geração solar fotovoltaica consolidou-se como uma das tecnologias mais estratégicas, apresentando crescimento acelerado de capacidade instalada e assumindo papel central na modernização dos sistemas elétricos. No entanto, o aumento expressivo da penetração dessa fonte na rede elétrica impõe desafios técnicos relevantes, especialmente no que diz respeito à integração de recursos energéticos descentralizados e à manutenção da qualidade de energia elétrica sob condições dinâmicas (KOURO et al., 2015).

A natureza intermitente da radiação solar, aliada à utilização intensiva de conversores eletrônicos de potência, introduz distúrbios que afetam diretamente a estabilidade e o desempenho da rede. Em particular, variações de geração decorrentes de sombreamento parcial podem provocar desequilíbrios entre fases, distorções harmônicas e degradação da qualidade da corrente injetada (SEPASI; TALICHET; PRAMANIK, 2023). Nesse cenário, a utilização de conversores multiníveis em configuração de pontes-H em cascata (CHB) tem se destacado como uma solução adequada para aplicações de média e alta potência, devido à sua modularidade e à capacidade de operar com elevados níveis de tensão (ZHANG et al., 2018). Entretanto, quando empregados diretamente como interface com a rede, esses conversores permanecem suscetíveis a condições operacionais adversas, especialmente em presença de assimetrias de geração e perturbações na rede elétrica (MARTHI et al., 2024).

Uma abordagem amplamente investigada para mitigar tais problemas consiste na utilização de filtros ativos de potência. Em particular, filtros ativos em derivação são capazes de compensar correntes harmônicas e potência reativa, enquanto filtros ativos em série atuam na regulação da tensão, mitigando afundamentos, elevações e desequilíbrios (LIU et al., 2023). A integração dessas funcionalidades em sistemas baseados em conversores multiníveis tem sido explorada na literatura recente, permitindo que o conversor atue simultaneamente como interface de geração e como elemento de suporte à rede. Ainda assim, na maioria das abordagens, essas funções são implementadas por estruturas fisicamente separadas ou por estratégias de controle que não exploram completamente o potencial estrutural dos conversores.

Diante desse cenário, o problema central deste trabalho consiste em aprimorar a interface de sistemas fotovoltaicos baseados em arquiteturas de pontes-H em cascata, de modo a garantir robustez frente a desequilíbrios e ampliar a capacidade de suporte à rede. A solução proposta baseia-se na utilização de um conversor trifásico composto por dois conversores de três braços, denominado 2x3L, originalmente apresentado em (FELINTO et al., 2021), no qual as estruturas em cascata são conectadas em configuração de extremidade aberta (*open-end*). Nessa configuração, cada fase do sistema passa a ser definida por dois terminais ativos. Ao empregar um único barramento de corrente contínua (CC) comum, a topologia permite integrar, de forma coordenada, a injeção de potência proveniente dos módulos fotovoltaicos com a compensação ativa de distúrbios de tensão e corrente. Dessa forma, busca-se não apenas preservar a qualidade da energia sob condições adversas, como também ampliar a capacidade de operação do sistema em cenários de sombreamento parcial e desequilíbrio de rede, caracterizando um avanço em relação às soluções convencionais de interfaceamento.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar e analisar uma topologia de interface para sistemas fotovoltaicos baseada na associação de pontes-H em cascata com um conversor proposto, visando garantir a integração eficiente com a rede elétrica, bem como a capacidade de compensação de distúrbios de tensão e corrente, mesmo sob condições adversas de operação, como o sombreamento parcial.

1.3 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver o modelo do sistema fotovoltaico baseado em pontes-H em cascata integrado ao conversor proposto;
- Implementar e analisar estratégias de modulação adequadas para a operação conjunta das estruturas do sistema;
- Projetar e ajustar os controladores responsáveis pela regulação das correntes e tensões do sistema;
- Avaliar o desempenho do sistema em regime permanente, considerando a qualidade da corrente injetada na rede elétrica;
- Investigar o comportamento do sistema sob condições de sombreamento parcial, com foco no desequilíbrio dos barramentos CC e seus impactos;

- Analisar a atuação do conversor proposto como filtro ativo, tanto na configuração em derivação quanto série, evidenciando a capacidade de mitigação de distúrbios;
- Quantificar os índices de qualidade de energia, como a distorção harmônica total (THD), em diferentes condições de operação;
- Validar a proposta por meio de simulações computacionais, comparando o desempenho em diferentes cenários operacionais.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos.

No Capítulo 1, é apresentada a introdução do tema, abordando o contexto da geração fotovoltaica conectada à rede, os desafios associados à qualidade de energia e à operação sob condições adversas, bem como a motivação para o desenvolvimento da topologia proposta.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica, reunindo os principais conceitos relacionados à geração distribuída, conversores multiníveis, qualidade de energia elétrica e estratégias de controle aplicadas a sistemas conectados à rede.

No Capítulo 3, é descrita a metodologia adotada, incluindo a modelagem do sistema, a definição das estratégias de modulação e o projeto dos controladores responsáveis pela operação do conversor proposto e das pontes-H em cascata.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por simulação, contemplando a operação do sistema em regime permanente e sob condições de sombreamento parcial. São analisados aspectos como a regulação dos barramentos CC, o comportamento das correntes e tensões nos lados da geração e da rede, bem como a capacidade do conversor proposto de atuar como compensador de distúrbios, evidenciando sua atuação como filtro ativo série e em derivação.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições do conversor proposto e sugerindo possíveis direções para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção detalha os conceitos de conversores multiníveis, filtros ativos de potência e estratégias de controle aplicadas a sistemas conectados à rede.

2.1 Geração Distribuída

A geração distribuída caracteriza-se pela produção de energia elétrica a partir de unidades geradoras instaladas de forma descentralizada e posicionadas próximas aos centros de consumo (IEEE, 2018). Este paradigma rompe com a lógica tradicional dos sistemas de potência baseados em grandes centrais geradoras localizadas em pontos remotos as quais dependem de extensas infraestruturas de transmissão para o atendimento da demanda. A adoção deste modelo proporciona a redução das perdas técnicas inerentes ao transporte de eletricidade e contribui para a diversificação da matriz energética por meio do aproveitamento de recursos locais e renováveis. Para que a integração dessas fontes ocorra de forma segura e eficiente torna-se necessária a utilização de interfaces de eletrônica de potência avançadas as quais devem ser capazes de gerenciar o fluxo de energia e garantir a estabilidade da rede elétrica frente a variações bruscas de carga ou de disponibilidade de recurso natural.

2.1.1 Sistemas Fotovoltaicos

A geração de eletricidade a partir da radiação solar fundamenta-se no efeito fotovoltaico, processo no qual a incidência de fótons sobre materiais semicondutores promove o deslocamento de portadores de carga e estabelece uma diferença de potencial elétrico (MESSENGER; VENTRE, 2020). O comportamento resultante desse fenômeno é definido por relações não lineares entre corrente e tensão, as quais são representadas graficamente por curvas características que evidenciam um ponto de máxima transferência de potência para cada condição de operação. A eficiência global da conversão energética é influenciada de forma determinante por variáveis ambientais, com destaque para a irradiância solar e a temperatura das células.

No âmbito de sistemas modulares, a ocorrência de sombreamento parcial constitui um dos maiores desafios técnicos para a estabilidade da geração (SEPASI; TALICHET; PRAMANIK, 2023). Esse fenômeno ocorre quando obstáculos físicos ou nuvens bloqueiam de forma heterogênea a radiação sobre o arranjo, o que limita a corrente nos ramos afetados e provoca desequilíbrios de potência entre os módulos fotovoltaicos conectados em série. Tal cenário resulta no surgimento de múltiplos pontos de máxima potência locais

nas curvas características, dificultando a operação dos conversores estáticos de interface. Para contornar essas limitações e garantir o máximo rendimento operacional, torna-se indispensável a implementação de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) (WORKU et al., 2023), os quais ajustam dinamicamente os parâmetros de controle do sistema para localizar o ponto de operação ótimo independentemente das oscilações climáticas ou de desequilíbrios momentâneos no arranjo fotovoltaico.

2.1.2 Interface com a Rede Elétrica

O interfaceamento de sistemas de geração distribuída com a infraestrutura elétrica convencional é realizado por meio de conversores estáticos que atuam como o elo de ligação entre a fonte primária e a rede de distribuição. Esta interface deve garantir a sincronização precisa com a frequência e a fase da tensão da rede por meio de algoritmos de malha de captura de fase (PLL - *Phase-Locked Loop*), além de assegurar que a injeção de potência ocorra em conformidade com os requisitos técnicos de segurança e proteção (IEEE, 2018; ABNT, 2013a; ABNT, 2013b). Além da transferência de potência ativa, os conversores modernos são projetados para prover suporte dinâmico por meio da compensação de potência reativa e da regulação da tensão no ponto de conexão comum. A eficácia desta interface depende da robustez das estratégias de controle aplicadas, as quais devem manter a estabilidade operacional do sistema mesmo diante de distúrbios de rede ou variações na impedância do ponto de acoplamento.

2.2 Conversores Estáticos

Os conversores estáticos de potência são sistemas eletrônicos que realizam a transformação e o controle da energia elétrica por meio do chaveamento de dispositivos semicondutores operando em regime de comutação (RASHID, 2014; VITORINO, 2019). Esses circuitos são fundamentais para a integração de sistemas com características elétricas distintas, pois permitem a alteração de níveis de tensão e corrente, além da frequência e do número de fases da energia processada. O princípio de funcionamento baseia-se no uso de interruptores de estado sólido como MOSFETs e IGBTs que atuam nos estados de condução ou bloqueio para minimizar as perdas por dissipação térmica. A classificação dessas infraestruturas ocorre em função da natureza das grandezas elétricas nos terminais de entrada e saída, o que inclui retificadores para conversão CA-CC, inversores para conversão CC-CA e conversores CC-CC ou CA-CA. O desempenho desses sistemas depende da topologia de circuitos adotada e da precisão das estratégias de modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) (HOLMES; LIPO, 2003), que coordenam os tempos de acionamento de cada interruptor para garantir a eficiência energética e a conformidade com as exigências técnicas da carga ou da rede elétrica.

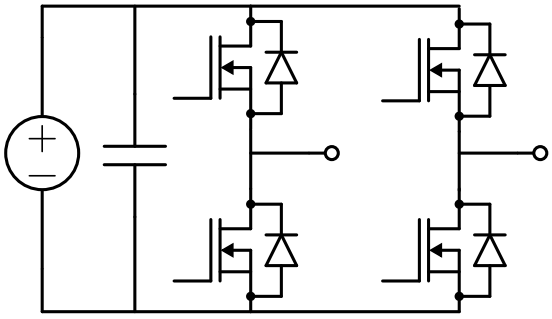
2.2.1 Inversores de Fonte de Tensão

Os inversores de fonte de tensão (VSI - *Voltage Source Inverters*) representam uma classe de conversores estáticos projetados para transformar uma grandeza de corrente contínua em corrente alternada com controle sobre a amplitude e a frequência da forma de onda sintetizada (RASHID, 2014). Esta tecnologia caracteriza-se pela presença de uma fonte de tensão constante no lado de corrente contínua a qual é comumente implementada por meio de capacitores dimensionados para manter o barramento CC estável e atenuar oscilações provenientes da fonte primária ou do chaveamento (VITORINO, 2019). O controle da tensão de saída é realizado pela modulação dos estados de condução das chaves (HOLMES; LIPO, 2003), que conectam alternadamente a carga aos terminais do barramento CC.

2.2.1.1 Inversores Monofásicos

O inversor monofásico em configuração de ponte completa é constituído por quatro chaves organizadas em dois braços de comutação que permitem aplicar tensões positivas, negativas ou nulas sobre a carga (RASHID, 2014). Esta topologia é amplamente utilizada devido à flexibilidade operacional, uma vez que possibilita a implementação de diferentes métodos de PWM (HOLMES; LIPO, 2003). Na estratégia de modulação bipolar a tensão de saída alterna entre os valores máximo e mínimo do barramento CC, enquanto na modulação unipolar é possível obter três níveis de tensão distintos, o que resulta em uma redução do conteúdo harmônico e em uma melhoria na qualidade da corrente injetada. A capacidade de gerar um nível de tensão nulo por meio do fechamento simultâneo de chaves superiores ou inferiores contribui para a redução da frequência de ondulação nos filtros de saída e aumenta a eficiência global do conversor em aplicações de pequeno e médio porte.

Figura 1 – Topologia do inversor monofásico em ponte completa (ponte-H).



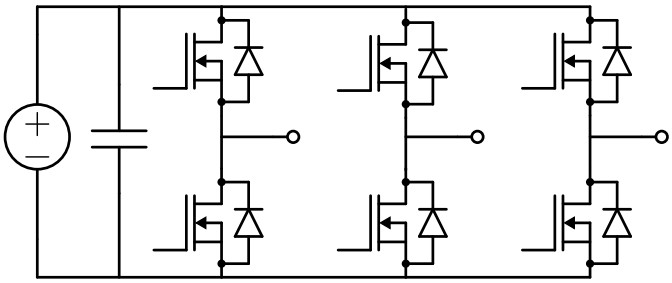
Fonte: Próprio autor.

2.2.1.2 Inversores Trifásicos

Os inversores trifásicos de fonte de tensão são estruturados por meio de seis interruptores semicondutores distribuídos em três braços independentes que alimentam

sistemas trifásicos equilibrados ou cargas industriais de grande porte (RASHID, 2014). Cada braço do conversor opera de forma coordenada para garantir que as tensões de saída apresentem uma defasagem mútua de cento e vinte graus elétricos, o que é um requisito essencial para o funcionamento de máquinas elétricas e para a estabilidade da rede de distribuição. O emprego de técnicas avançadas como a modulação vetorial (SVM - *Space Vector Modulation*) permite uma utilização mais eficiente da tensão disponível no barramento CC e proporciona um controle preciso sobre o fluxo de potências ativa e reativa injetadas no ponto de conexão.

Figura 2 – Topologia clássica de um inversor trifásico.



Fonte: Próprio autor.

2.2.2 Conversores Multiníveis

As arquiteturas de conversores multiníveis representam uma solução consolidada para o processamento de energia em aplicações que exigem elevados níveis de tensão e alta qualidade de forma de onda (SHARMA et al., 2025; AZIZI et al., 2025). O princípio fundamental desses sistemas reside na síntese de uma tensão de saída a partir da combinação de diversos patamares de corrente contínua, o que permite que a forma de onda resultante se aproxime de uma senoide ideal com maior precisão do que os modelos convencionais de dois níveis. Esta característica técnica possibilita a redução significativa da distorção harmônica total (THD - *Total Harmonic Distortion*) e minimiza a necessidade de filtros passivos volumosos na interface com a carga ou com a rede elétrica. Além da melhoria na qualidade de energia, a distribuição da tensão total entre múltiplos dispositivos semicondutores reduz o estresse de tensão sobre cada componente (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002), fato que permite o uso de chaves com menor capacidade de bloqueio individual e diminui o gradiente de tensão durante as comutações, protegendo assim a integridade dos isolamentos elétricos dos equipamentos conectados.

