



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AMANDA DE SOUSA MELO**

**ESTUDO DE RETIFICADORES MULTINÍVEIS COM CÉLULAS EM CASCATA**

**FORTALEZA**

**2026**

AMANDA DE SOUSA MELO

ESTUDO DE RETIFICADORES MULTINÍVEIS COM CÉLULAS EM CASCATA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório

Coorientadora: Prof. Dra. Amanda Pereira Monteiro

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M485e Melo, Amanda de Sousa.

Estudo de retificadores multiníveis com células em cascata / Amanda de Sousa Melo . – 2026.  
65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório.

Coorientação: Profa. Dra. Amanda Pereira Monteiro.

1. Retificadores multiníveis . 2. Células em cascata. 3. Operação simétrica. 4. Operação assimétrica. 5. Correção de fator de potência. I. Título.

CDD 621.3

---

AMANDA DE SOUSA MELO

ESTUDO DE RETIFICADORES MULTINÍVEIS COM CÉLULAS EM CASCATA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Amanda Pereira  
Monteiro (Coorientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Debora Pereira Damasceno  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Pedro Herysson Almeida da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, minha maior inspiração. Tudo o que sou e conquistei carrega um pouco de vocês.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Almir e Maria, pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões e pelo incentivo constante à independência e crescimento. Aos meus irmãos, Lucas, Gabriel e Bruno, pelo carinho e apoio ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, professor Dr. Dalton de Araújo Honório, por todo o conhecimento compartilhado ao longo da graduação, pelas oportunidades, conversas, conselhos e pela orientação fundamental para a realização deste trabalho.

À minha coorientadora, professora Dra. Amanda Pereira Monteiro, por todo o tempo disponibilizado, pela dedicação e pela valiosa ajuda fornecida ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sem o seu apoio, sua realização não teria sido possível.

Ao Laboratório de Condicionadores de Energia (LCE) e todos seus integrantes: Juliana, Emanuel, Pedro Enzo, Igor, Ubirani, Levi, Vinicius, Paulo. Pelo ambiente de aprendizado, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio durante minha formação acadêmica.

Aos amigos de graduação Vitória Júlia, Isabelle Loiola, Ian Wanderley, Lucas Mâcedo, Victor Hugo e Gabriel Pinheiro, pela parceria ao longo do curso, por todos os conselhos, pelos "puxões de orelha", pelos cafezinhos na química, pelas madrugadas de estudos e pelos momentos de descontração que tornaram mais leves os semestres turbulentos. Em especial aos amigos João Felipe e Auro Gabriel, que foram essenciais para minha formação.

Aos membros da banca, Eng. Pedro Herysson e Dra. Debora Pereira, pelas contribuições e pela disponibilidade em participar da avaliação deste trabalho.

Às amigas Juliana, Mariana e Gisele, que, mesmo não sendo da engenharia elétrica, sempre estiveram presentes, oferecendo apoio, escuta e incentivo nos momentos mais desafiadores.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, por todo o conhecimento transmitido, pela dedicação ao ensino e pela contribuição fundamental para a minha formação acadêmica e profissional.

“Ninguém caminha sem aprender a caminhar,  
sem aprender a fazer o caminho caminhando,  
refazendo e retocando o sonho pelo qual se pôs  
a caminhar.”

(Paulo Freire)

## RESUMO

A crescente demanda por energia elétrica e a necessidade de conformidade com rígidas normas de qualidade de energia têm impulsionado o desenvolvimento de retificadores ativos com alto fator de potência. Os retificadores multiníveis apresentam-se como uma solução superior aos retificadores convencionais para aplicações de média e alta tensão, oferecendo menor distorção harmônica e menor esforço de tensão nos semicondutores. No entanto, o elevado número de componentes em topologias clássicas, como a Ponte-H em Cascata (*Cascaded H-Bridge - CHB*), aumenta o custo e a complexidade do sistema. Este trabalho apresenta a análise, modulação e simulação de duas configurações de retificadores multiníveis monofásicos unidirecionais baseados em células em cascata com reduzido número de chaves controladas. Este estudo foca na operação simétrica e assimétrica das topologias, utilizando duas células ( $k = 2$ ) para sintetizar de cinco a nove níveis de tensão na entrada. A abordagem simétrica simplifica o controle e permite a padronização modular, enquanto a abordagem assimétrica proporciona um maior número de níveis de tensão. A metodologia abrange a descrição matemática do funcionamento das células, o desenvolvimento de uma estratégia de PWM por níveis adaptada e o controle de corrente de entrada. Os resultados obtidos via simulação computacional validam o desempenho do sistema, demonstrando que as configurações estudadas garantem correntes de entrada senoidais com baixa Distorção Harmônica Total (DHT), fator de potência unitário e regulação eficaz das tensões de saída, aliando alta qualidade de energia a uma estrutura simplificada.

**Palavras-chave:** Retificadores Multiníveis. Células em Cascata. Operação Simétrica. Operação Assimétrica. Correção de Fator de Potência.

## ABSTRACT

The growing demand for electrical energy and the need for compliance with strict power quality standards have driven the development of active rectifiers with high power factor. Multilevel rectifiers present themselves as a superior solution to conventional rectifiers for medium and high-voltage applications, offering lower harmonic distortion and reduced voltage stress on semiconductors. However, the high component count in classic topologies, such as the Cascaded H-Bridge (CHB), increases the system cost and complexity. This work presents the analysis, modulation, and simulation of two single-phase unidirectional multilevel rectifier configurations based on cascaded cells with reduced switch count. This study focuses on the symmetrical and asymmetrical operation of the topologies, utilizing two cells ( $k = 2$ ) to synthesize from five to nine voltage levels at the input. The symmetrical approach simplifies control and allows for modular standardization, while the asymmetrical approach provides a higher number of voltage levels. The methodology encompasses the mathematical description of the cells' operation, the development of an adapted level-shifted PWM strategy, and the input current control. The results obtained via computational simulation validate the system performance, demonstrating that the studied configurations ensure sinusoidal input currents with low Total Harmonic Distortion (THD), unity power factor, and effective output voltage regulation, combining high power quality with a simplified structure.

**Keywords:** Multilevel Rectifiers. Cascaded Cells. Symmetrical Operation. Asymmetrical Operation. Power Factor Correction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Retificador de grampeamento de ponto neutro (NPC). . . . .	17
Figura 2 – Retificador de capacitor flutuante (FC). . . . .	17
Figura 3 – Conversor Ponte-H em cascata (CHB). . . . .	18
Figura 4 – Conversor Ponte-H em cascata com duas chaves (CHB). . . . .	19
Figura 5 – Braço Vienna. . . . .	20
Figura 6 – Topologia 1 de retificador multinível unidirecional com 2 células em cascata.	25
Figura 7 – Topologia 2 de retificador multinível unidirecional com 2 células em cascata.	26
Figura 8 – Etapas de operação de acordo com o estado de chaveamento para topologia 1, quando $i_g \geq 0$ : (a) [0 0], (b) [0 1], (c) [1 0], (d) [1 1]. Quando $i_g < 0$ : (e) [0 0], (f) [0 1], (g) [1 0], (h) [1 1] . . . . .	29
Figura 9 – Etapas de operação de acordo com o estado de chaveamento para topologia 2, quando $i_g \geq 0$ : (a) [0 0 0], (b) [0 0 1], (c) [0 1 0], (d) [0 1 1], (e) [1 0 0], (f) [1 0 1] (g) [1 1 0], (h) [1 1 1] . . . . .	31
Figura 10 – Etapas de operação de acordo com o estado de chaveamento para topologia 2, quando $i_g < 0$ : (a) [0 0 0], (b) [0 0 1], (c) [0 1 0], (d) [0 1 1], (e) [1 0 0], (f) [1 0 1] (g) [1 1 0], (h) [1 1 1] . . . . .	32
Figura 11 – Espaço de modulação para a configuração 1 no modo simétrico. . . . .	39
Figura 12 – Espaço de modulação para a configuração 2 no modo simétrico. . . . .	40
Figura 13 – Espaço de modulação para a configuração 1 no modo assimétrico. . . . .	40
Figura 14 – Espaço de modulação para a configuração 2 no modo assimétrico. . . . .	41
Figura 15 – Diagrama de controle geral para as configurações estudadas. . . . .	45
Figura 16 – Gráfico de relação entre número de níveis por número de chaves para análise simétrica. . . . .	47
Figura 17 – Gráfico de relação entre número de níveis por número de chaves para análise assimétrica. . . . .	48
Figura 18 – Gráfico de relação entre número de níveis por número de células para análise assimétrica. . . . .	49
Figura 19 – Resultado de simulação da tensão $v_g$ e corrente $i_g$ ampliada para a configuração 1 simétrica. . . . .	50
Figura 20 – Resultado de simulação da tensão $v_1$ e tensão $v_2$ para a configuração 1 simétrica.	50