2.2.2.1 Conversores em Pontes-H em Cascata (CHB)

A configuração em pontes-H em cascata (CHB - *Cascaded H-Bridge*) fundamenta-se na associação em série de diversos módulos inversores monofásicos de ponte completa para a composição de cada fase do sistema (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). Esta

arquitetura modular permite que a tensão total de saída seja obtida por meio da somatória das tensões individuais geradas por cada unidade operativa, o que possibilita o alcance de níveis elevados de tensão na carga sem exceder os limites nominais de bloqueio dos componentes semicondutores. Cada módulo componente possui um barramento CC isolado e independente, característica que simplifica a construção física e em certas aplicações elimina dependência de transformadores de interface volumosos para o escalonamento da tensão em aplicações de média e alta potência.

A síntese da forma de onda ocorre através da combinação controlada dos estados de comutação de cada ponte-H (MCGRATH; HOLMES, 2002), fato que resulta em uma tensão de saída composta por múltiplos patamares definidos. Para uma estrutura composta por uma quantidade n de células CHB por fase alimentadas por tensões contínuas de mesma magnitude, o número de níveis disponíveis na tensão de fase N é definido pela expressão matemática:

$$N = 2n + 1 \tag{2.1}$$

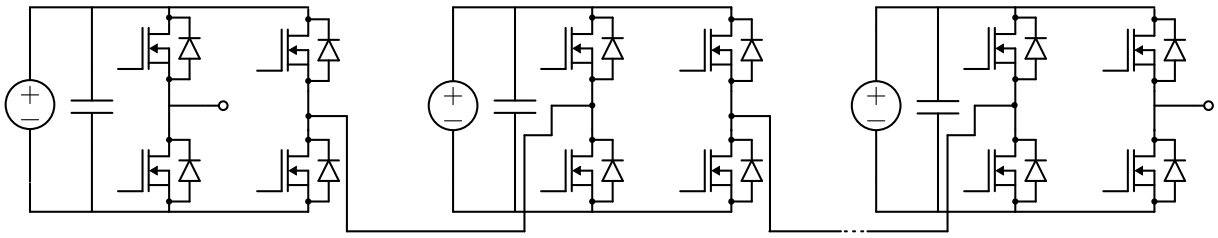
Esta relação evidencia que a adição de novos módulos expande a capacidade do conversor de aproximar a forma de onda de uma senoide ideal, o que reduz de forma expressiva a THD e minimiza o estresse de tensão nos enrolamentos de máquinas ou transformadores conectados ao sistema. Além disso, a redundância de estados de comutação inerente a esta topologia permite o desenvolvimento de estratégias de modulação que buscam a equalização térmica dos componentes e a distribuição uniforme das perdas de potência entre as pontes-H da cadeia.

A existência de barramentos CC independentes em cada célula CHB representa uma vantagem técnica para a integração de fontes renováveis como os sistemas fotovoltaicos. Esta disposição permite que cada arranjo de painéis seja conectado diretamente a uma célula CHB específica, o que possibilita a execução de algoritmos de MPPT de forma descentralizada e independente para cada unidade (WORKU et al., 2023). Tal funcionalidade garante que o sistema mantenha elevada eficiência energética mesmo sob condições de sombreamento parcial ou variações heterogêneas de temperatura, uma vez que o controle de cada célula pode ser ajustado para extrair a máxima potência disponível sem comprometer o desempenho operacional dos demais módulos da cascata. Somado a isso, a modularidade confere ao sistema propriedades de tolerância a falhas.

2.3 Qualidade de Energia

A qualidade de energia elétrica compreende um conjunto de requisitos técnicos e limites físicos que asseguram o funcionamento pleno e seguro dos equipamentos conectados à rede de distribuição (ANEEL, 2024; ANEEL, 2022; IEEE, 2019). Este conceito abrange

Figura 3 – Topologia do conversor multinível em pontes-H em cascata (CHB).



Fonte: Próprio autor.

a conformidade da tensão e da corrente em relação a padrões normatizados de amplitude e frequência, além da preservação da pureza da forma de onda senoidal original. Com a modernização das redes elétricas e a crescente inserção de dispositivos baseados em eletrônica de potência, a análise desses critérios tornou-se um requisito essencial para garantir a integridade dos ativos elétricos e a eficiência operacional tanto de consumidores quanto de concessionárias de energia. A manutenção de elevados índices de qualidade evita o surgimento de perdas térmicas excessivas em condutores e transformadores, além de prevenir o desligamento intempestivo de processos industriais sensíveis a variações na rede (IEEE, 2022; ABNT, 2010).

2.3.1 Distúrbios que degradam a qualidade de energia

Os fenômenos que comprometem a integridade das formas de onda classificam-se fundamentalmente em variações de regime permanente e distúrbios transitórios com impactos distintos sobre a estabilidade do sistema (IEEE, 2019). As distorções harmônicas representam um dos problemas mais críticos e decorrem da conexão de cargas não lineares que solicitam correntes não senoidais da rede, o que provoca quedas de tensão harmônicas ao longo das impedâncias de linha. Este efeito é quantificado por meio do THD (IEEE, 2022), a qual deve ser mantida dentro de limites rigorosos para evitar interferências em sistemas de comunicação e controle.

Outra categoria relevante de distúrbios inclui as variações de tensão de curta duração, a exemplo de afundamentos e elevações, que ocorrem devido a faltas na rede ou manobras de grandes cargas (IEEE, 2019). Somado a isso, o desequilíbrio entre fases constitui um fator de degradação significativo em sistemas trifásicos, fato que pode ser causado pela distribuição irregular de cargas monofásicas ou pela variação heterogênea na geração proveniente de fontes renováveis. Tais desequilíbrios resultam no surgimento de componentes de sequência negativa que provocam aquecimento adicional em máquinas elétricas e reduzem a vida útil dos isolamentos (BOLLEN, 2000).

2.3.2 Filtros Ativos de Potência

Os filtros ativos de potência (APF - *Active Power Filters*) representam uma solução tecnológica versátil para o condicionamento de energia em tempo real por meio da injeção de grandezas elétricas compensatórias (BAKRIA et al., 2025). Diferentemente dos filtros passivos, que operam com impedâncias fixas e sintonia limitada, os filtros ativos baseiam-se no uso de conversores estáticos controlados para atenuar distúrbios de forma dinâmica e adaptativa. Esta flexibilidade permite que o sistema responda instantaneamente a mudanças nas condições de carga ou de rede, assegurando que a compensação ocorra de forma precisa sem o risco de ressonâncias com a impedância do sistema.

2.3.2.1 Filtro Ativo de Potência em Derivação (Shunt)

O APF em configuração em derivação (SAPF - *Shunt Active Power Filter*) é o dispositivo mais difundido para a compensação de correntes harmônicas e para a correção do fator de potência em sistemas de distribuição (BAKRIA et al., 2025). Esta arquitetura opera fundamentalmente como uma fonte de corrente controlada conectada em derivação no ponto de acoplamento comum (PCC - *Point of Common Coupling*) entre a rede elétrica e a carga.

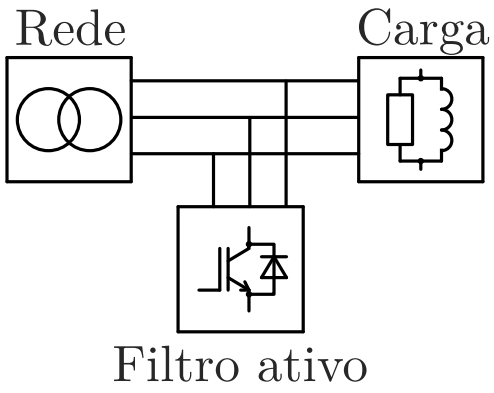
O funcionamento baseia-se na medição em tempo real das correntes solicitadas pela carga e na extração das componentes harmônicas e reativas por meio de algoritmos de processamento de sinais baseados em teorias de potência instantânea ou em eixos coordenados rotativos. A partir dessa análise, o controlador do inversor gera referências para que o sistema injete na rede uma corrente de compensação que possui a mesma magnitude, mas polaridade oposta às parcelas indesejadas da corrente da carga.

A principal vantagem técnica desta topologia reside na capacidade de assegurar que a corrente proveniente da fonte permaneça senoidal e em fase com a tensão fundamental mesmo diante de cargas altamente não lineares. O SAPF evita a circulação de correntes harmônicas pela impedância da rede (IEEE, 2022), o que reduz as quedas de tensão harmônicas e minimiza as perdas por efeito Joule nos condutores de alimentação. Além da filtragem de harmônicos, esta configuração permite o suporte de potência reativa de forma dinâmica, o que elimina a necessidade de bancos de capacitores fixos e evita riscos de ressonância com o sistema.

2.3.2.2 Filtro Ativo de Potência Série

O APF em configuração série atua como uma fonte de tensão controlada instalada entre a fonte de alimentação e a carga sensível, com o objetivo principal de proteger o sistema contra distúrbios provenientes da rede elétrica (IEEE, 2019). A conexão deste dispositivo ocorre geralmente por meio de transformadores de acoplamento que permitem a injeção de uma tensão de compensação em série com a tensão da rede.

Figura 4 – Estrutura básica de um filtro ativo de potência em derivação.

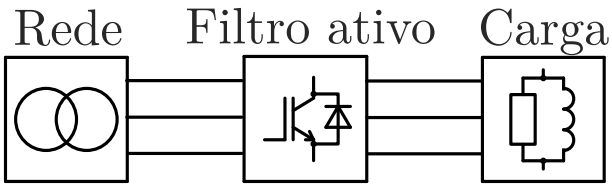


Fonte: Póprio autor.

O princípio de operação consiste em monitorar continuamente a tensão no barramento de entrada e compará-la com uma referência senoidal ideal de amplitude e fase constantes. Quando ocorre um desvio causado por afundamentos, elevações ou desequilíbrios, o conversor sintetiza a diferença de potencial necessária para que a tensão aplicada sobre a carga permaneça estável e equilibrada.

Esta topologia é particularmente eficaz para o isolamento de processos industriais críticos que não toleram variações bruscas na magnitude da tensão de alimentação. Ao contrário do SAPF, que trata problemas de corrente, o filtro ativo série foca na qualidade da tensão fornecida ao consumidor. Além de mitigar variações de magnitude, esta arquitetura pode ser utilizada para bloquear a propagação de harmônicos de tensão provenientes de outros pontos da rede, evitando que distorções causadas por terceiros afetem a operação de equipamentos sensíveis (IEEE, 2022). A eficácia desta solução depende da capacidade de armazenamento de energia no barramento CC do inversor, uma vez que a compensação de afundamentos de tensão severos exige a injeção de potência ativa durante o intervalo de ocorrência do distúrbio.

Figura 5 – Estrutura básica de um filtro ativo de potência série.



Fonte: Próprio autor.

2.4 Estratégias de Modulação

A modulação por largura de pulso (PWM) constitui a técnica fundamental para o acionamento de conversores estáticos de potência. O princípio baseia-se no chaveamento

controlado de dispositivos semicondutores para regular o valor médio das grandezas de saída, variando a razão cíclica (*duty cycle*) de um trem de pulsos de modo a reproduzir a componente fundamental de uma referência desejada.

2.4.1 Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM)

A técnica SPWM fundamenta-se na comparação contínua entre um sinal modulador senoidal e uma portadora triangular de alta frequência. O desempenho desta estratégia é caracterizado por dois parâmetros adimensionais fundamentais: o índice de modulação em amplitude (m_a) e o índice de modulação em frequência (m_f).

O índice de modulação em amplitude é definido pela relação entre a amplitude da moduladora (V_m) e o valor de pico da portadora (V_c):

$$m_a = \frac{V_m}{V_c} \tag{2.2}$$

Enquanto m_a regula a amplitude da componente fundamental na saída, o índice de modulação em frequência (m_f) define a posição das componentes harmônicas no espectro de frequências, sendo expresso pela razão entre a frequência da portadora (f_p) e a frequência da moduladora (f_m):

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} \tag{2.3}$$

No regime linear ($m_a \leq 1$), as componentes harmônicas resultantes do processo de comutação concentram-se em bandas laterais ao redor da frequência de comutação e dos seus múltiplos (HOLMES; LIPO, 2003; RASHID, 2014). Este deslocamento espectral para altas frequências facilita a filtragem passiva, permitindo a obtenção de correntes com baixo conteúdo harmônico.

2.4.2 Modulação com Portadoras Defasadas (PS-PWM)

A estratégia PS-PWM é uma extensão da técnica SPWM otimizada para topologias multiníveis modulares, como o conversor em pontes-H em cascata (MCGRATH; HOLMES, 2002). Nesta configuração, cada célula de potência é associada a uma portadora triangular independente. Para um sistema com n células por fase, as portadoras são defasadas angularmente de forma simétrica:

$$\Delta\phi = \frac{180^\circ}{n} \tag{2.4}$$

O efeito combinado das tensões sintetizadas por cada célula resulta em um fenômeno de entrelaçamento (*interleaving*), que promove o cancelamento natural de harmônicas de baixa ordem. Como consequência, a frequência aparente da ondulação na tensão de saída é multiplicada, atingindo um valor de $2n \cdot f_p$. Esta propriedade permite que o conversor opere com uma frequência de comutação individual reduzida nos semicondutores, diminuindo as

perdas por comutação sem comprometer a qualidade da forma de onda final (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

2.4.3 Injeção de Tensão Homopolar

A injeção de tensão homopolar baseia-se na adição de uma componente de sequência zero (v_0) às referências trifásicas de modulação. As referências modificadas (v'_a, v'_b, v'_c) são dadas por:

$$v'_a = v_a + v_0, \quad v'_b = v_b + v_0, \quad v'_c = v_c + v_0 \tag{2.5}$$

O princípio teórico desta técnica reside no fato de que, em sistemas trifásicos com carga equilibrada e neutro isolado, a tensão de linha aplicada à carga é definida pela diferença de potencial entre duas fases. Assim, a componente comum v_0 é matematicamente cancelada:

$$v_{ab} = v'_a - v'_b = (v_a + v_0) - (v_b + v_0) = v_a - v_b \tag{2.6}$$

Esta propriedade introduz um grau de liberdade adicional no processo de modulação. A utilização de componentes homopolares, como a injeção de terceira harmônica ou o método *Min-Max*, permite reduzir os picos das moduladoras individuais (HOLMES; LIPO, 2003). Isto resulta em um melhor aproveitamento do barramento CC, permitindo um aumento de até 15,5% na amplitude da componente fundamental da tensão de linha sem que o conversor entre em regime de sobremodulação.

2.5 Controle de Conversores Conectados à Rede

Conversores conectados à rede elétrica devem atender requisitos rigorosos de qualidade de energia (ANEEL, 2024; ANEEL, 2022; IEEE, 2022), incluindo baixo conteúdo harmônico nas correntes injetadas, operação com elevado fator de potência e estabilidade frente a variações de carga e distúrbios na rede.