Figura 21 – Resultado de simulação das tensões de barramento $E_1$ e $E_2$ para a configuração 1 simétrica. . . . .	51
Figura 22 – Resultado de simulação da tensão $v_g$ e corrente $i_g$ ampliada para a configuração 2 simétrica. . . . .	52
Figura 23 – Resultado de simulação da tensão $v_1$ e tensão $v_2$ para a configuração 2 simétrica.	52
Figura 24 – Resultado de simulação das tensões de barramento $E_1$ e $E_2$ para a configuração 2 simétrica. . . . .	53
Figura 25 – Resultado de simulação da tensão $v_g$ e corrente $i_g$ ampliada para a configuração convencional simétrica. . . . .	54
Figura 26 – Resultado de simulação da tensão $v_1$ e tensão $v_2$ para a configuração convencional simétrica. . . . .	54
Figura 27 – Resultado de simulação das tensões de barramento $E_1$ e $E_2$ para a configuração convencional simétrica. . . . .	55
Figura 28 – Resultado de simulação da tensão $v_g$ e corrente $i_g$ ampliada para a configuração 1 assimétrica. . . . .	56
Figura 29 – Resultado de simulação da tensão $v_1$ e tensão $v_2$ para a configuração 1 assimétrica. . . . .	56
Figura 30 – Resultado de simulação das tensões de barramento $E_1$ e $E_2$ para a configuração 1 assimétrica. . . . .	57
Figura 31 – Resultado de simulação da tensão $v_g$ e corrente $i_g$ ampliada para a configuração 2 assimétrica. . . . .	58
Figura 32 – Resultado de simulação da tensão $v_1$ e tensão $v_2$ para a configuração 2 assimétrica. . . . .	58
Figura 33 – Resultado de simulação das tensões de barramento $E_1$ e $E_2$ para a configuração 2 assimétrica. . . . .	59
Figura 34 – Resultado de simulação da tensão $v_g$ e corrente $i_g$ ampliada para a configuração convencional assimétrica. . . . .	60
Figura 35 – Resultado de simulação da tensão $v_1$ e tensão $v_2$ para a configuração convencional assimétrica. . . . .	60
Figura 36 – Resultado de simulação das tensões de barramento $E_1$ e $E_2$ para a configuração convencional assimétrica. . . . .	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 1 simétrica com 2 células em cascata . . . . .	33
Tabela 2 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 2 simétrica com 2 células em cascata . . . . .	33
Tabela 3 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 1 assimétrica com 2 células em cascata . . . . .	37
Tabela 4 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 2 assimétrica com 2 células em cascata . . . . .	38
Tabela 5 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 1 simétrica com 2 células em cascata . . . . .	42
Tabela 6 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 1 simétrica com 2 células em cascata . . . . .	43
Tabela 7 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 1 assimétrica com 2 células em cascata . . . . .	43
Tabela 8 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 2 assimétrica com 2 células em cascata . . . . .	44
Tabela 9 – Comparação de parâmetros entre as topologias propostas e a convencional para casos simétricos e assimétricos . . . . .	46
Tabela 10 – Comparação de topologias simétricas e assimétricas com 2 células em cascata	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CHB	Ponte-H em Cascata - <i>Cascaded H-Bridge</i>
DHT	Distorção Harmônica Total
FC	Capacitor Flutuante - <i>Flying Capacitor</i>
LS-PWM	Modulação por Largura de Pulso com Deslocamento de Nível - <i>Level-Shifted PWM</i>
NPC	Grampeamento de Ponto Neutro - <i>Neutral-Point Clamped</i>
PFC	Correção do Fator de Potência - <i>Power Factor Correction</i>
PS-PWM	Modulação por Largura de Pulso com Deslocamento de Fase - <i>Phase-Shifted PWM</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso - <i>Pulse Width Modulation</i>
SHE-PWM	Eliminação Seletiva de Harmônicas - <i>Selective Harmonic Elimination</i>
SVPWM	Modulação Vetorial - <i>Space Vector PWM</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v_g$	Tensão de entrada
$v_s$	Tensão da célula $s$
$E_s$	Tensão do barramento CC da célula $s$
$e_g$	Tensão da rede
$i_g$	Corrente elétrica de entrada
$r_g$	Resistência do indutor de filtro
$L_g$	Indutância do indutor de filtro
$k$	Número de células em cascata
$t$	Tempo
$q_{st}$	Chave Vienna da célula $s$
$q_{sa}$	Chave IGBT do primeiro braço da célula $s$
$q_{sb}$	Chave IGBT do segundo braço da célula $s$
$N_l$	Número de níveis
$N_{sw}$	Número de chaves

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>15</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Retificadores clássicos</i>	<i>16</i>
<b>1.2</b>	<b>Técnicas de modulação</b>	<b>21</b>
<b>1.3</b>	<b>Contribuições do trabalho</b>	<b>22</b>
<b>1.4</b>	<b>Aplicações do trabalho</b>	<b>22</b>
<b>1.5</b>	<b>Objetivos</b>	<b>23</b>
<b>1.6</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>TOPOLOGIAS ESTUDADAS</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Equações do conversor</b>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Análise simétrica</b>	<b>27</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Etapas de operação</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Tensões geradas</i>	<i>32</i>
<b>2.3</b>	<b>Análise assimétrica</b>	<b>34</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Etapas de operação</i>	<i>34</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Tensões geradas</i>	<i>37</i>
<b>3</b>	<b>MODULAÇÃO E CONTROLE</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Estratégia de modulação</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Estratégia de controle</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise topológica</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise gráfica</b>	<b>49</b>
<i>4.2.1</i>	<i>Análise simétrica</i>	<i>49</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Análise assimétrica</i>	<i>55</i>
<b>4.3</b>	<b>Análise de distorção harmônica</b>	<b>62</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por energia elétrica e a integração de sistemas de energia renovável, veículos elétricos e cargas industriais sensíveis têm impulsionado o desenvolvimento de sistemas de conversão de energia mais eficientes. Além do mais, o aumento da utilização de cargas não lineares conectadas à rede elétrica tem intensificado os problemas relacionados à qualidade de energia. Entre os principais impactos observados, destacam-se a distorção das formas de onda de corrente e tensão, a degradação do fator de potência e o aumento das perdas no sistema elétrico.

Tradicionalmente, a conversão de Corrente Alternada (CA) para Corrente Contínua (CC), um processo chamado de retificação, era realizada por pontes de diodos passivas (SINGH *et al.*, 2003). No entanto, esses dispositivos introduzem Distorção Harmônica Total (DHT), que é um parâmetro amplamente utilizado para avaliar a qualidade da energia elétrica. Desse modo, valores elevados desse parâmetro estão associados a efeitos indesejáveis, como aquecimento excessivo de condutores, interferências eletromagnéticas e redução da vida útil dos equipamentos.

A conformidade com normas internacionais rígidas, como a IEC (2018) e a IEEE (2022), exige que os retificadores atuais operem com corrente de entrada senoidal e em fase com a tensão da rede, exigindo ainda a redução do DHT para valores inferiores a 5% (SALMON, 1995). Nesse cenário, os retificadores ativos, ou retificadores de Modulação por Largura de Pulso - *Pulse Width Modulation* (PWM), surgem como a solução padrão, permitindo o controle ativo da corrente e a regulação da tensão no barramento CC.

## 1.1 Revisão bibliográfica

Nas últimas décadas, os conversores multiníveis consolidaram-se como alternativas atraentes e, em muitos casos, superiores aos conversores convencionais de dois níveis para aplicações industriais de média e alta tensão (RODRIGUEZ *et al.*, 2010; KOURO *et al.*, 2010). Estruturas clássicas bem estabelecidas na literatura, como o Grampeamento de Ponto Neutro - *Neutral-Point Clamped* (NPC), o Capacitor Flutuante - *Flying Capacitor* (FC) e o Ponte-H em Cascata - *Cascaded H-Bridge* (CHB), são amplamente reconhecidas por oferecerem elevado desempenho dinâmico, melhor qualidade de energia com frequências de chaveamento reduzidas, menor esforço de tensão sobre os semicondutores e redução na necessidade de filtros volumosos de entrada (RODRIGUEZ *et al.*, 2009; LEON *et al.*, 2017; COLAK *et al.*, 2011).

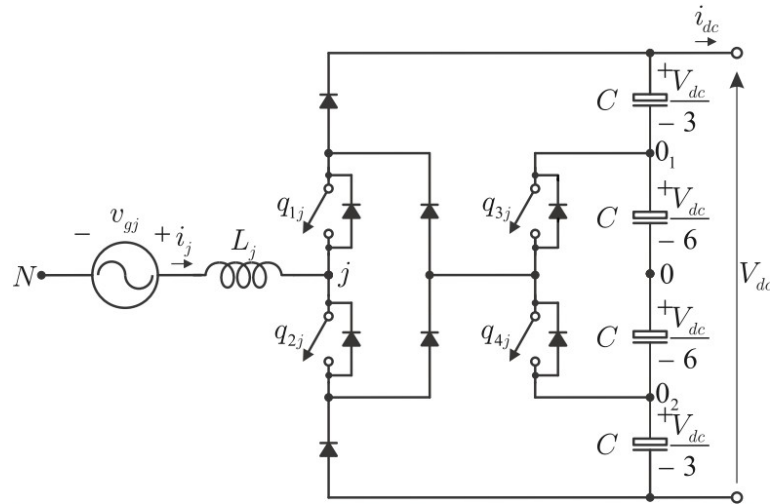
### 1.1.1 Retificadores clássicos

Os retificadores monofásicos convencionais, geralmente são compostos por uma ponte de diodos seguida de um filtro capacitivo, são amplamente utilizados devido à sua simplicidade e baixo custo. No entanto, essa topologia apresenta como principal desvantagem a elevada distorção harmônica da corrente de entrada, resultando em baixo fator de potência e significativa degradação da qualidade de energia.

Como descrito em Salmon (1995), com o objetivo de mitigar esses problemas, diversas topologias de retificadores com correção ativa do fator de potência foram propostas na literatura. Entre elas, destacam-se os retificadores *boost* com Correção do Fator de Potência - *Power Factor Correction* (PFC), que utilizam chaves semicondutoras para modelar a corrente de entrada de forma senoidal e em fase com a tensão da rede (VAHEDI *et al.*, 2016). Apesar de apresentarem bom desempenho elétrico, essas topologias geralmente operam com elevados níveis de tensão no barramento CC e podem apresentar maiores perdas por comutação.

Além do *boost* PFC, o retificador NPC, apresentado na Figura 1, destacou-se pela utilização de diodos de grameamento que conectam o ponto médio do barramento CC à saída. Essa estrutura oferece como principais vantagens a redução do estresse de tensão sobre as chaves e reduzida DHT. Entretanto, suas desvantagens limitam sua expansão para um número elevado de níveis, notadamente devido à distribuição desigual de perdas térmicas entre as chaves internas e externas, fato que reduz a vida útil dos componentes (VAHEDI *et al.*, 2016). Além disso, existe a complexidade do controle para manter o equilíbrio da tensão no ponto neutro dos capacitores, problema este que se agrava com o aumento do índice de modulação e na presença de cargas não lineares.

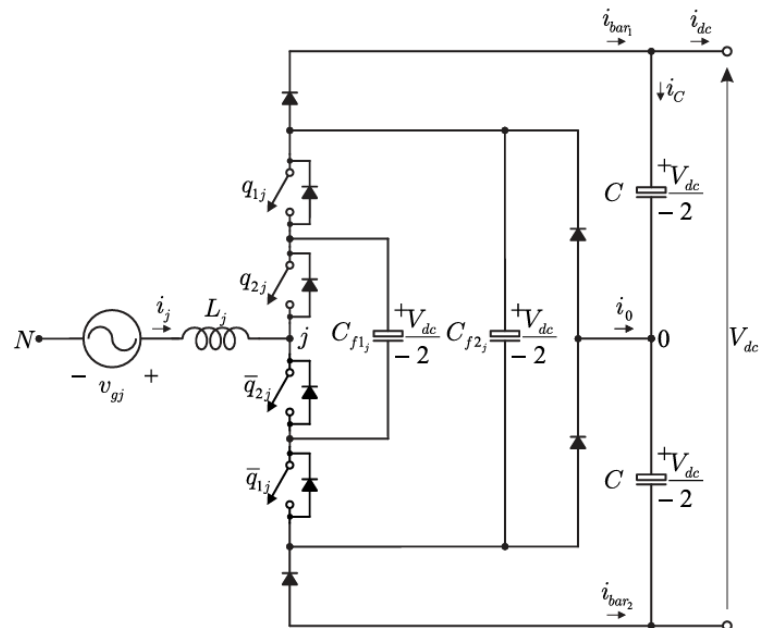
Figura 1 – Retificador de grampeamento de ponto neutro (NPC).



Fonte: Adaptado de Dutra *et al.* (2023).

Outra topologia citada em Dutra *et al.* (2023) é o retificador FC, apresentado na Figura 2, abordado como uma das topologias clássicas e destaca-se pela utilização de capacitores adicionais para realizar o grampeamento dos níveis de tensão, dispensando o uso de diodos como no caso da topologia NPC. Entretanto, essa configuração tem como desvantagem o elevado número de capacitores de balanço por fase, o que torna o sistema volumoso e custoso (SINGH *et al.*, 2003).

Figura 2 – Retificador de capacitor flutuante (FC).