Para satisfazer tais exigências, empregam-se estruturas de controle em malha fechada capazes de garantir rastreamento preciso de referências e rejeição de perturbações (ALI et al., 2026). A escolha adequada da estrutura do controlador é determinante para o desempenho dinâmico e para a robustez do sistema, especialmente quando se consideram variações de frequência, desequilíbrios e distorções harmônicas na rede.

2.5.1 Malha de Captura de Fase (PLL)

O PLL é um sistema de controle destinado à estimação contínua da fase e frequência de um sinal periódico externo. Sua estrutura clássica é composta por um detector de fase, um filtro de malha e um oscilador controlado.

O detector de fase produz um sinal proporcional ao erro angular entre o sinal medido e o sinal estimado. Esse erro é processado pelo filtro de malha, cuja função é remover componentes oscilatórias indesejadas e definir a dinâmica do sistema. O sinal filtrado ajusta o oscilador interno, de modo que o ângulo estimado (θ) acompanhe a fase da rede elétrica.

A estimação precisa de θ é indispensável para a sincronização das referências senoidais e para a implementação de estratégias de controle orientadas pela fase da rede (ALI et al., 2026).

2.5.2 Controlador Proporcional-Integral (PI)

Em conversores conectados à rede, é comum empregar diferentes estruturas de controle para cada malha do sistema. A regulação de grandezas contínuas, por tratar-se de sinais com componente dominante em corrente contínua, é tradicionalmente realizada por controladores do tipo Proporcional-Integral (PI) (OGATA, 2010).

O controlador PI combina uma ação proporcional ao erro instantâneo com uma ação integral associada ao acúmulo temporal desse erro. Sua função de transferência é expressa por:

$$C_{pi}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{2.7}$$

A presença do polo na origem confere ganho teórico infinito em frequência nula, garantindo erro nulo em regime permanente para referências constantes. Entretanto, para o rastreamento de sinais senoidais no referencial estacionário, o ganho finito na frequência fundamental resulta em erro de amplitude e defasagem (OGATA, 2010).

2.5.3 Controlador Proporcional-Ressonante (PR)

Para o rastreamento de correntes alternadas injetadas na rede no referencial estacionário, o uso do controlador PI apresenta limitações inerentes. Nesses casos, adota-se o controlador Proporcional-Ressonante (PR), capaz de garantir erro nulo na frequência fundamental (ALI et al., 2026).

Fundamentado no Princípio do Modelo Interno, o controlador PR incorpora explicitamente a dinâmica senoidal da referência na sua estrutura. Enquanto o PI atua como integrador em 0 Hz, o PR atua como integrador na frequência de interesse ω_0.

A forma ideal do controlador é dada por:

$$C_{pr}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \tag{2.8}$$

Essa estrutura apresenta ganho teórico tendendo ao infinito na frequência de ressonância ω_0, permitindo rastreamento senoidal com erro nulo em regime permanente. Em implementações práticas, introduz-se amortecimento nos polos ressonantes, ampliando a largura de banda ao redor da frequência fundamental e aumentando a robustez frente a variações de frequência e efeitos de discretização digital (JACOBINA et al., 2001).

2.6 Revisão Bibliográfica

A integração de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica por meio de conversores multiníveis do CHB tem sido amplamente investigada na literatura recente, principalmente devido à sua elevada modularidade e capacidade de operação com múltiplos níveis de tensão (KOURO et al., 2015; ZHANG et al., 2018). Essa característica permite o aproveitamento individual de arranjos fotovoltaicos, viabilizando estratégias MPPT por célula. No entanto, quando conectada diretamente à rede, essa estrutura apresenta limitações significativas sob condições de geração assimétrica, como em cenários de sombreamento parcial, resultando em desequilíbrios de corrente e degradação da qualidade de energia (SEPASI; TALICHET; PRAMANIK, 2023; MARTHI et al., 2024).

Com o objetivo de mitigar esses problemas, diversos trabalhos têm explorado o uso do conversor em cascata como filtro ativo de potência, permitindo a integração entre geração e compensação de distúrbios (LIU et al., 2023). Nessa abordagem, o conversor passa a desempenhar simultaneamente a função de interface de geração e de filtro ativo em derivação, sendo capaz de mitigar correntes harmônicas e fornecer potência reativa à rede. Estratégias baseadas na decomposição de potência, como a teoria p–q e a teoria de potência não ativa generalizada, permitem a obtenção de referências de corrente que garantem a operação com fator de potência próximo da unidade, mesmo na presença de cargas não lineares e condições de rede não ideais (DASH; SADHU, 2023).

Apesar desses avanços, tais abordagens concentram-se predominantemente na compensação de corrente, atuando essencialmente como filtros ativos em derivação. Dessa forma, permanecem limitadas quanto à mitigação de distúrbios de tensão provenientes da rede, como afundamentos e elevações, bem como à melhoria da capacidade de geração de tensão do sistema fotovoltaico em condições adversas (ATHTHANAYAKE et al., 2020). Adicionalmente, sob desequilíbrios severos, essas estratégias podem não ser suficientes para garantir a operação estável do sistema.

Outras soluções têm sido propostas para lidar com tais limitações, incluindo a injeção de componentes de sequência zero (WANG et al., 2016; XUE; HE, 2022), o uso de sistemas de armazenamento de energia (NAYAK et al., 2020) e a inserção de estágios adicionais de conversão CC-CC, permitindo o desacoplamento das dinâmicas do sistema (JODDUMAHANTHI et al., 2025). Embora eficazes em determinados cenários, essas

abordagens implicam aumento de complexidade, custo e dependência de estágios adicionais de processamento de energia.

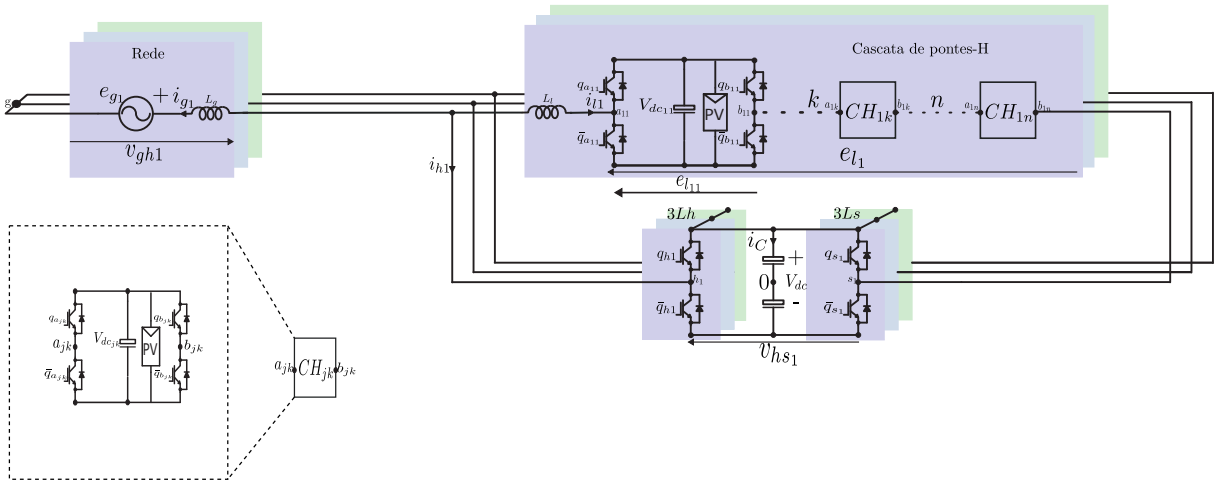
3 METODOLOGIA

Neste capítulo, detalha-se a topologia proposta e a sua respectiva modelagem matemática no domínio do tempo, visando à caracterização dinâmica do sistema. Em seguida, as estratégias de modulação e as malhas de controle desenvolvidas são apresentadas e discutidas de forma integrada, estabelecendo as bases para a análise do comportamento do conversor sob os diferentes cenários de operação considerados.

3.1 Modelagem do Sistema

A topologia investigada consiste em um conversor de seis braços, denominado 2x3L, que atua como interface entre arranjos fotovoltaicos baseados em CHB e a rede elétrica. Esta estrutura é composta por dois conversores de três braços: um conversor em derivação (*shunt*) ($3L_h$), conectado à rede, e um conversor série ($3L_s$), conectado ao lado da geração, os quais compartilham um único barramento CC. O sistema caracteriza-se por uma configuração *open-end* entre os lados série e em derivação, local onde as células CHB são inseridas para o processamento da energia proveniente dos painéis fotovoltaicos.

Figura 6 – Topologia do conversor 2x3L.



Fonte: Próprio autor.

Para a caracterização matemática do sistema, as equações são derivadas a partir da aplicação das Leis de Kirchhoff às malhas do circuito. Define-se o índice $j \in \{1, 2, 3\}$ para identificar as fases do sistema e o índice $k \in \{1, \ldots, N\}$ para referenciar as respectivas células CHB em cada fase, onde N é o número de células por fase. As tensões da rede elétrica (e_{g_j}) e as tensões sintetizadas pelo conversor no lado da geração (v_{hs_j}) são modeladas pelas equações (3.1) e (3.2):

$$e_{g_j} = v_{gh_j} + R_g i_{g_j} + L_g \frac{di_{g_j}}{dt} \tag{3.1}$$

$$v_{hs_j} = R_l i_{l_j} + L_l \frac{di_{l_j}}{dt} + \sum_{k=1}^{N} e_{l_{jk}} \tag{3.2}$$

Onde L_g e L_l representam as indutâncias do lado da rede e do lado da geração, respectivamente, enquanto R_g e R_l são as resistências parasitas associadas a esses elementos indutivos. A variável v_{gh_j} denota a tensão gerada pelo conversor no lado da rede, $e_{l_{jk}}$ representa a tensão individual sintetizada por cada célula CHB da cascata e as variáveis i_{g_j} e i_{l_j} referem-se às correntes que circulam no lado da rede e no lado da geração, respectivamente.

As tensões geradas pelo sistema podem ser decompostas em termos das tensões de polo do conversor, considerando v_{g0} como a tensão de modo comum estabelecida entre o neutro da rede e o ponto de referência do barramento CC. As relações espaciais entre as tensões geradas e as tensões de polo são estabelecidas pelas equações (3.3), (3.4) e (3.5):

$$v_{gh_j} = v_{h_{j0}} + v_{g0} \tag{3.3}$$

$$v_{hs_j} = v_{h_{j0}} - v_{s_{j0}} \tag{3.4}$$

$$e_{l_{jk}} = v_{a_{j0k}} - v_{b_{j0k}} \tag{3.5}$$

A síntese dessas tensões ocorre por meio da comutação das chaves de potência, cujos estados de operação são representados pelas variáveis binárias de chaveamento q. As tensões de polo para os conversores em derivação e série, bem como para as pernas individuais de cada célula CHB, são definidas em função da tensão do barramento CC (V_{dc} para o 2x3L ou $V_{dc_{jk}}$ para cada célula CHB) e dos respectivos estados de chaveamento, conforme descrito em (3.6) e (3.7):

$$v_{c_{j0}} = \frac{V_{dc}}{2}(2q_{cj} - 1) \tag{3.6}$$

$$v_{f_{jk}} = \frac{V_{dc_{jk}}}{2}(2q_{f_{jk}} - 1) \tag{3.7}$$

Onde os índices $c \in \{h, s\}$ e $f \in \{a, b\}$ identificam, respectivamente, os conversores em derivação e série e os braços de cada célula CHB. Finalmente, a tensão de modo comum do sistema, que reflete o acoplamento entre as fases e o barramento, é calculada a partir

da média aritmética das tensões de polo do lado em derivação do conversor, conforme a expressão (3.8):

$$v_{g0} = \frac{1}{3}(v_{h_{10}} + v_{h_{20}} + v_{h_{30}}) \tag{3.8}$$

3.2 Estratégia de Modulação

3.2.1 Conversor 2x3L

A topologia do conversor 2x3L consiste na integração de um conversor em derivação e um conversor série que compartilham um único barramento CC. Por apresentar pernas compartilhadas entre o lado da rede elétrica e o lado da geração, as tensões sintetizadas em ambos os lados em uma mesma fase tornam-se interdependentes. Para contornar e viabilizar a modulação independente, emprega-se uma técnica de injeção de tensão de modo comum (v^*_{g0}). A partir de (3.3) e (3.4), as relações para as tensões de polo de referência do conversor em derivação ($v^*_{h_{j0}}$) e do conversor série ($v^*_{s_{j0}}$) podem ser definidas como:

$$v^*_{h_{j0}} = v^*_{gh_j} + v^*_{g0} \tag{3.9}$$

$$v^*_{s_{j0}} = v^*_{h_{j0}} - v^*_{hs_j} \tag{3.10}$$

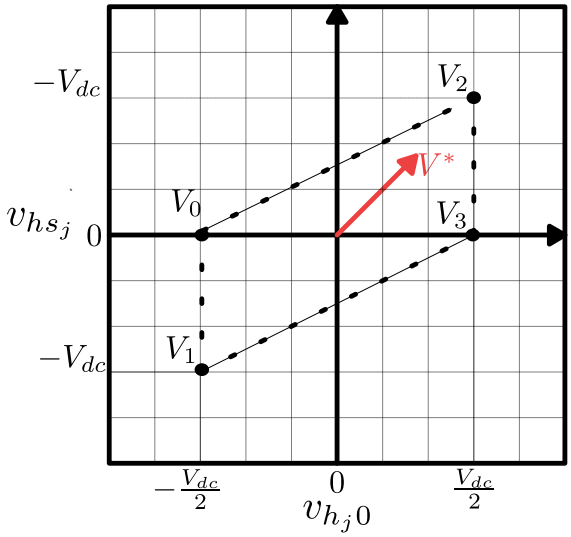
onde $v^*_{gh_j}$ e $v^*_{hs_j}$ são as tensões de referência geradas pela malha de controle para os lados da rede e da geração, respectivamente.

Para realizar a injeção da tensão de modo comum, é fundamental analisar o espaço de tensões que o conversor 2x3L é capaz de sintetizar em uma dada fase j. O arranjo de cada fase envolve a operação de duas pernas independentes. Como ambas estão conectadas ao mesmo barramento V_{dc}, existem quatro estados lógicos possíveis de chaveamento para cada fase, representados pelo par (q_{h_j}, q_{s_j}). Ao aplicar esses estados nas equações fundamentais do conversor, obtêm-se quatro vetores de estado base no plano bidimensional.

A conexão das coordenadas desses quatro vetores de estado $(v_{h_{j0}}, v_{hs_j})$ no plano cartesiano forma um paralelogramo de tensões. A área interna deste paralelogramo define a zona de operação linear estrita do conversor 2x3L. Para que a modulação PWM ocorra sem sobremodulação, a injeção da tensão homopolar deve ser feita de forma que o vetor de referência exigido pelas malhas de controle, definido por $V^*_x = (v^*_{h_{j0}}, v^*_{hs_j})$ com $x = \{0,1,2,3\}$, permaneça contido dentro do paralelogramo a cada instante de tempo.