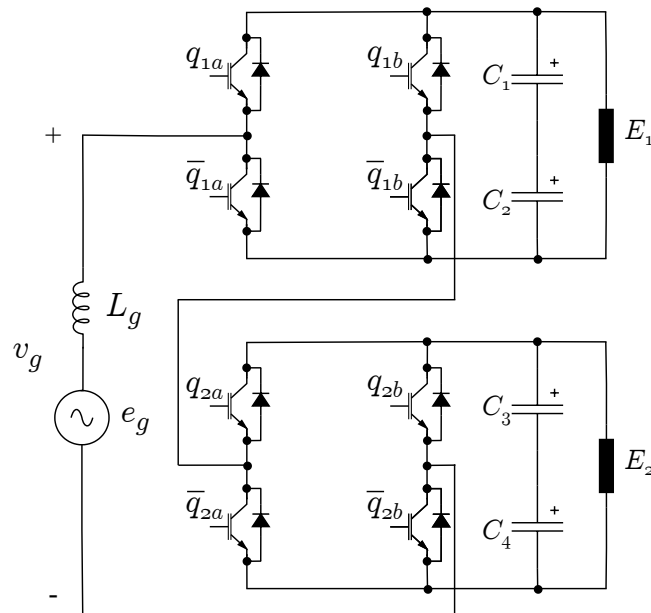


Fonte: Adaptado de Dutra *et al.* (2023).

A topologia CHB, apresentada na Figura 3, baseada em células com quatro chaves controladas também é uma das estruturas multiníveis mais importantes e utilizadas na literatura.

Essa configuração consiste na conexão em série dos terminais de saída CA de múltiplas células inversoras de ponte-H (RODRIGUEZ *et al.*, 2010). Cada célula pode gerar até três níveis de tensão na saída, fazendo com que a tensão total de saída seja a soma das tensões geradas por cada célula.

Figura 3 – Conversor Ponte-H em cascata (CHB).



Fonte: Adaptado de Rodriguez *et al.* (2010).

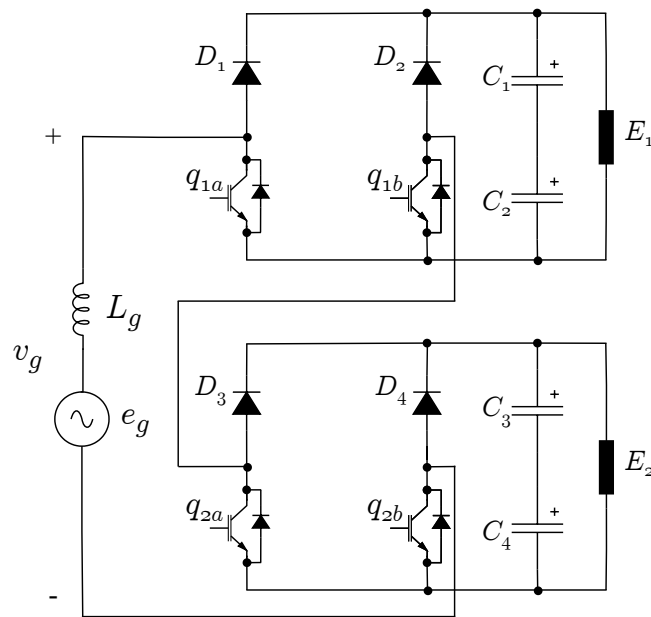
As vantagens dessa topologia consistem na modularidade e escalabilidade, uma vez que sua estrutura modular facilita a fabricação e a expansão para níveis de tensão mais elevados, adicionando mais células (VEMUGANTI *et al.*, 2021). Entretanto, o elevado número de componentes, entre eles, chaves e circuitos de acionamento, torna-se uma desvantagem em relação a topologias como NPC e FC.

Dentre essas topologias citadas, a configuração em cascata CHB tem sido extensivamente empregada como estágio retificador frontal em conversores multiníveis sem transformador (*transformerless*). A sua modularidade permite alcançar níveis elevados de tensão e potência através da conexão série de células (MALINOWSKI *et al.*, 2010). No entanto, a principal desvantagem dessa configuração clássica reside na elevada contagem de chaves controladas, circuitos de acionamento e requisitos de proteção associados, especialmente à medida que o número de células em cascata aumenta.

Para alcançar níveis de tensão ainda mais elevados e melhorar a qualidade da forma

de onda, destacam-se variações dos conversores CHB em Dutra *et al.* (2023), apresentados na Figura 4. Como discutido em Iman-Eini *et al.* (2007), a modularidade das células em série permite somar as tensões de saída, resultando em uma tensão sintetizada com múltiplos níveis. Quanto maior o número de níveis, mais a forma de onda se aproxima de uma senoide, diminuindo o DHT antes mesmo da filtragem.

Figura 4 – Conversor Ponte-H em cascata com duas chaves (CHB).



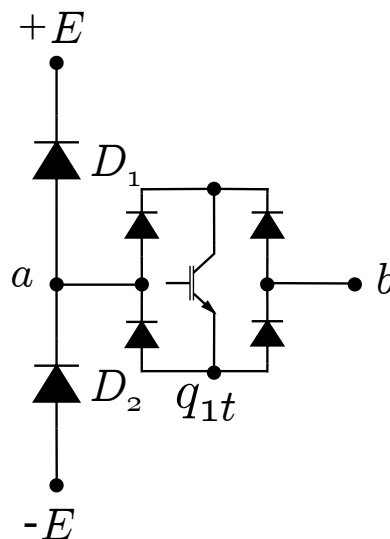
Fonte: Adaptado de Dutra *et al.* (2023).

Essa topologia se destaca em relação ao CHB com células em ponte-H pois possui apenas duas chaves controladas por célula e dois diodos, sendo projetada para aplicações de fluxo de potência unidirecional (WANG *et al.*, 2017). A substituição de duas das quatro chaves por diodos de potência representa uma redução de 50% no número de chaves ativas por célula, o que também reduz o número de circuitos de acionamento. A redução desses componentes diminui as perdas de comutação, o que é uma vantagem para a topologia. Por ser amplamente difundida na literatura, essa configuração será denominada topologia convencional e será utilizada como base para comparação com as topologias estudadas nesse trabalho.

Dessa forma, visando a maior relação de níveis com um número reduzido de chaves controladas, será estudado nesse trabalho duas topologias multiníveis unidirecionais em cascata, que possuem menos chaves e a depender da relação entre os barramentos, podem sintetizar mais níveis de tensão em relação a outras topologias.

Essas topologias a serem estudadas baseiam-se no conceito do braço Vienna, mostrado na Figura 5, uma configuração de comutação analisada por Kolar e Zach (1997). Esta topologia de braço distingue-se por conectar a fase de entrada ao ponto médio do barramento CC capacitivo através de um arranjo de chaves bidirecionais controladas. Diferentemente das perdas de comutação convencionais de dois níveis, o braço Vienna permite a síntese de três níveis de tensão na entrada da célula, utilizando a condução dos diodos para direcionar o fluxo de corrente conforme a polaridade da rede, enquanto a chave ativa controla a conexão com o ponto neutro. Essa característica é essencial para garantir uma modulação eficiente com reduzida DHT, mantendo a simplicidade operacional.

Figura 5 – Braço Vienna.



Fonte: Adaptado de Kolar e Zach (1997).

A principal justificativa para a adoção do braço Vienna reside na significativa redução do número de componentes ativos necessários para a implementação do conversor. Conforme demonstrado por Kolar e Zach (1997), a utilização deste tipo de braço permite substituir metade dos interruptores totalmente controlados por diodos. Essa substituição resulta em uma diminuição direta da quantidade de circuitos de acionamento e de fontes de alimentação auxiliares, simplificando o *hardware* e aumentando a densidade de potência do sistema.

## 1.2 Técnicas de modulação

O desempenho dos retificadores multiníveis está diretamente associado à técnica de modulação empregada. Estratégias de modulação adequadas permitem controlar a tensão média aplicada à rede, garantir o balanceamento das tensões dos barramentos CC e reduzir o conteúdo harmônico da corrente de entrada.

Dentre as técnicas mais utilizadas destacam-se as estratégias baseadas em divisão do espaço de modulação em setores, associadas ao uso de razões cíclicas e portadoras defasadas. Essas abordagens possibilitam a síntese de múltiplos níveis de tensão de forma eficiente, além de contribuírem para a redução da distorção harmônica e para o melhor aproveitamento das características das topologias multiníveis.

A Modulação por Largura de Pulso com Deslocamento de Nível - *Level-Shifted PWM* (LS-PWM), analisada teoricamente por Carrara *et al.* (1992), é uma extensão natural da modulação senoidal bipolar para conversores multiníveis. Ela utiliza múltiplas portadoras triangulares dispostas verticalmente (em faixas de nível contíguas) que são comparadas com um único sinal de referência senoidal.

Outra técnica amplamente difundida, especialmente para inversores em cascata (CHB) em média tensão, é a Modulação por Largura de Pulso com Deslocamento de Fase - *Phase-Shifted PWM* (PS-PWM), detalhada no trabalho de Hammond (1997). O princípio deste método consiste na utilização de múltiplas portadoras triangulares que possuem a mesma amplitude e frequência, porém defasadas horizontalmente entre si por um ângulo específico, calculado com base no número de células do conversor. Essa defasagem temporal permite que os harmônicos gerados pela comutação de cada célula se cancelem mutuamente na tensão resultante total, o que eleva a frequência efetiva de chaveamento vista pela carga e melhora a qualidade da energia sem aumentar a frequência de operação dos interruptores individuais.

Para aplicações que buscam otimizar a utilização do barramento CC, a Modulação Vetorial - *Space Vector PWM* (SVPWM), é frequentemente considerada. Abordada de forma abrangente por Holtz (1994), esta estratégia trata o conversor multinível como uma unidade única capaz de gerar um conjunto finito de vetores de tensão no plano complexo. A técnica opera selecionando os vetores de tensão adjacentes à referência e calculando seus respectivos tempos de aplicação para sintetizar a tensão desejada. Embora ofereça vantagens significativas na flexibilidade da sequência de comutação, sua implementação torna-se exponencialmente mais complexa à medida que o número de níveis do conversor aumenta.

Por fim, em cenários onde a redução das perdas de comutação é prioritária, emprega-se a Eliminação Seletiva de Harmônicas - *Selective Harmonic Elimination* (SHE-PWM). Proposta pioneiramente por Turnbull (1964), esta técnica baseia-se no cálculo prévio de ângulos de comutação específicos através da análise de Fourier. O objetivo é determinar os instantes exatos de disparo que eliminam matematicamente harmônicos de ordens pré-selecionadas, tipicamente os de baixa ordem como o 5 e o 7, mantendo a componente fundamental na amplitude desejada. Esta característica torna o SHE-PWM ideal para conversores de alta potência operando com baixas frequências de chaveamento.

Como visto, a escolha da técnica de modulação torna-se ainda mais relevante em configurações assimétricas, nas quais os diferentes níveis de tensão dos barramentos permitem a obtenção de um número maior de níveis sintetizados. Nesse caso, a modulação deve considerar explicitamente a assimetria dos barramentos e o sentido da corrente de entrada, garantindo a correta operação do conversor.

### **1.3 Contribuições do trabalho**

Este trabalho contribui para o estudo de retificadores multiníveis com reduzido número de componentes. Ao adaptar as configurações estudadas em Monteiro *et al.* (2024) para as operações simétrica e assimétrica com duas células, busca-se a simplificação de *hardware*, facilidade de controle e eficiência. A simplificação do *hardware* vem da redução do número de chaves ativas e conseqüentemente do número de circuitos de acionamento dessas chaves. Além disso, a facilidade do controle na operação simétrica (tensões iguais nos barramentos) elimina a necessidade de algoritmos complexos de balanceamento de energia exigidos nos sistemas assimétricos.

### **1.4 Aplicações do trabalho**

As topologias de retificadores multiníveis em cascata analisadas neste trabalho, baseadas na proposta de Monteiro *et al.* (2024), apresentam uma versatilidade significativa, permitindo sua aplicação em diversos cenários do setor elétrico. No modo de operação simétrico, a padronização das tensões nos barramentos CC e a modularidade das células tornam essas estruturas ideais para sistemas que demandam facilidade de manutenção e expansão, como carregadores de veículos elétricos e fontes de alimentação ininterruptas (UPS). Por outro lado, a

operação no modo assimétrico permite maximizar a quantidade de níveis de tensão sintetizados sem aumentar o número de chaves, o que é fundamental para aplicações de alta potência e qualidade de energia rigorosa, como em transformadores de estado sólido e interfaces de sistemas de energia renovável. Em ambos os modos, a redução na contagem de chaves controladas contribui para a diminuição das perdas de comutação e do custo de implementação, consolidando essas configurações como soluções eficazes para a melhoria da eficiência energética e da conformidade com os padrões de DHT.

## 1.5 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é estudar e comparar o desempenho de duas configurações de retificadores multiníveis unidirecionais em cascata, com número reduzido de chaves, operando em modo simétrico e assimétrico para correção de fator de potência em sistemas monofásicos.

Além disso, a análise dessas topologias se detalha nos seguintes objetivos específicos:

- Modelar e analisar o comportamento das duas configurações baseadas em células ponte-H, nos modos simétrico e assimétricos, com duas células;
- Definir a estratégia de modulação PWM por setor;
- Projetar os parâmetros dos conversores multiníveis de acordo com as especificações e considerações de projeto;
- Validar o desempenho das duas configurações em softwares adequados.

## 1.6 Organização do trabalho

No capítulo 2 será analisada as topologias em estudo, tanto de modo simétrico, quanto no modo assimétrico, contendo as equações das topologias, as etapas de operação e as tensões geradas.

No capítulo 3 será estudado a modulação por espaço de estados aplicada às duas topologias e o controle das topologia, feito a partir da corrente de entrada.

No capítulo 4 será apresentado os resultados de simulação para as duas topologias estudadas, no modo simétrico e no modo assimétrico, também será analisado a distorção harmônica em cada caso e será comparado com a topologia convencional.