Então, para calcular v^*_{g0} respeitando as condições impostas, deve-se calcular o máximo e mínimo valor possível deste. Assim, tomando como base que as tensões de polo

Figura 7 – Plano vetorial das tensões do conversor 2x3L.



Fonte: Próprio autor.

respeitam a inequação $-V_{dc}/2 \leq v^*_{c_{j0}} \leq V_{dc}/2$ e as equações 3.9 e 3.10, é possível calcular os limites máximos ($v^*_{g0_{Mj}}$) e mínimos ($v^*_{g0_{mj}}$) locais através de:

$$v^*_{g0_{Mj}} = \begin{cases} 0{,}5V_{dc} - v^*_{gh_j}, & \text{para } v^*_{hs_j} \geq 0 \\ v^*_{hs_j} + 0{,}5V_{dc} - v^*_{gh_j}, & \text{para } v^*_{hs_j} < 0 \end{cases} \tag{3.11}$$

$$v^*_{g0_{mj}} = \begin{cases} -0{,}5V_{dc} - v^*_{gh_j}, & \text{para } v^*_{hs_j} \leq 0 \\ v^*_{hs_j} - 0{,}5V_{dc} - v^*_{gh_j}, & \text{para } v^*_{hs_j} > 0 \end{cases} \tag{3.12}$$

Para que o sinal injetado preserve a integridade da modulação em todo o sistema trifásico simultaneamente, determina-se um limite global. Esse limite é definido pelo mínimo dos máximos ($v^*_{g0_{max}}$) e o máximo dos mínimos ($v^*_{g0_{min}}$). A tensão de modo comum final a ser injetada no conversor é então determinada por meio de um fator de ponderação μ entre 0 e 1, tal que:

$$v^*_{g0} = \mu v^*_{g0_{max}} + (1-\mu) v^*_{g0_{min}} \tag{3.13}$$

3.2.2 Pontes-H em Cascata

Um esquema de modulação por largura de pulso com portadoras defasadas é implementado para as pontes-H. Neste método, o sistema de controle gera uma tensão de referência individual, $e^*_{l_{jk}}$, para cada ponte. A partir desta, as tensões de polo de referência são definidas como:

$$v^*_{a_{j0k}} = \frac{e^*_{l_{jk}}}{2} \tag{3.14}$$

$$v^*_{b_{j0k}} = -\frac{e^*_{l_{jk}}}{2} \tag{3.15}$$

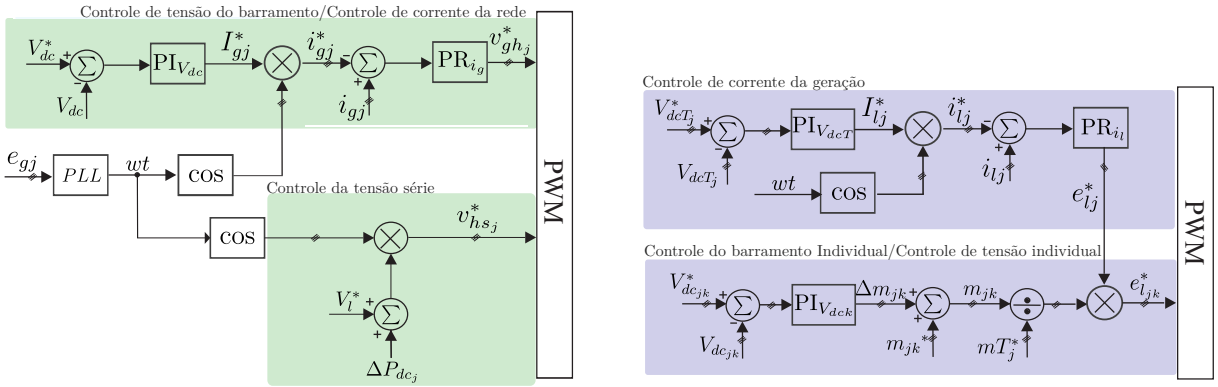
Subsequentemente, a tensão de referência de cada perna é comparada com uma onda portadora triangular de alta frequência correspondente. O deslocamento de fase, ϕ_k, de cada portadora é determinado pelo índice da ponte k da seguinte forma:

$$\phi_k = (k-1)\frac{\pi}{N} \tag{3.16}$$

3.3 Projeto dos Controladores

O sistema de controle proposto na Figura 8 divide-se em duas grandes estruturas de atuação: a regulação do conversor principal 2x3L, responsável pela interface com a rede elétrica e pela manutenção do barramento CC comum, e a gestão hierárquica das CHB, responsável pela extração de potência e pelo balanço de tensão das células.

Figura 8 – Diagrama de controle geral do sistema.



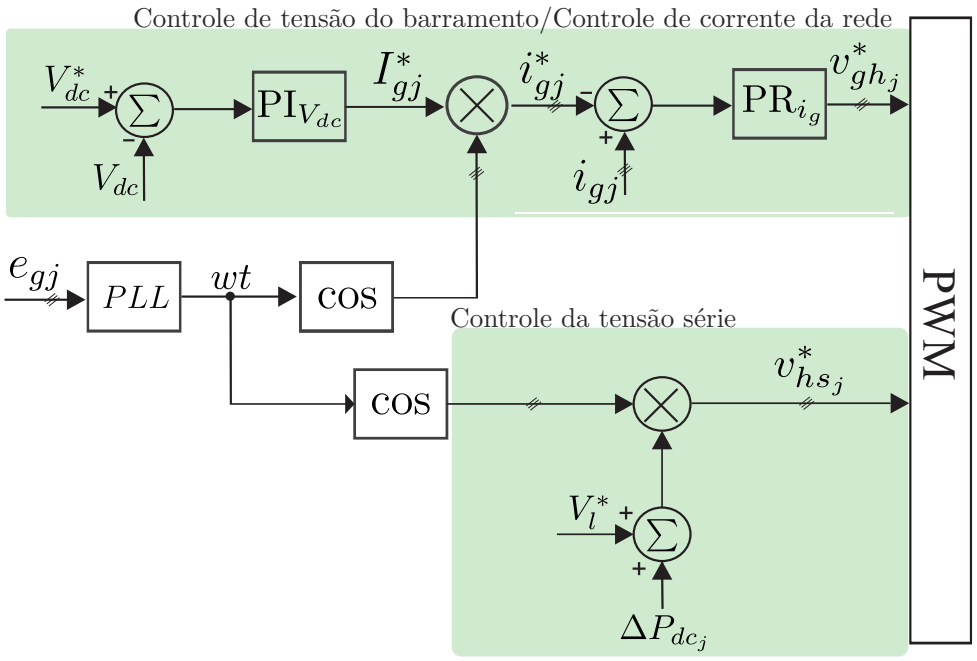
Fonte: Próprio autor.

3.3.1 Controle do Conversor 2x3L

A estrutura de controle do conversor 2x3L é composta por três ações fundamentais: o sincronismo com a rede elétrica, o controle da tensão do barramento CC compartilhado e a regulação da corrente injetada.

Inicialmente, a sincronização com a rede elétrica é realizada por meio de uma malha de captura de fase monofásica (PLL) conforme (FILHO et al., 2008). O objetivo principal desta malha é processar a tensão medida da rede (e_{g_j}) para estimar de forma contínua o

Figura 9 – Diagrama de controle do conversor 2x3L.



Fonte: Próprio autor.

ângulo de fase (θ) e a frequência do sistema, assegurando a operação com fator de potência unitário.

Para o controle da tensão do barramento CC emprega-se uma malha externa de tensão, responsável por manter o balanço de energia no capacitor compartilhado do conversor 2x3L. A linearização da equação de balanço de potência em torno da tensão de referência (V_{dc}^*) permite modelar a planta como:

$$G_{pv}(s) = \frac{V_{dc}(s)}{I_g(s)} \approx \frac{3E_g}{2V_{dc}^* C_{eq} s} \tag{3.17}$$

onde E_g é a amplitude da tensão de fase da rede, C_{eq} é a capacitância equivalente total do barramento e $I_g(s)$ é a amplitude da corrente ativa absorvida da rede para compensar as perdas sistêmicas. O controle desta variável é realizado por um controlador PI clássico ($\mathrm{PI}_{V_{dc}}$), o qual processa o erro entre a tensão medida no barramento e o seu respectivo valor de referência. A largura de banda desta malha é projetada para ser sensivelmente inferior à da malha de corrente, garantindo o desacoplamento dinâmico entre as variáveis e a atenuação de distúrbios de carga.

Internamente, a malha de corrente possui a dinâmica mais rápida do sistema e impõe as correntes de referência na rede elétrica através do filtro indutivo L_g. A planta do sistema é modelada no domínio da frequência complexa s por:

$$G_{pi}(s) = \frac{I_g(s)}{V_{conv}(s)} = \frac{1}{sL_g + R_g} \tag{3.18}$$

Para assegurar o rastreamento de referências senoidais com erro nulo em regime

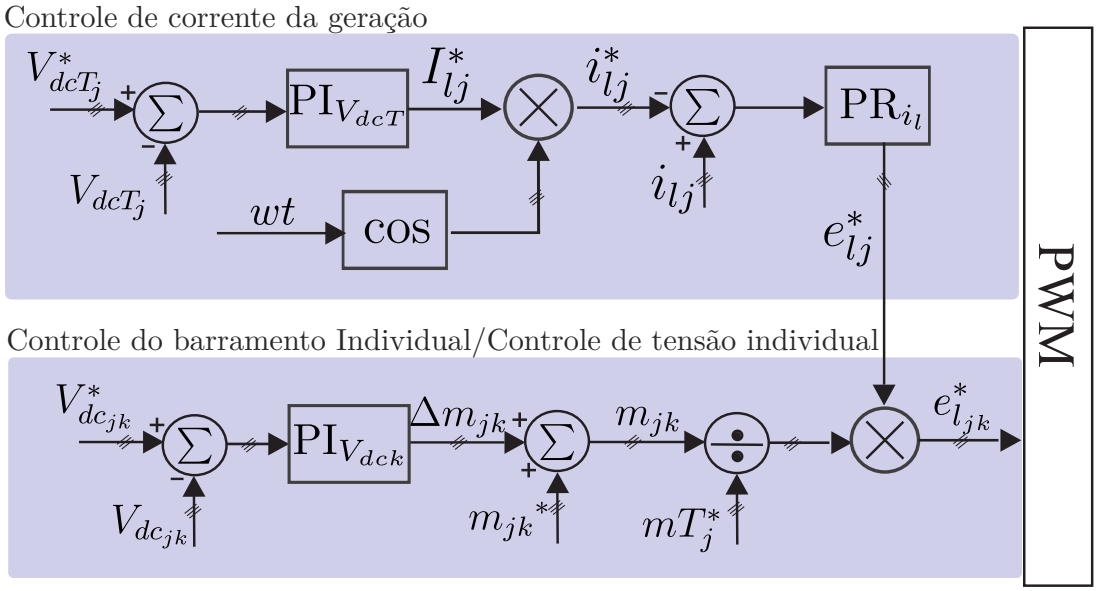
permanente, utiliza-se um controlador proporcional-ressonante (PR_{i_g}) detalhado em (JACOBINA et al., 2001). Este controlador atua processando o erro entre as correntes de referência da rede e as correntes efetivamente medidas.

Por fim, as tensões de referência do conversor série ($v^*_{hs_j}$) são estabelecidas com base em uma amplitude de tensão desejada para o lado da cascata CHB (V_l^*). Esta amplitude é escalonada dinamicamente por um termo (ΔP_{dc_j}), o qual indica o desequilíbrio de potência entre os painéis solares da respectiva fase. Esse mecanismo de ajuste dinâmico permite que o estágio série do conversor 2x3L gerencie de forma adequada a injeção de potência proveniente do estágio CHB, compensando a variabilidade da geração fotovoltaica e assegurando a manutenção do controle de corrente sem saturar os moduladores.

3.3.2 Controle das Pontes-H em Cascata

A estratégia de controle para a CHB, ilustrada na Figura 10, está organizada em uma estrutura hierárquica. Para garantir a extração adequada de potência e a estabilidade dos módulos, essa abordagem é dividida em duas frentes: o controle global da fase e o controle individual das células CHB.

Figura 10 – Diagrama de controle da cascata CHB.



Fonte: Próprio autor.

3.3.2.1 Controle Global

A malha de geração utiliza princípios semelhantes aos descritos para o lado da rede. No nível hierárquico superior, a amplitude da corrente de referência para cada fase da CHB é estabelecida por uma malha externa de tensão. Esta malha emprega um controlador PI ($\mathrm{PI}_{V_{dcT}}$) para processar o erro entre a tensão total medida no barramento CC da fase

(V_{dcT_j}) e o seu respectivo valor de referência, garantindo o balanço global de potência ativa. Essa amplitude é então sincronizada com a rede elétrica a partir do ângulo θ obtido pela PLL, assegurando a operação com fator de potência unitário. A corrente resultante serve de referência para a malha interna, onde um PR (PR_{I_l}) atua sobre o erro da corrente de geração para ditar a tensão total exigida da cascata (e^*_{lj}).

3.3.2.2 Controle Individual

Adicionalmente ao controle global da fase, uma funcionalidade crítica do sistema é o balanço individual de tensão de cada ponte-H, essencial para lidar com condições assimétricas como o sombreamento. O índice de modulação de amplitude de cada célula é inicialmente estimado por um termo de *feedforward* (m_{jk}), o qual define o esforço de tensão da célula com base na sua contribuição proporcional de potência para a fase, calculado em (3.19):

$$m_{jk} = \frac{V_l^*}{V_{dcT_j}} \frac{i_{dc_{jk}}}{i_{dcT_j}} \tag{3.19}$$

onde V_l^* é a amplitude da tensão de referência da fase, V_{dcT_j} é a tensão total do barramento CC da fase j, $i_{dc_{jk}}$ é a corrente gerada pela célula individual e i_{dcT_j} é a corrente contínua total nos barramentos da fase.

Para corrigir desvios dinâmicos e garantir que a tensão de cada capacitor rastreie a referência estipulada pelo algoritmo, um controlador PI dedicado ($\text{PI}_{V_{dck}}$) processa o erro da tensão individual da célula ($V_{dc_{jk}}$) em relação ao seu valor de referência ($V^*_{dc_{jk}}$) definido como:

$$V^*_{dc_{jk}} = V_{dc_{hb}} N \frac{i_{dc_{jk}}}{i_{dcT_j}} \tag{3.20}$$

gerando uma componente de ajuste (Δm_{jk}). Por fim, a tensão de referência total exigida pela malha de corrente (e^*_{lj}) é distribuída entre as células através da equação de normalização (3.21). Este processo garante que cada ponte-H sintetize uma parcela da tensão estritamente proporcional à sua capacidade atualizada de geração, assegurando o balanço individual de potência:

$$e^*_{l_{jk}} = \frac{m_{jk} + \Delta m_{jk}}{\sum_{x=1}^{N} (m_{jx} + \Delta m_{jx})} e^*_{lj} \tag{3.21}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a validação do sistema proposto por meio de análises quantitativas e qualitativas. O objetivo é demonstrar a eficácia da topologia do conversor 2x3L integrada ao CHB, bem como o desempenho das estratégias de modulação e controle desenvolvidas. A avaliação fundamenta-se em uma abordagem comparativa, utilizando simulações computacionais e ensaios experimentais em protótipo de bancada, permitindo confrontar o comportamento teórico com a operação em condições reais. Todos os testes seguem os parâmetros de projeto consolidados na tabela de parâmetros do sistema.