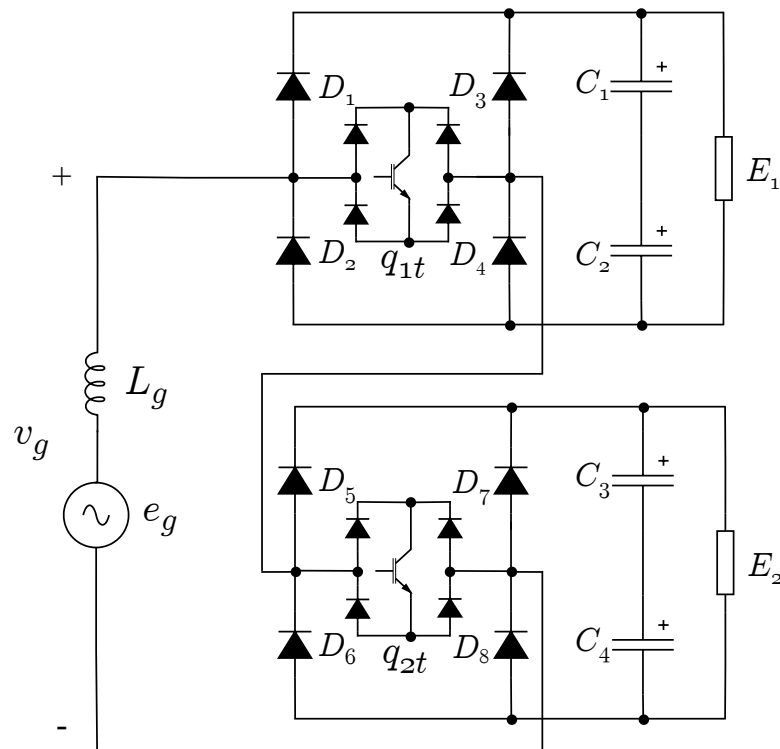
No capítulo 5, será apresentado as conclusões gerais do trabalho, bem como suas

limitações e melhorias para os trabalhos futuros.

## 2 TOPOLOGIAS ESTUDADAS

A Figura 6 apresenta o conversor multinível em cascata, operando com duas cascatas, ou seja,  $k = 2$ , sendo essas cascatas formadas por dois braços, cada um composto por dois diodos conectados por uma chave controlada Vienna  $q_{st}$ . Esta chave bidirecional Vienna, composta por quatro diodos e uma chave controlada, é conectada entre os dois braços da célula. Além disso, há um barramento CC, constituído por dois capacitores que armazenam a tensão  $E$ . A partir de agora, este conversor será denominado Topologia 1.

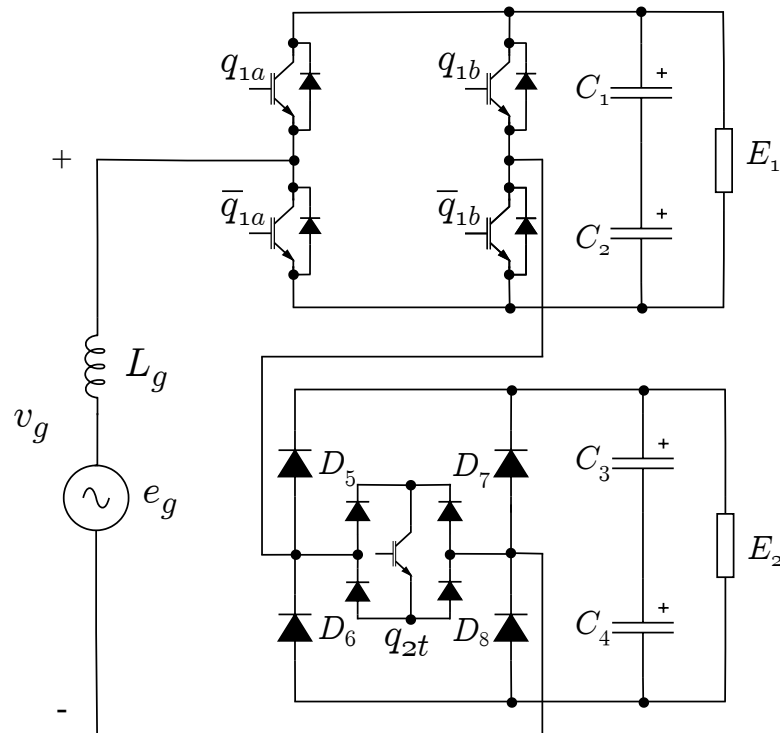
Figura 6 – Topologia 1 de retificador multinível unidirecional com 2 células em cascata.



Fonte: Adaptado de Monteiro *et al.* (2024).

Na Figura 7 é vista outra configuração do conversor multinível em cascata, ainda com duas cascatas, porém, a cascata  $k = 1$  é composta por dois braços com chaves ativas superiores ( $q_{1a}$  e  $q_{1b}$ ) e chaves ativas complementares inferiores ( $\bar{q}_{1a}$  e  $\bar{q}_{1b}$ ). As cascatas seguintes seguem o mesmo formato das cascatas da configuração 1, formadas por diodos, conectados por uma chave controlada Vienna. A partir de agora, este conversor será denominado de Topologia 2.

Figura 7 – Topologia 2 de retificador multinível unidirecional com 2 células em cascata.



Fonte: Adaptado de Monteiro *et al.* (2024).

## 2.1 Equações do conversor

A equação para o retificador é apresentado na Equação 2.1, sendo  $L_g$  a indutância do indutor de filtro,  $i_g$  a corrente de entrada,  $e_g$  a tensão da fonte senoidal,  $v_g$  a tensão de entrada e  $R_g$  a resistência interna do indutor.

$$L_g \frac{di_g}{dt} + R_g i_g = e_g - v_g \quad (2.1)$$

A tensão  $v_g$  é composta pela soma das tensões de cada célula  $v_s$ , como pode ser visto na Equação 2.2, onde  $s$  representa o índice da célula em cascata, que varia entre 1 e  $k$ .

$$v_g = \sum_{s=1}^k v_s \quad (2.2)$$

A tensão  $v_s$  depende do estado da chave de cada célula, podendo ser igual a 0 quando está aberta e 1 quando está fechada. Além disso, também depende do sentido da corrente  $i_g$ , que pode ser positivo quando  $i_g \geq 0$  e negativo quando  $i_g < 0$ .

Para a topologia 1, a tensão gerada de cada célula  $v_s$  varia conforme a Equação 2.3.

$$v_s = \begin{cases} (1 - q_{st})E_s, & \text{se } i_g \geq 0 \\ -(1 - q_{st})E_s, & \text{se } i_g < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Para a topologia 2, a tensão  $v_s$  depende de qual célula está sendo analisada, pois para  $s = 1$ ,  $v_s$  é calculada de modo diferente por se tratar de uma célula composta apenas por chaves. Enquanto para células  $s \geq 2$ , o cálculo de  $v_s$  é o mesmo feito na topologia 1.

$$\begin{aligned} \text{se } i_g \geq 0: \quad v_s &= \begin{cases} (q_{sa} - q_{sb})E_s, & \text{se } s = 1 \\ (1 - q_{st})E_s, & \text{se } s \geq 2. \end{cases} \\ \text{se } i_g < 0: \quad v_s &= \begin{cases} (q_{sa} - q_{sb})E_s, & \text{se } s = 1 \\ -(1 - q_{st})E_s, & \text{se } s \geq 2. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.4)$$

## 2.2 Análise simétrica

Nessa seção, serão analisadas as etapas de operação e as tensões geradas para as duas topologias estudadas, considerando que as tensões de barramento das células são iguais a  $E$ , ou seja, a relação de barramentos é de 1 : 1. Para essa seção, será adotado  $E_s = E$ , pois a tensão dos dois barramentos é igual, assim  $E_s = E_1 = E_2 = E$ .

### 2.2.1 Etapas de operação

As etapas de operação da primeira topologia podem ser vistas na Figura 8, considerando os diodos e as chaves ideais. A Figura 8 mostra todas as etapas possíveis considerando que existem 4 possibilidades para cada semiciclo da corrente  $i_g$ . Entretanto, será detalhado a seguir o funcionamento das etapas utilizadas para o espaço de modulação.