4.1 Resultados de Simulação

As simulações apresentadas a seguir foram conduzidas no software PSIM. Os parâmetros utilizados estão dispostos na Tabela 1 e os ganhos dos controladores na Tabela 2. Para a simulação do painel fotovoltaico foi utilizada uma fonte de corrente contínua.

Os resultados contemplam as formas de onda do sistema operando em condições nominais e sob condições desbalanceadas. Ressalta-se que, daqui em diante, o símbolo de barra sobre a variável (ex: $\bar{x}$) representa o valor médio da respectiva grandeza.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados

Parâmetro	Especificação
Tensão da rede (e_g)	$110\,\mathrm{V_{RMS}}$
Tensão de referência da geração (e_l^*)	$220\,\mathrm{V_{RMS}}$
Tensão de referência do barramento CC do 2x3L (V_{dc}^*)	$320\,\mathrm{V}$
Tensão de referência do barramento CC das pontes H ($V_{dc_{j,k}}^*$)	$120\,\mathrm{V}$
Potência do painel FV	$600\,\mathrm{W}$
Número de células (N)	3
Indutância do lado da rede (L_g)	$5\,\mathrm{mH}$
Indutância do lado da geração (L_l)	$5\,\mathrm{mH}$
Resistência da rede (R_g)	$0{,}1\,\Omega$
Resistência da geração (R_l)	$0{,}1\,\Omega$
Capacitância do barramento CC do 2x3L	$2{,}2\,\mu\mathrm{F}$
Capacitâncias dos barramentos CC das pontes H	$4{,}4\,\mu\mathrm{F}$
Frequência de chaveamento (f_S)	$10\,\mathrm{kHz}$

Fonte: Próprio autor.

4.1.1 Operação em Regime Permanente

A Figura 11 apresenta a tensão da fase 1 da rede (e_{g_1}) em conjunto com as correntes das três fases (i_{g_j}). Observa-se que, devido à atuação da PLL, as correntes permanecem

Tabela 2 – Ganhos proporcionais e integrais utilizados para os controladores do sistema.

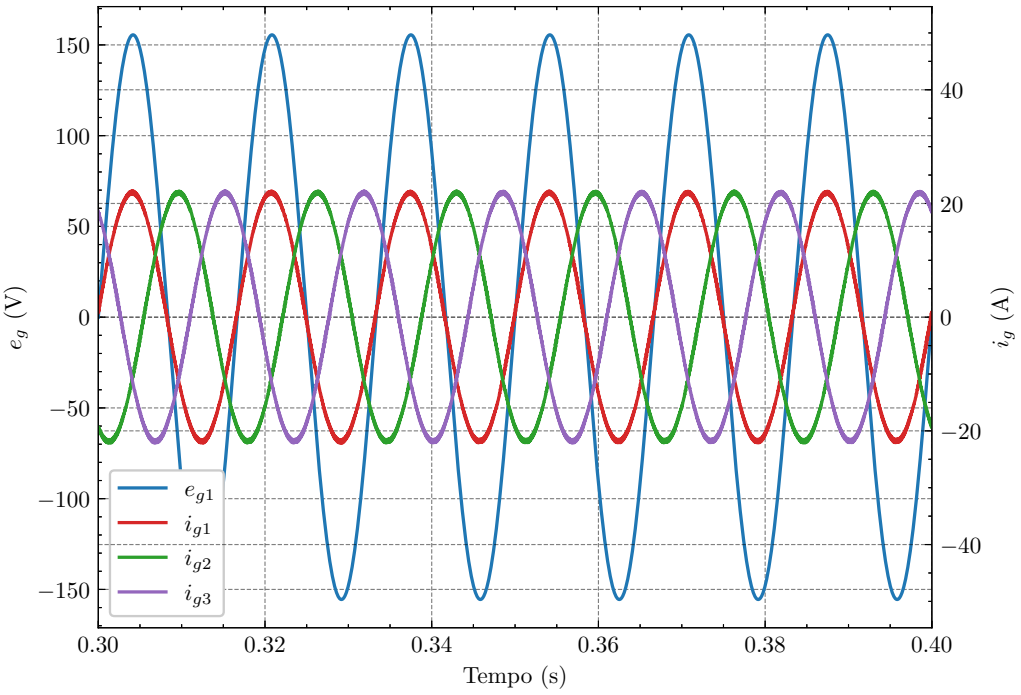
Ganhos	PLL	$\mathrm{PI}_{\mathrm{V_{dc}}}$	$\mathrm{PR}_{\mathrm{I_g}}$	$\mathrm{PI}_{\mathrm{V_{dcT_j}}}$	$\mathrm{PR}_{\mathrm{I_{lj}}}$	$\mathrm{PI}_{\mathrm{V_{dc_{jk}}}}$
K_p	0,25	0,2	10	1,47	19	0,00533
K_i	2,5	15	1000	14,7	9500	0,0533

Fonte: Próprio autor.

senoidais e em fase com suas respectivas tensões, caracterizando fator de potência unitário e correto sincronismo com a rede. Além disso, a corrente da fase 1 apresenta baixa distorção harmônica, com THD de 1,18%.

A Figura 12 mostra as correntes no lado da geração (i_l). Nota-se que o controlador PR garante o rastreamento adequado da referência, resultando em formas de onda senoidais. Para esse cenário, a corrente da fase 1 apresenta THD de 2,28%.

Figura 11 – Tensão da rede (e_g) e correntes (i_g) em regime permanente.

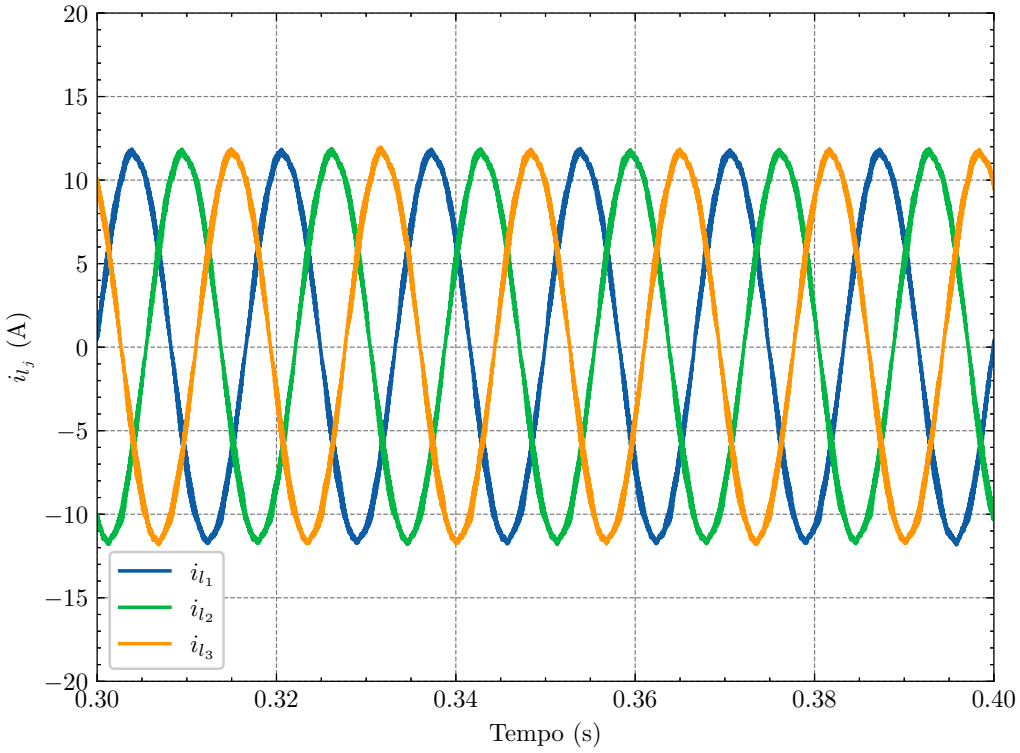


Fonte: Próprio autor.

As tensões dos barramentos CC são apresentadas na Figura 13. Verifica-se que tanto o barramento do conversor 2x3L quanto os das células de ponte-H permanecem regulados em seus valores de referência, evidenciando o adequado funcionamento da malha de controle de tensão. As tensões das células apresentam pequenas oscilações em regime permanente, da ordem de 0,75%.

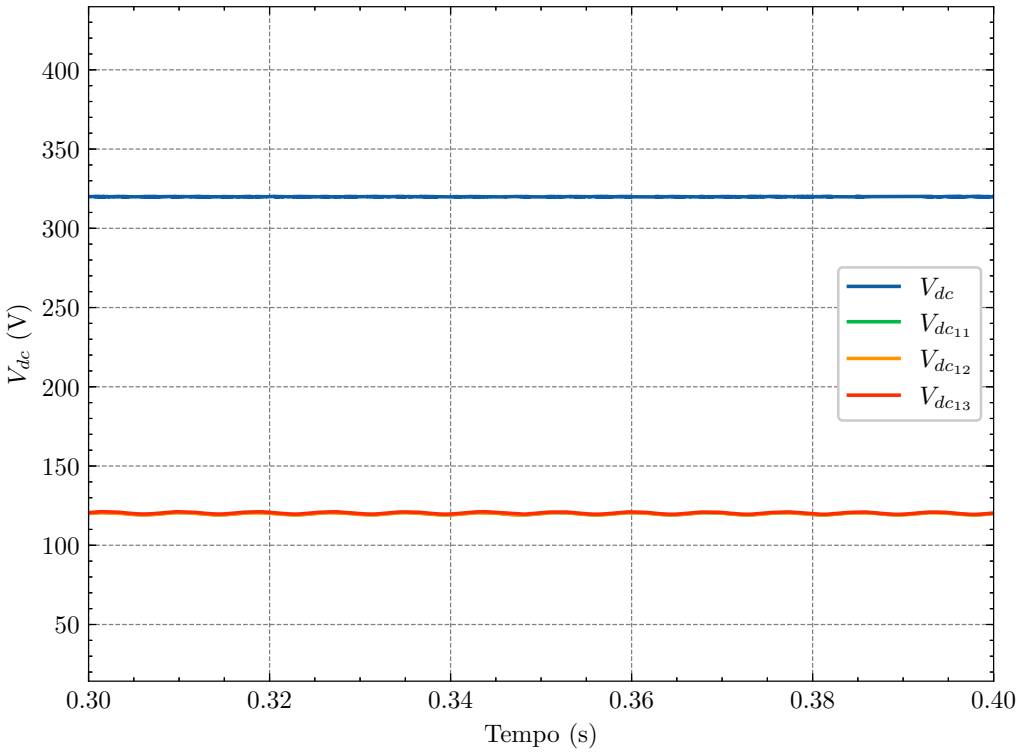
No que se refere às tensões sintetizadas pelo conversor, a Figura 14 apresenta a tensão no v_{gh_1} e os valores médios das tensões v_{gh_j}, a Figura 15 a tensão no lado da geração (v_{hs}), e a Figura 16 a tensão multinível gerada pela cascata CHB (e_{l1}). Observa-se que as

Figura 12 – Corrente no lado da geração (i_l).



Fonte: Próprio autor.

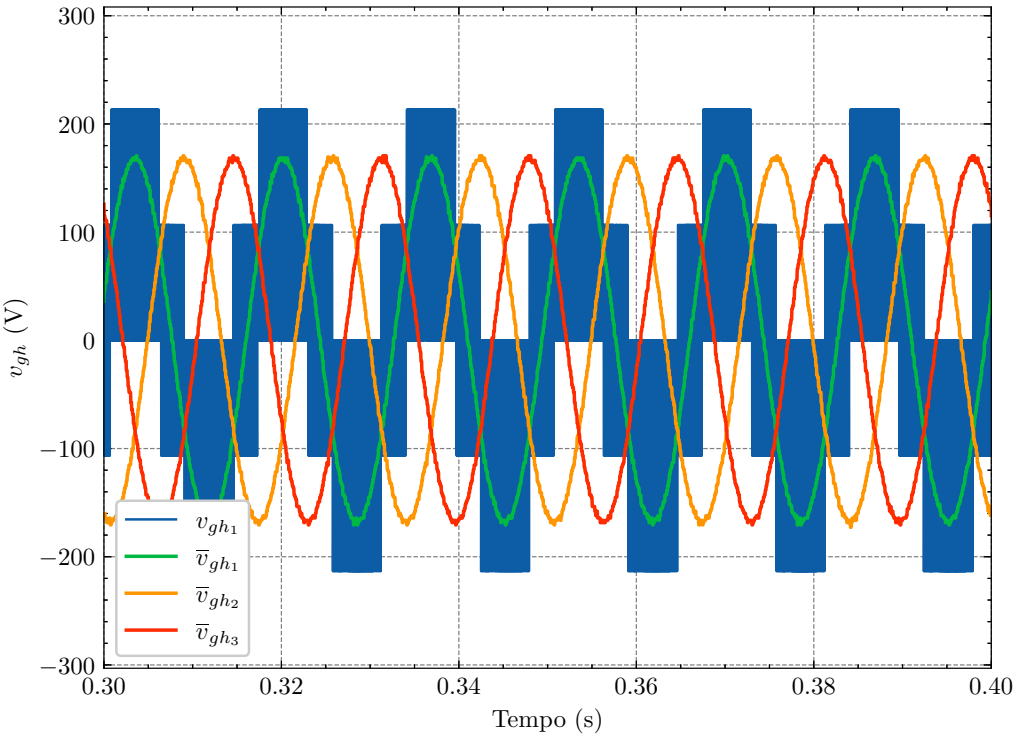
Figura 13 – Tensões dos barramentos da fase 1 (V_{dc} e V_{dc_1k}).



Fonte: Próprio autor.

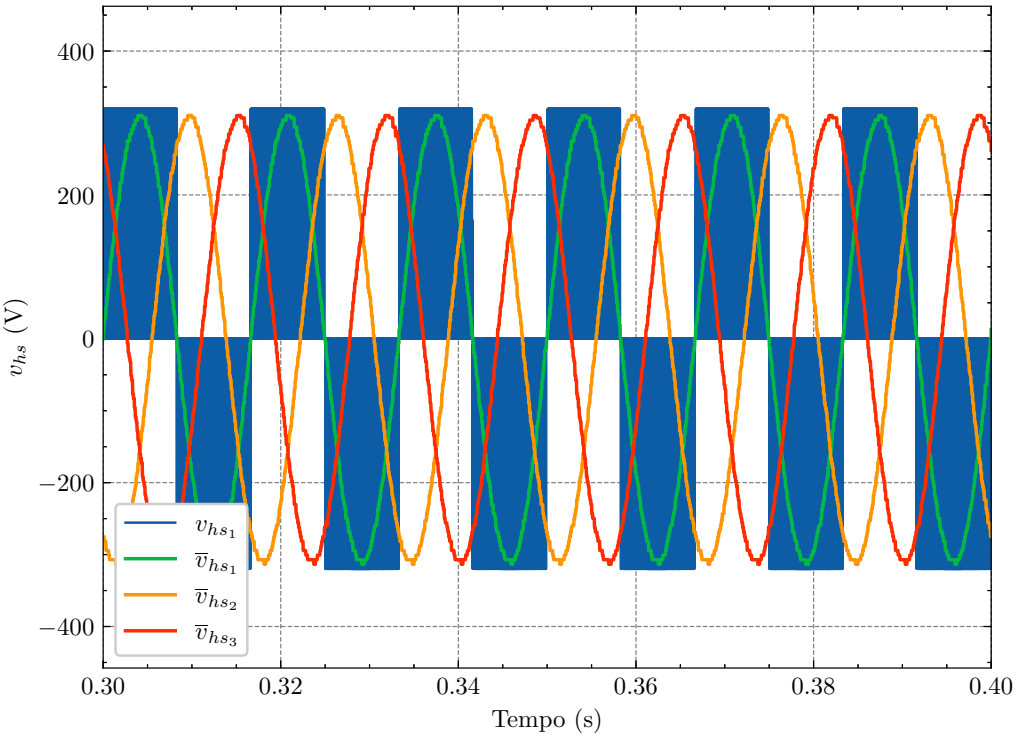
tensões são devidamente moduladas, com o conversor série operando em três níveis e a cascata CHB produzindo sete níveis bem definidos, decorrentes da operação equilibrada das três células.

Figura 14 – Tensões do conversor no lado da rede (v_{gh}) e seu valor médio.



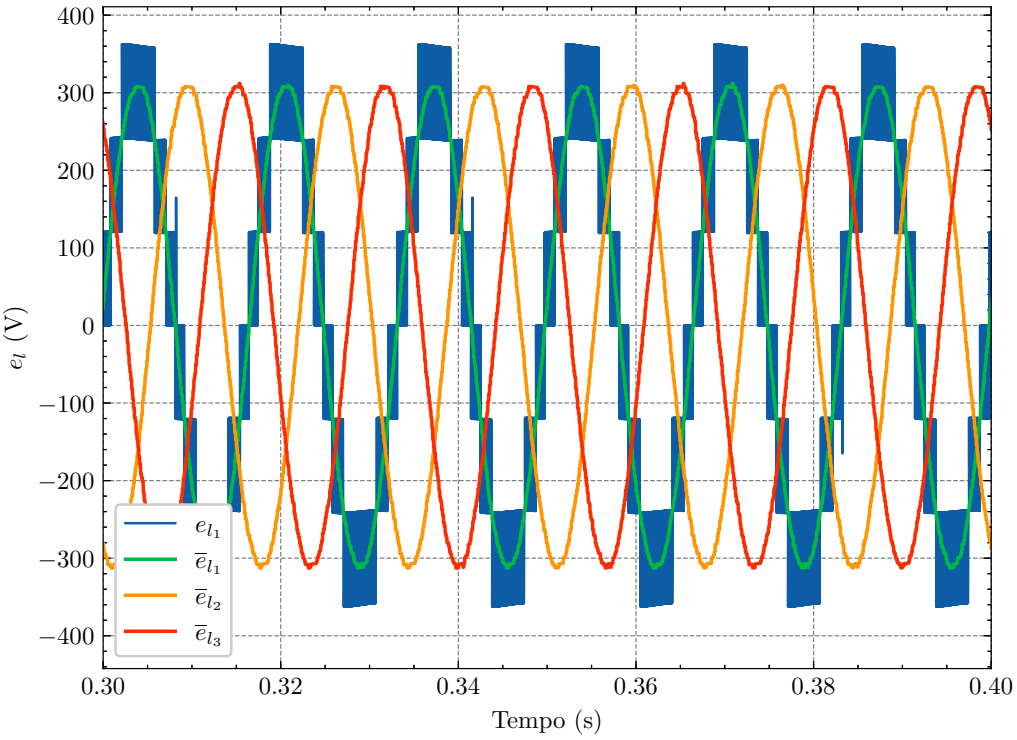
Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Tensões no lado da geração (v_{hs}) e seu valor médio.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Tensão resultante da cascata (e_{l1}) e seu valor médio.

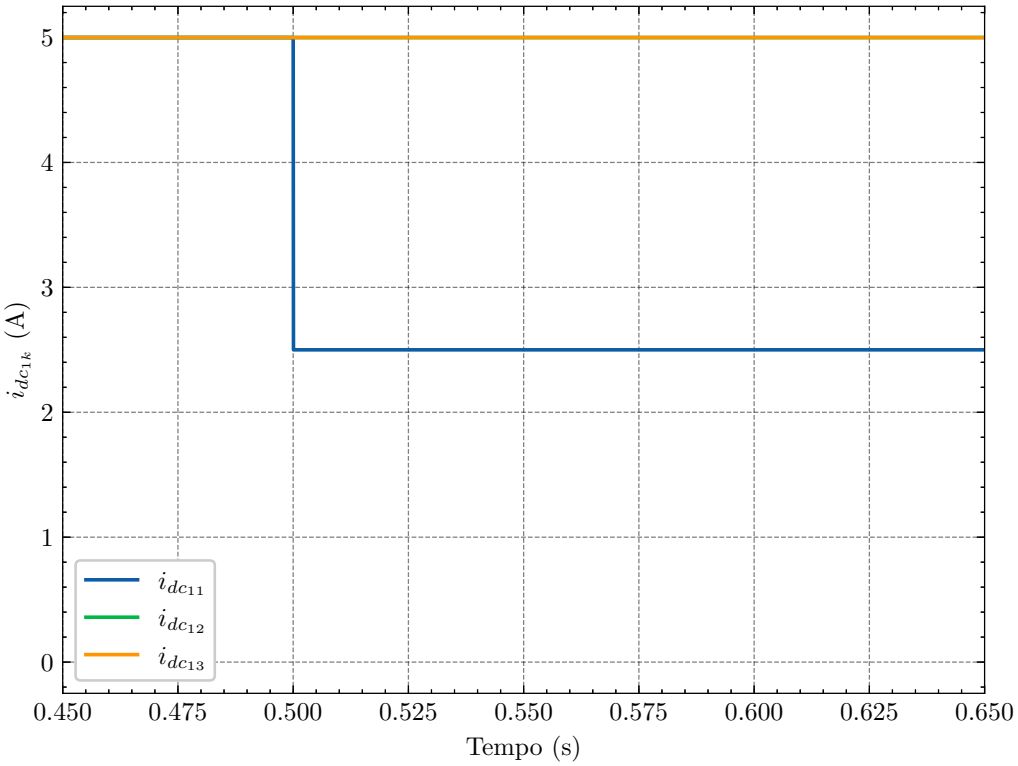


Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Operação sob Sombreamento Parcial

A Figura 17 detalha o comportamento das correntes fornecidas pelo arranjo fotovoltaico na fase 1 ($i_{dc_{1k}}$). Em $t = 0.5$ s observa-se a redução instantânea de $i_{dc_{11}}$ de 5 A para 2.5 A, representando uma queda de 50% na geração, enquanto as demais células mantêm a operação em condições nominais.

Figura 17 – Correntes contínuas das células da fase 1 ($i_{dc_{1k}}$) durante o evento de sombreamento.

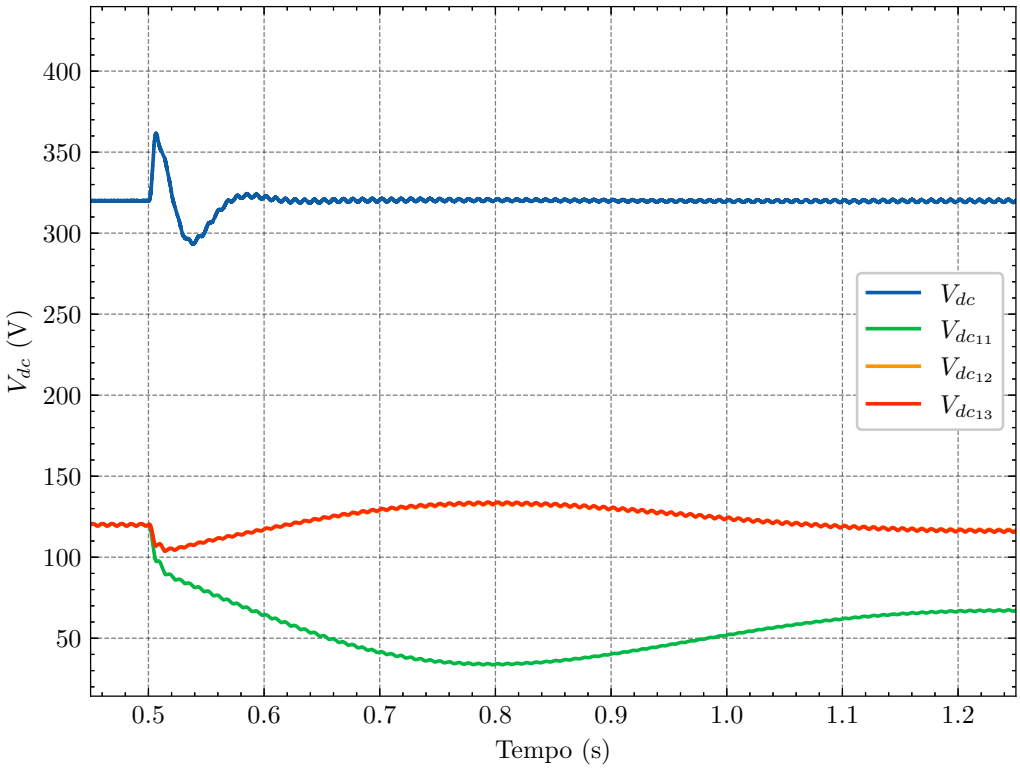


Fonte: Próprio autor.

A resposta das tensões dos barramentos da fase 1 é apresentada na Figura 18. No instante do distúrbio, a redução da potência fotovoltaica disponível provoca o início da descarga do barramento $V_{dc_{11}}$, que segue uma nova referência gerada proporcionalmente à queda sofrida. Os barramentos das células não afetadas, $V_{dc_{12}}$ e $V_{dc_{13}}$, mantêm-se nos valores anteriores devido à ação da malha de controle do balanço individual, assim como o barramento do 2x3L, mantido pela malha de controle do lado *shunt* do conversor. O controlador PI de balanço individual atua reduzindo o índice de modulação $m_{a_{11}}$ da respectiva ponte-H através de $\Delta m_{a_{11}}$ para adequar a extração de potência à nova condição de irradiância, enquanto ajusta $m_{a_{12}}$ e $m_{a_{13}}$ para compensar o evento.

A manutenção do controle da corrente no lado da geração (i_l) durante o desbalanceamento é garantida pela ação compensatória da parte série do conversor 2x3L. Como a capacidade de tensão sintetizada da CHB diminui devido ao sombreamento, o controlador PR de corrente exigiria uma tensão total para manter a estabilidade que as pontes-H não conseguem suprir isoladamente com a capacidade de geração atual sem

Figura 18 – Tensões dos barramentos da fase 1 (V_{dc} e V_{dc_1k}) sob sombreamento parcial.



Fonte: Próprio autor.

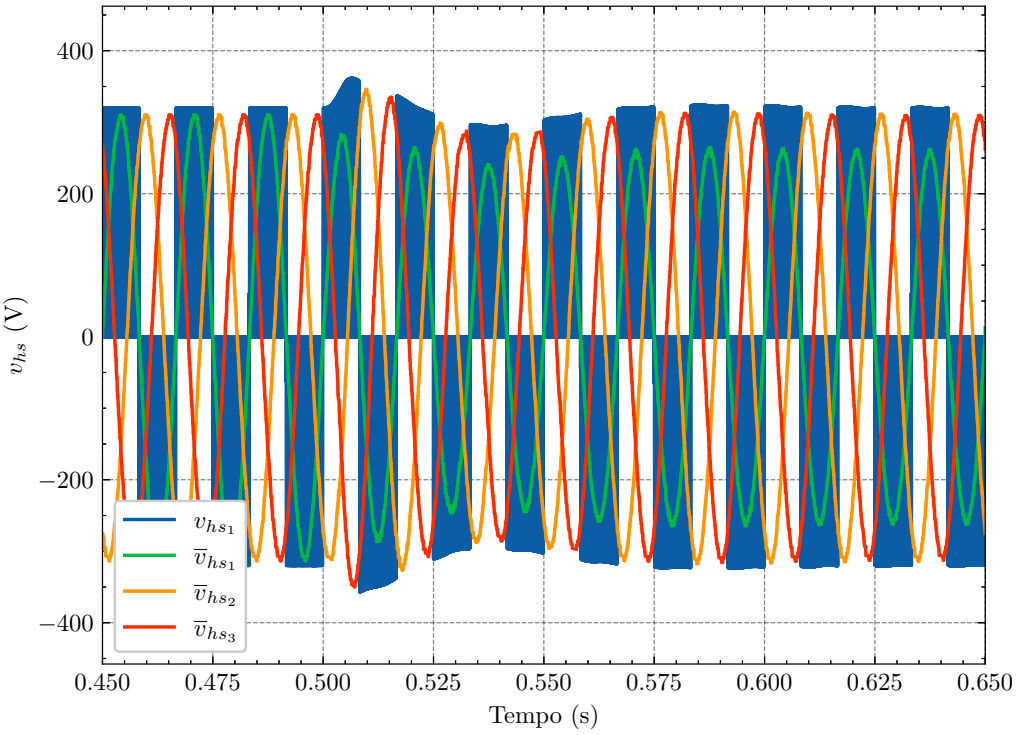
entrar em sobremodulação. Dessa forma, a tensão série v_{hs_j} do conversor 2x3L é ajustada proporcionalmente à queda por ΔP_{dc_j} para concordar com a capacidade de geração, de maneira a permitir a manutenção do controle de corrente sem saturar o modulador.

A Figura 19 mostra as tensões v_{hs_j} e a Figura 20 a corrente i_{l_j}. Percebe-se que, no momento do distúrbio, há a redução da amplitude de v_{hs_1} para um valor condizente com a nova geração, saindo de 220 V_{RMS} para aproximadamente 183 V_{RMS}. Acompanhando a geração reduzida, a corrente i_l tem seu valor ditado pelo controle de corrente da carga e mantém seu comportamento senoidal, apresentando THD = 3,2%.

Esse efeito de compensação também é observado na Figura 21, que evidencia a tensão e_l sintetizada pela cascata CHB durante o evento. Nota-se a redução efetiva na amplitude causada pela diminuição do índice de modulação, ditada pelo controle para responder à queda na geração, de modo coordenado à redução em v_{hs_1}. Ademais, os 7 níveis de tensão continuam sendo gerados, comprovando a robustez e linearidade da modulação.