Na primeira etapa, ilustrada na Figura 8(a), a corrente  $i_g$  é positiva, as chaves  $q_{1t}$  e  $q_{2t}$  estão abertas então os diodos conduzem. Na célula  $s = 1$ , conduzem os diodos  $D_1$  e  $D_4$ , gerando uma tensão de barramento  $v_1 = E$ . Na célula  $s = 2$ , o funcionamento é similar, com os diodos  $D_5$  e  $D_8$  conduzindo, gerando uma tensão de barramento igual a  $v_2 = E$ .

Na segunda etapa, ilustrada na Figura 8(b), a corrente  $i_g$  ainda é positiva,  $q_{1t}$  permanece aberta enquanto  $q_{2t}$  é fechada. Desse modo, o funcionamento da primeira célula é igual à

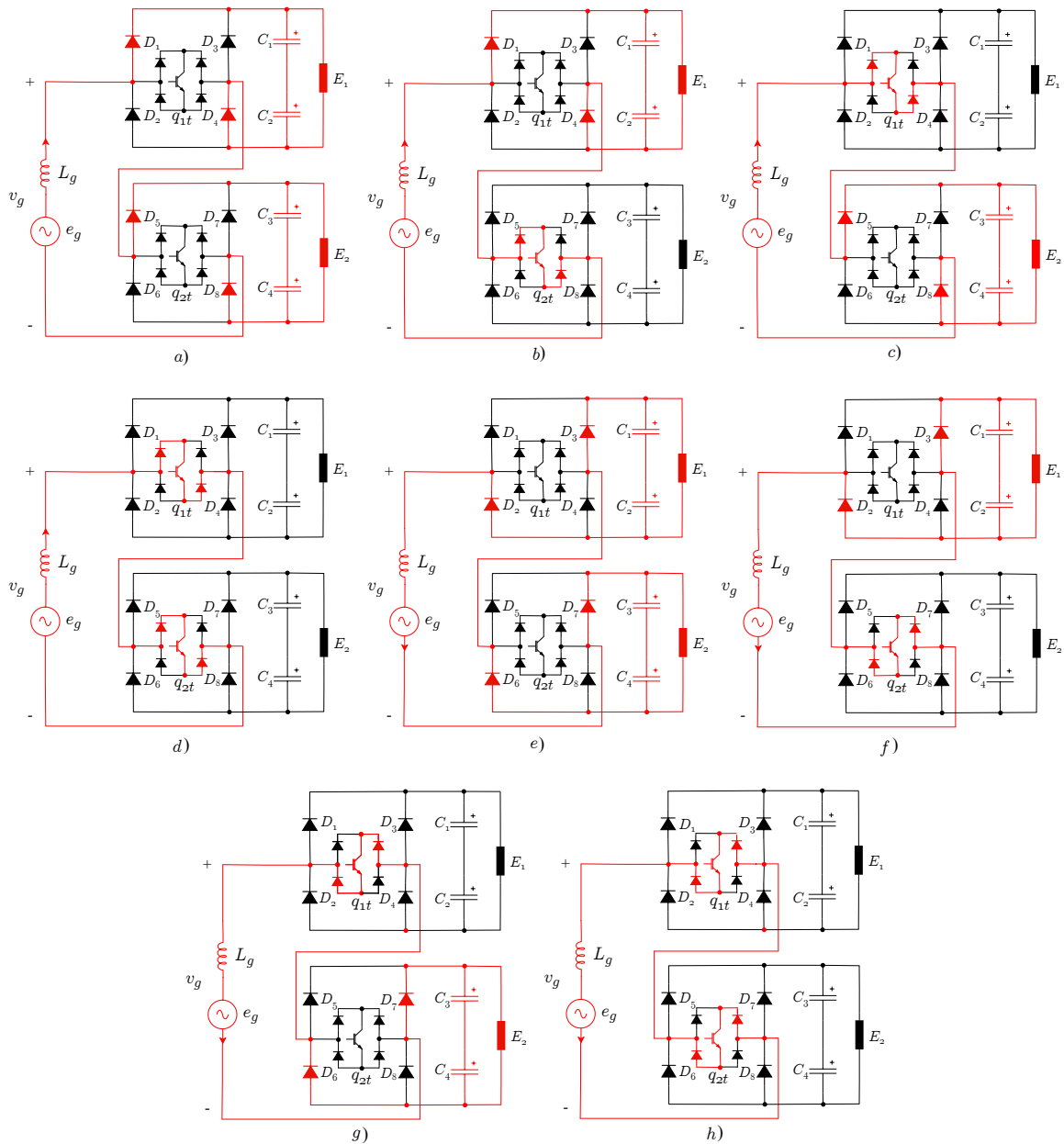
primeira etapa, gerando  $v_1 = E$ . Para a segunda célula, os diodos dos braços deixam de conduzir e a corrente passa pelos diodos da chave Vienna e pelo TBJ, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ . Nota-se que a Figura 8(c) apresenta também  $v_g = E$ , porém a primeira célula gera  $v_1 = 0$  e a segunda célula gera  $v_2 = E$ .

Na terceira etapa, ilustrada na Figura 8(d), a corrente  $i_g$  é nula,  $q_{1t}$  é fechada e  $q_{2t}$  permanece fechada. Desse modo, o funcionamento da primeira célula é alterado, pois os diodos deixam de conduzir e a corrente passa pela chave Vienna, gerando  $v_1 = 0$ . Para a segunda célula, o funcionamento permanece igual ao da segunda etapa, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ . A Figura 8(h) possui o funcionamento similar, com  $v_g = 0$ .

A partir da quarta etapa, ilustrada na Figura 8(g), a corrente  $i_g$  passa a ser negativa, alterando seu sentido e gerando tensões negativas. A chave  $q_{1t}$  continua fechada, porém com  $i_g < 0$ , a corrente passa pelos diodos opostos da chave Vienna na primeira célula, mantendo a tensão de barramento  $v_1 = 0$ . Já na segunda célula, a chave  $q_{2t}$  é aberta e a corrente passa pelos diodos  $D_6$  e  $D_7$ , gerando uma tensão de barramento  $v_2 = -E$ . Nota-se que a Figura 8(f) apresenta também  $v_g = -E$ , porém a primeira célula gera  $v_1 = 0$  e a segunda célula gera  $v_2 = -E$ .

Na quinta etapa, ilustrada na Figura 8(e), a chave  $q_{1t}$  é aberta, de modo que a corrente  $i_g$  passa pelos diodos  $D_2$  e  $D_3$ , gerando a tensão de barramento negativa  $v_1 = -E$ . A chave  $q_{2t}$  mantém-se aberta, como na quarta etapa, o que gera a tensão na célula de  $v_2 = -E$ .

Figura 8 – Etapas de operação de acordo com o estado de chaveamento para topologia 1, quando  $i_g \geq 0$ : (a) [0 0], (b) [0 1], (c) [1 0], (d) [1 1]. Quando  $i_g < 0$ : (e) [0 0], (f) [0 1], (g) [1 0], (h) [1 1]



Fonte: Próprio autor.

Para a topologia 2, o funcionamento da célula  $s = 2$  com chave Vienna é similar à topologia 1. Para a célula de chaves ativas  $s = 1$ , o modo de operação será detalhado a seguir. A corrente  $i_g$  permanece positiva na primeira e segunda etapas, nula na terceira etapa e negativa na quarta e quinta etapas. É importante ressaltar que a célula  $s = 1$  é composta por duas chaves  $q_{1a}$  e  $q_{1b}$ , além de suas chaves complementares  $\bar{q}_{1a}$  e  $\bar{q}_{1b}$ . Do mesmo modo, as Figuras 9 e 10 mostram todas as etapas de operação, considerando 8 possibilidades para cada semiciclo da

corrente  $i_g$ , sendo a Figura 9 o funcionamento para  $i_g \geq 0$  e a Figura 10 para  $i_g < 0$ .