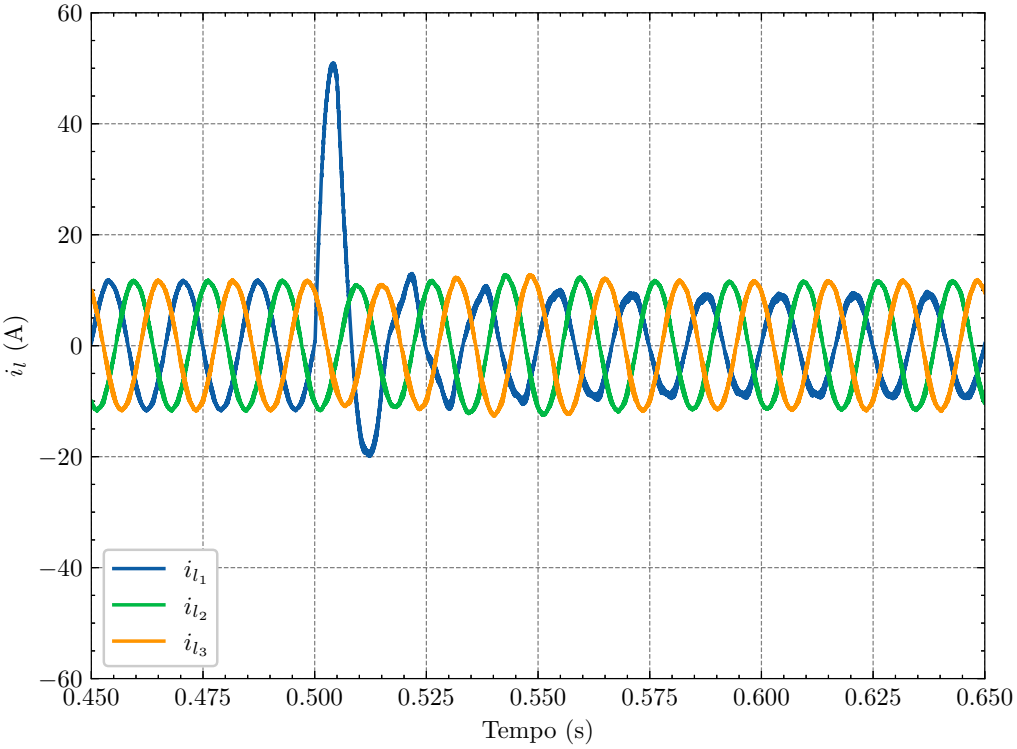
Por fim, as Figuras 22 e 23 mostram a tensão sintetizada pelo conversor do lado da rede (v_{gh_j}), a tensão da rede elétrica e as correntes injetadas. Observa-se a ação da parte *shunt* da topologia isolando a perturbação e mantendo as correntes da rede equilibradas e em fase com a tensão, garantindo o fator de potência unitário. A corrente i_{g_1} injetada no Ponto de Acoplamento Comum (PCC) apresenta elevada qualidade, com uma distorção

Figura 19 – Tensão no lado da geração (v_{hs}) e seu valor médio ($\bar{v}_{hs}$).



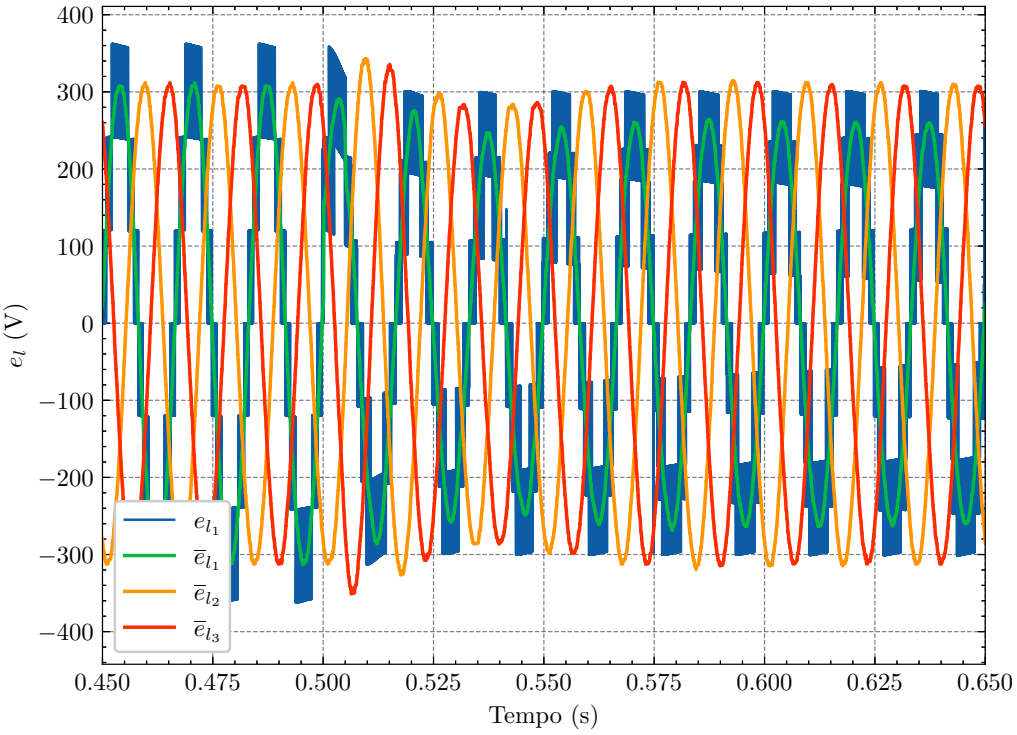
Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Corrente no lado da geração (i_l) sob condição de sombreamento parcial.



Fonte: Próprio autor.

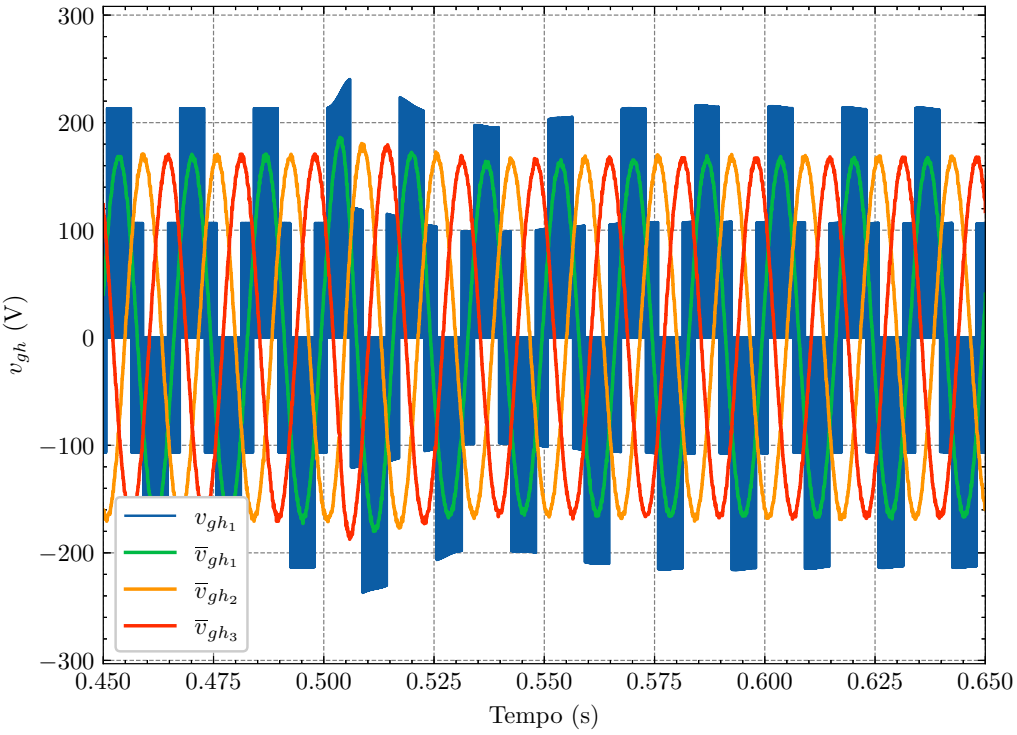
Figura 21 – Tensão de polo da célula (e_{l1}) e seu valor médio ($\bar{e}_{l1}$) sob sombreamento.



Fonte: Próprio autor.

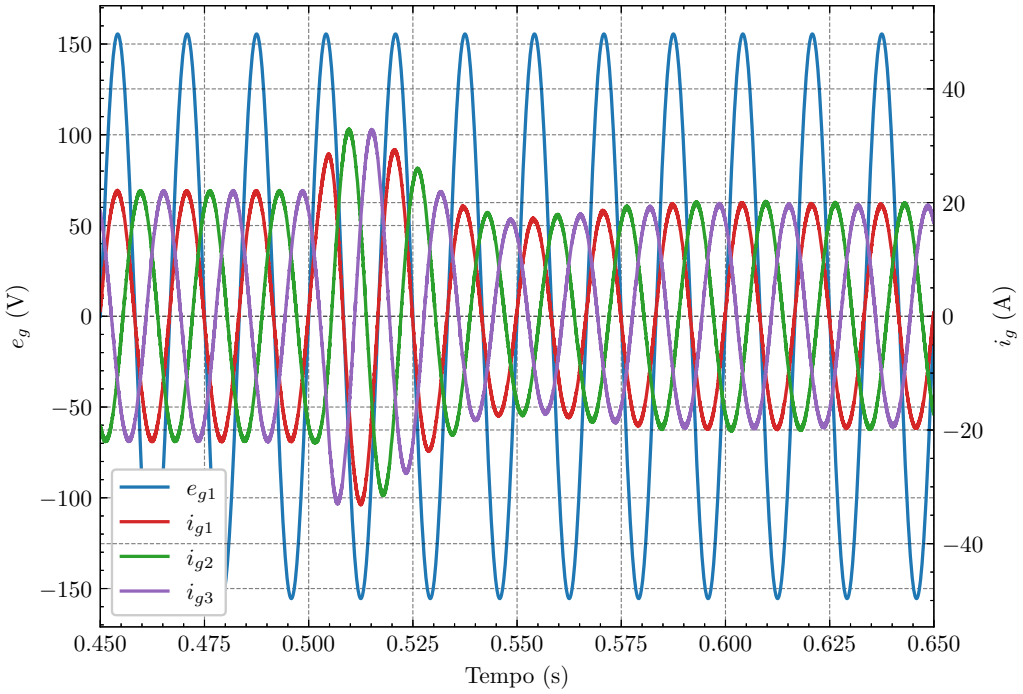
de THD = 1.18%.

Figura 22 – Tensão do conversor no lado da rede (v_{gh}) e seu valor médio ($\bar{v}_{gh}$).



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Tensão da rede elétrica (e_g) e corrente da rede (i_g) durante o transitório de potência.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos utilizando as bancadas do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM). As bancadas utilizam módulos IGBT SKM50GB123D e drivers SKHI23, ambos da SEMIKRON. As estratégias de controle e modulação foram implementadas em um DSP TMS320F28335 da Texas Instruments.

Para a implementação experimental, ressalta-se que, devido a limitações do arranjo disponível, os módulos fotovoltaicos foram emulados por meio de um conversor buck síncrono. Além disso, a malha de controle dos barramentos CC individuais não foi implementada em sua forma proporcional. Dessa forma, diante de variações na geração em uma das células, a tensão do respectivo barramento permanece constante.

Os resultados foram obtidos considerando um cenário de desbalanceamento na geração da fase 1, no qual a corrente $i_{dc_{11}}$ foi reduzida de 4 A para 1 A. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 3.

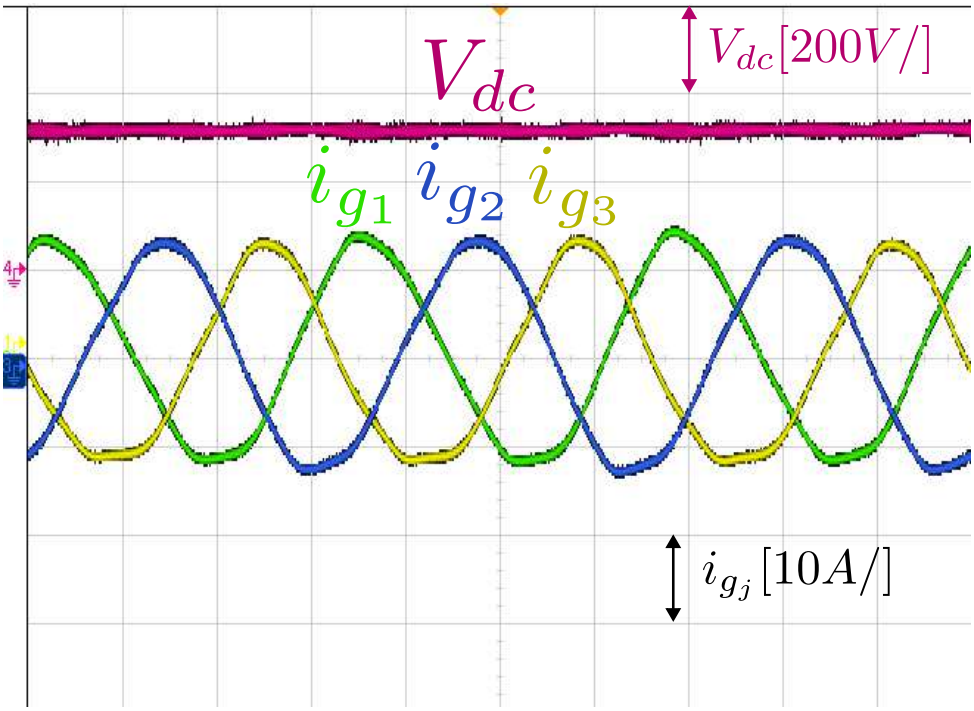
A Fig. 24 mostra a tensão do barramento CC V_{dc} e as correntes da rede i_{g_j} em regime permanente controlado, mesmo sob um cenário de geração desbalanceada. A Fig. 25 evidencia o fator de potência unitário garantido pelo conversor em derivação entrando em cncordância com o que foi exposto nos Resultados de Simulação. Na Fig. 26, são apresentadas as tensões médias $\overline{v}_{gh_2}$ e $\overline{v}_{hs_2}$ juntamente com a corrente da fase da rede

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no ensaio experimental

Parâmetro	Especificação
Tensão da rede (e_g)	110V_{RMS}
Tensão de referência da geração (e_l^*)	110V_{RMS}
Frequência de chaveamento (f_s)	10 kHz
Indutância da rede (L_g)	5.0 mH
Indutância do lado da geração (L_l)	5.0mH
Tensão do barramento CC das pontes H ($V_{dc,n}$)	65 V
Tensão do barramento CC do 2x3L (V_{dc})	320 V
Corrente do barramento CC das células ($I_{dc_{jk}}$)	4 A

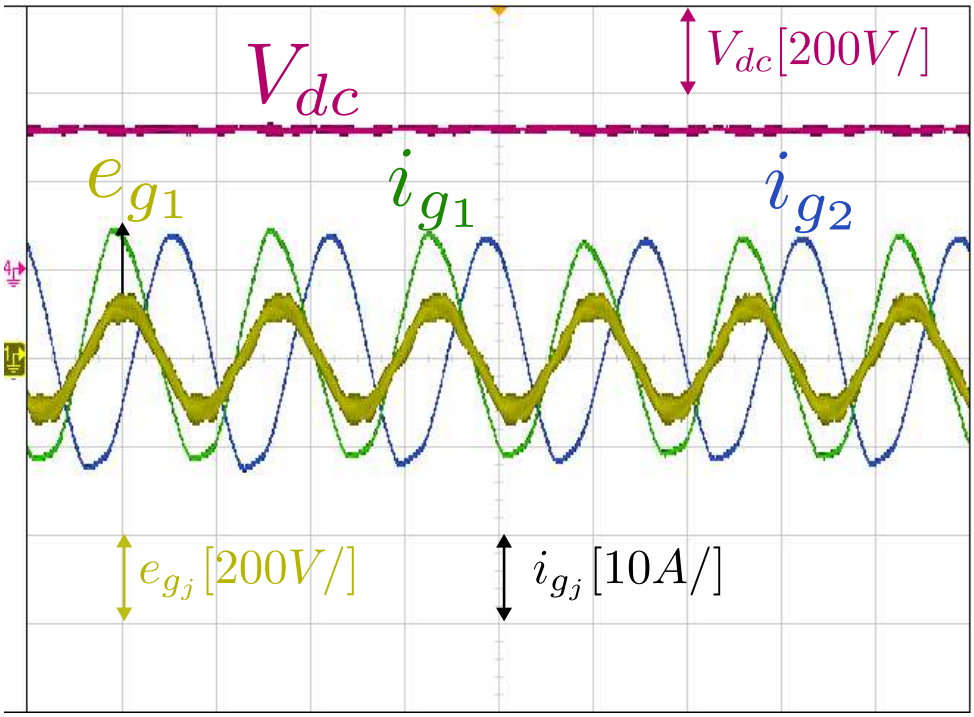
(i_{g_2}). Por fim, a Fig. 27 mostra as tensões dos barramentos CC da CHB fase 1 ($V_{dc_{1k}}$) juntamente com a corrente gerada pela célula 1 da fase 1 ($i_{dc_{11}}$) , nas quais se observa o desbalanceamento de geração. Ainda assim, os barramentos CC permanecem regulados, assim como as correntes da rede.

Figura 24 – Tensão da rede (e_g), corrente da rede (i_g) e tensão do barramento do 2x3L (V_{dc}).



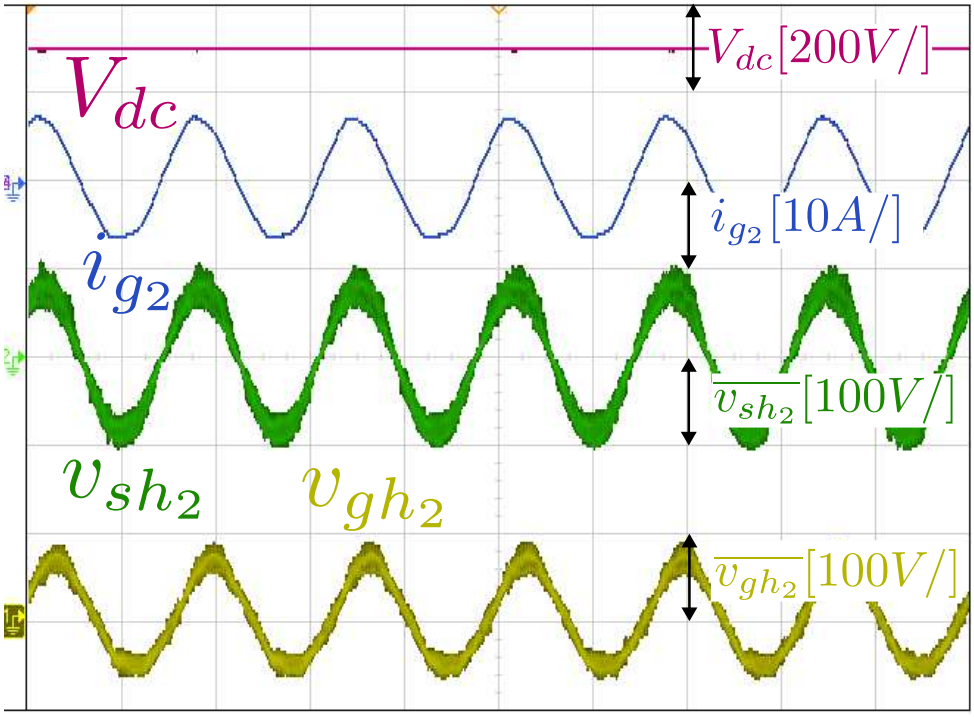
Fonte: Próprio autor.

Figura 25 – Tensão do barramento do 2x3L (V_{dc}), tensão da rede (e_g) e correntes das fases 1 e 2 da rede (i_{g_1} e i_{g_2}).



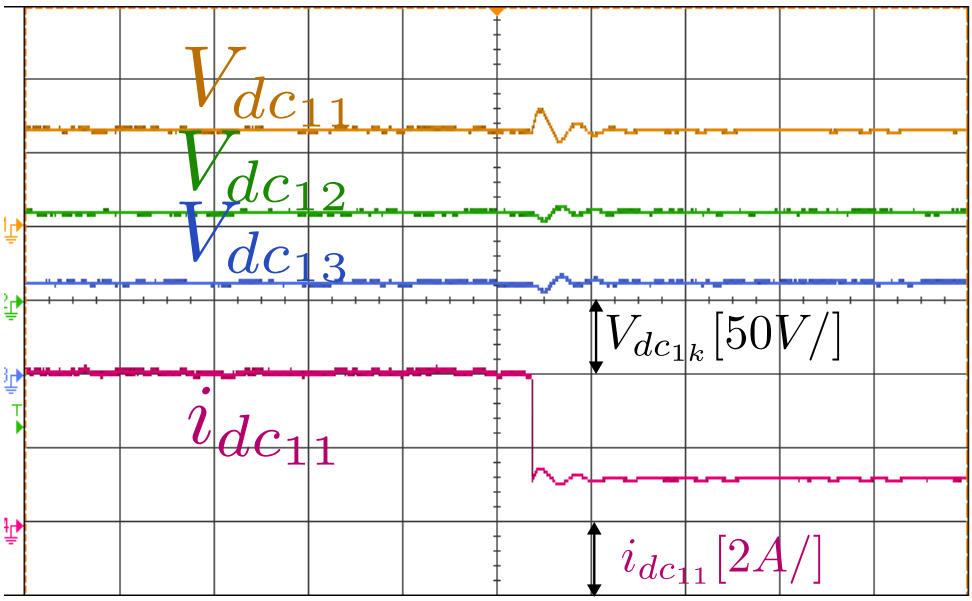
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – V_{dc}, tensões do lado da rede (v_{gh_2}), do lado da geração (v_{hs_2}) e corrente da rede da fase 2 (i_{g_2}).



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – Corrente do barramento da ponte 1 da célula 1 ($i_{dc_{11}}$) e tensões dos barramentos CC das células da fase 1 ($V_{dc_{1k}}$).



Fonte: Próprio autor.

5 Conclusões

5.1 Conclusão

Inicialmente, foi realizado o desenvolvimento do modelo do sistema fotovoltaico, permitindo a representação adequada das dinâmicas envolvidas entre os barramentos CC, o lado da geração e o lado da rede. A partir desse modelo, foram implementadas estratégias de modulação compatíveis com a operação conjunta do CHB e do conversor 2x3L, garantindo a síntese adequada das tensões e o correto compartilhamento de potência entre as estruturas.

Os controladores responsáveis pela regulação das correntes e tensões foram projetados e ajustados, apresentando desempenho satisfatório no rastreamento das referências e na estabilização dos barramentos CC, tanto do conversor quanto das células individuais.

Em regime permanente, verificou-se que o sistema apresenta operação estável, com correntes injetadas na rede praticamente senoidais, em fase com a tensão, e com baixos níveis de distorção harmônica, evidenciando a qualidade da energia fornecida.

Sob condições de sombreamento parcial, foi possível observar que a topologia mantém a estabilidade do sistema, mitigando os efeitos do desequilíbrio entre os barramentos CC das células. Nesse contexto, destacou-se a capacidade do conversor 2x3L de atuar de forma coordenada com o CHB, promovendo o desacoplamento entre as dinâmicas da geração e da rede.

Adicionalmente, foi evidenciada a atuação do conversor proposto como filtro ativo de potência, tanto na configuração em derivação quanto na configuração série, contribuindo para a mitigação de distúrbios e para a manutenção da qualidade da energia.

A análise dos índices de qualidade de energia confirmou o bom desempenho do sistema, com valores reduzidos de THD nas correntes da rede, mesmo em condições de operação não ideais.

Por fim, a proposta foi validada por meio de simulações computacionais em diferentes cenários operacionais e testes experimentais demonstrando a viabilidade da topologia e a sua capacidade de atender aos objetivos estabelecidos neste trabalho.

5.2 Considerações Finais

Como contribuição adicional, destaca-se que os resultados deste trabalho foram apresentados no congresso internacional IEEE Energy Conversion Congress and Exposition

(ECCE), edição América 2025.

Como perspectivas para trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de avaliar o desempenho da topologia proposta em uma gama mais ampla de condições de operação, incluindo diferentes perfis de carga, níveis de desbalanceamento, variações de rede e cenários mais severos de sombreamento. Além disso, recomenda-se a implementação experimental da topologia e o desenvolvimento de estratégias de controle mais avançadas, visando aprofundar a análise do comportamento dinâmico e ampliar a robustez do sistema.

Referências Bibliográficas

ABNT. *ABNT NBR IEC 61000-4-30: Compatibilidade eletromagnética (EMC) — Parte 4-30: Técnicas de ensaio e medição — Métodos de medição de qualidade de energia*. 2010. Verificar edição vigente na ABNT; acesso em 02/03/2026. Citado na página 9.

ABNT. *ABNT NBR 16149: Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição*. 2013. Acesso via ABNT em 02/03/2026. Citado na página 5.

ABNT. *ABNT NBR 16150: Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade*. 2013. Acesso via ABNT em 02/03/2026. Citado na página 5.

ALI, Z. H. et al. Review of control strategies in three phase grid connected renewable energy systems with practical case study. *Results in Engineering*, v. 29, p. 109286, 03 2026. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

ANEEL. *Regras e Procedimentos de Distribuição (PRODIST)*. 2022. Acesso em 02/03/2026. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 13.

ANEEL. *Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica*. 2024. Acesso em 02/03/2026. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/qualidade-do-fornecimento-de-energia-eletrica>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 13.

ATHTHANAYAKE, L. et al. Challenges to voltage and frequency stability of microgrids under renewable integration. In: *2020 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6. Citado na página 15.

AZIZI, A. et al. A review on topology and control strategies of high-power inverters in large- scale photovoltaic power plants. *Heliyon*, v. 11, n. 3, p. e42334, 2025. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025007145>. Citado na página 7.

BAKRIA, D. et al. An optimized shunt active power filter using the golden jackal optimizer. *Scientific Reports*, 2025. Acesso em 02/03/2026. Citado na página 10.

BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. [S.l.]: IEEE Press, 2000. Citado na página 9.

DASH, D. K.; SADHU, P. K. A review on the use of active power filter for grid-connected renewable energy conversion systems. *Processes*, v. 11, n. 5, 2023. ISSN 2227-9717. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/5/1467>. Citado na página 15.

FELINTO, A. S. et al. Six-leg three-phase ac–dc–ac converter with shared legs. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 57, n. 5, p. 5227–5238, 2021. Citado na página 2.

FILHO, R. M. S. et al. Comparison of three single-phase pll algorithms for ups applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 8, p. 2923–2932, 2008. Citado na página 21.

HOLMES, D. G.; LIPO, T. A. *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. [S.l.]: IEEE Press, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 5, 6, 12 e 13.

IEEE. *IEEE Std 1547-2018: Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*. 2018. Acesso em 02/03/2026. Disponível em: <https://standards.ieee.org/standard/1547-2018.html>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.

IEEE. *IEEE Std 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. 2019. Acesso em 02/03/2026. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/1159/6124/>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 10.

IEEE. *IEEE Std 519-2022: IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*. 2022. Acesso em 02/03/2026. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 11 e 13.

JACOBINA, C. et al. Current control of unbalanced electrical systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 48, n. 3, p. 517–525, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 23.

JODDUMAHANTHI, V. et al. Review of power electronics technologies in the integration of renewable energy systems. *Applied Sciences*, v. 15, n. 8, 2025. ISSN 2076-3417. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/8/4523>. Citado na página 15.

KOURO, S. et al. Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging pv converter technology. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 9, n. 1, p. 47–61, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 15.

LIU, J. et al. Research on power quality optimization of the microgrid based on active power filter. In: *2023 4th International Conference on Power Engineering (ICPE)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 189–193. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 15.

MARTHI, P. et al. Behavior of multiple pv plants in future power grids during events. In: . [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 15.

MCGRATH, B.; HOLMES, D. Multicarrier pwm strategies for multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 49, n. 4, p. 858–867, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 12.

MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. *Photovoltaic Systems Engineering*. 4. ed. [S.l.]: CRC Press, 2020. Citado na página 4.

NAYAK, S. et al. Battery energy support to cascaded h-bridge converter fed large scale pv system during unbalanced power generation. In: *2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6. Citado na página 15.

OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 5. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. Citado na página 14.

RASHID, M. H. *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*. 4. ed. [S.l.]: Pearson, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 5, 6, 7 e 12.

RODRIGUEZ, J.; LAI, J.-S.; PENG, F. Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 49, n. 4, p. 724–738, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 13.

SEPASI, S.; TALICHET, C.; PRAMANIK, A. S. Power quality in microgrids: A critical review of fundamentals, standards, and case studies. *IEEE Access*, v. 11, p. 108493–108531, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 15.

SHARMA, B. et al. A comprehensive review of multi-level inverters, modulation, and control for grid-interfaced solar pv systems. *Scientific reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 15, n. 1, p. 661, 2025. Citado na página 7.

VITORINO, M. A. *Eletrônica de potência: fundamentos, conceitos e aplicações*. [S.l.]: Appris Editora, 2019. ISBN 9788547337933. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

WANG, F. et al. Power balance control scheme of cascaded h-bridge multilevel inverter for grid-connection photovoltaic systems. In: *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1539–1545. Citado na página 15.

WORKU, M. Y. et al. A comprehensive review of recent maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems under partial shading. *Sustainability*, v. 15, n. 14, 2023. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/11132>. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 8.

XUE, H.; HE, J. A simplified power balance strategy for three-phase cascaded h-bridge photovoltaic inverter. In: *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6. Citado na página 15.

ZHANG, X. et al. Multilevel inverters for grid-connected photovoltaic applications: Examining emerging trends. *IEEE Power Electronics Magazine*, v. 5, n. 4, p. 32–41, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 15.