Na primeira etapa, ilustrada na Figura 9(e), a chave  $q_{1a}$  está fechada e  $q_{1b}$  está aberta, logo  $\bar{q}_{1a}$  está aberta e  $\bar{q}_{1b}$  está fechada. Na célula  $s = 1$ , a corrente  $i_g$  passa pelo diodo antiparalelo de  $q_{1a}$ , pelos capacitores  $C_1$  e  $C_2$  e pela chave  $\bar{q}_{1b}$ , gerando uma tensão de barramento  $v_1 = E$ . Na célula  $s = 2$ , os diodos  $D_5$  e  $D_8$  conduzem, gerando uma tensão de barramento igual a  $v_2 = E$ .

Na segunda etapa, ilustrada na Figura 9(a), a corrente  $i_g$  ainda é positiva, porém a chave  $q_{1a}$  é aberta e sua chave complementar  $\bar{q}_{1a}$  é fechada, enquanto a chave  $q_{1b}$  continua aberta, fazendo a corrente  $i_g$  fluir por  $\bar{q}_{1a}$ , não passando pelos capacitores, gerando uma tensão de barramento  $v_1 = 0$ . Na célula  $s = 2$ , o funcionamento é igual a da primeira etapa, com os diodos  $D_5$  e  $D_8$  conduzindo, resultando em uma tensão de barramento igual a  $v_2 = E$ . Nota-se que a Figura 9(g) possui o mesmo funcionamento dessa etapa, gerando  $v_1 = 0$  e  $v_2 = E$ .

Na terceira etapa, ilustrada na Figura 9(b), a corrente  $i_g$  é nula, a célula  $s = 1$  funciona de mesmo modo ao da segunda etapa, mantendo a tensão de barramento  $v_1 = 0$ . Para a segunda célula, a chave Vienna  $q_{2t}$  é fechada e passa a conduzir, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ . Nota-se que as Figuras 9(h) possui o mesmo funcionamento dessa etapa, gerando  $v_1 = 0$  e  $v_2 = 0$ , resultando em  $v_g = 0$ . Além disso, a etapa ilustrada pela Figura 9(c) também gera  $v_g = 0$ , porém com  $v_1 = -E$  e  $v_2 = E$ .

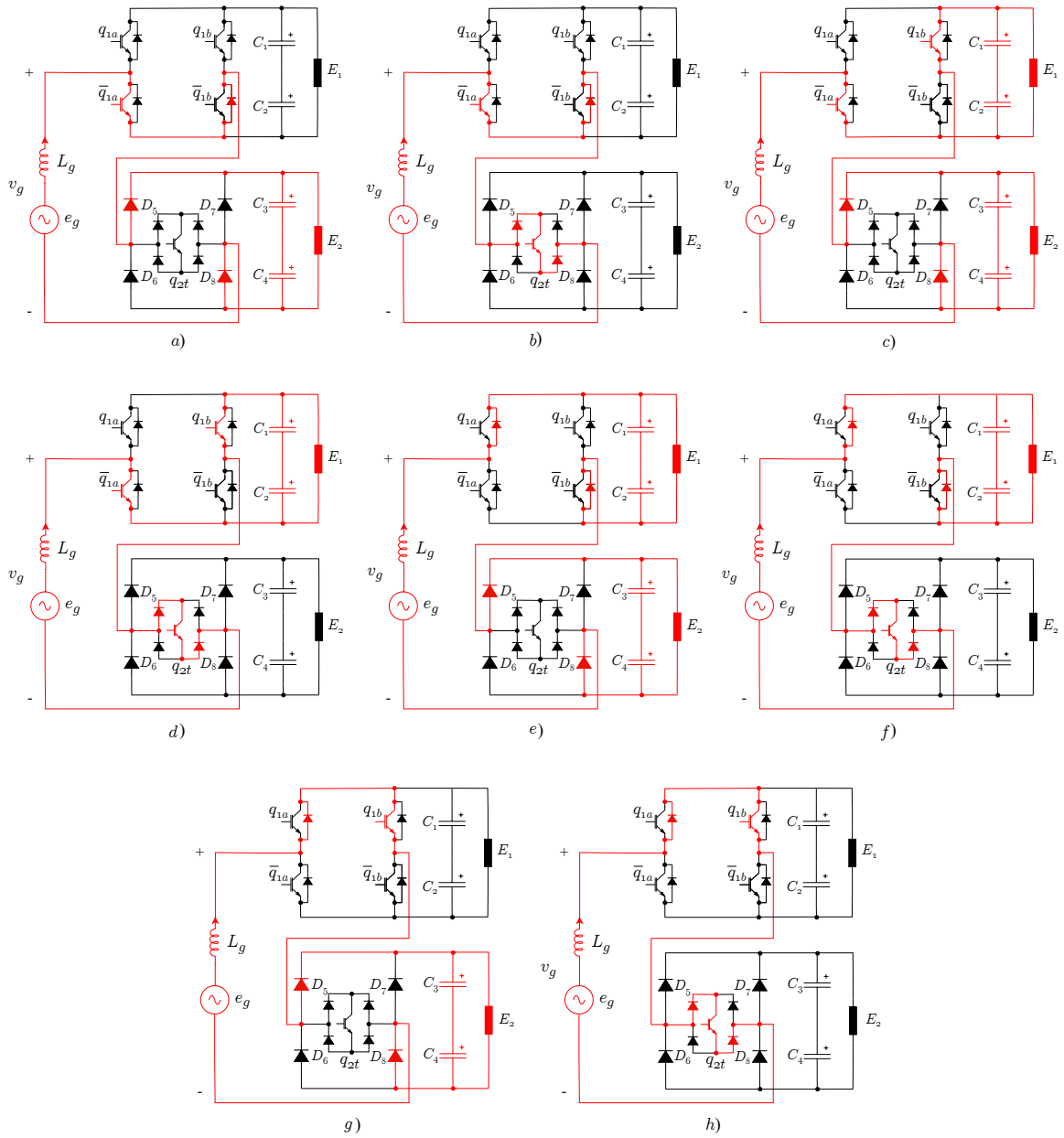
As etapas ilustradas pelas Figuras 9(d) e 9(f) apresentam  $v_g = E$ , porém com  $v_1 = E$  e  $v_2 = 0$ , diferente da segunda etapa mencionada anteriormente.

As Figuras 10(b) e 10(h) apresentam funcionamento similar ao descrito na terceira etapa, gerando  $v_g = 0$ , porém com  $i_g < 0$ , por isso não serão detalhadas. A Figura 10(e) também apresenta  $v_g = 0$  similar à Figura 9(c), com  $v_1 = E$  e  $v_2 = 0$ .

Na quarta etapa, ilustrada na Figura 10(d), com a corrente  $i_g$  negativa, mudando o sentido da corrente. Para a primeira célula, a corrente  $i_g$  flui pelos diodos antiparalelos das chaves  $\bar{q}_{1a}$  e  $q_{1b}$ , resultando na tensão de barramento  $v_1 = -E$ . Já na segunda célula, a chave  $q_{2t}$  continua fechada, como na terceira etapa, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ . A Figura 10(f) apresenta o mesmo funcionamento, com  $v_1 = -E$  e  $v_2 = 0$ , resultando em  $v_g = -E$ . Já a Figura 10(a) apresenta um funcionamento similar com  $v_g = -E$ , porém com  $v_1 = 0$  e  $v_2 = -E$ .

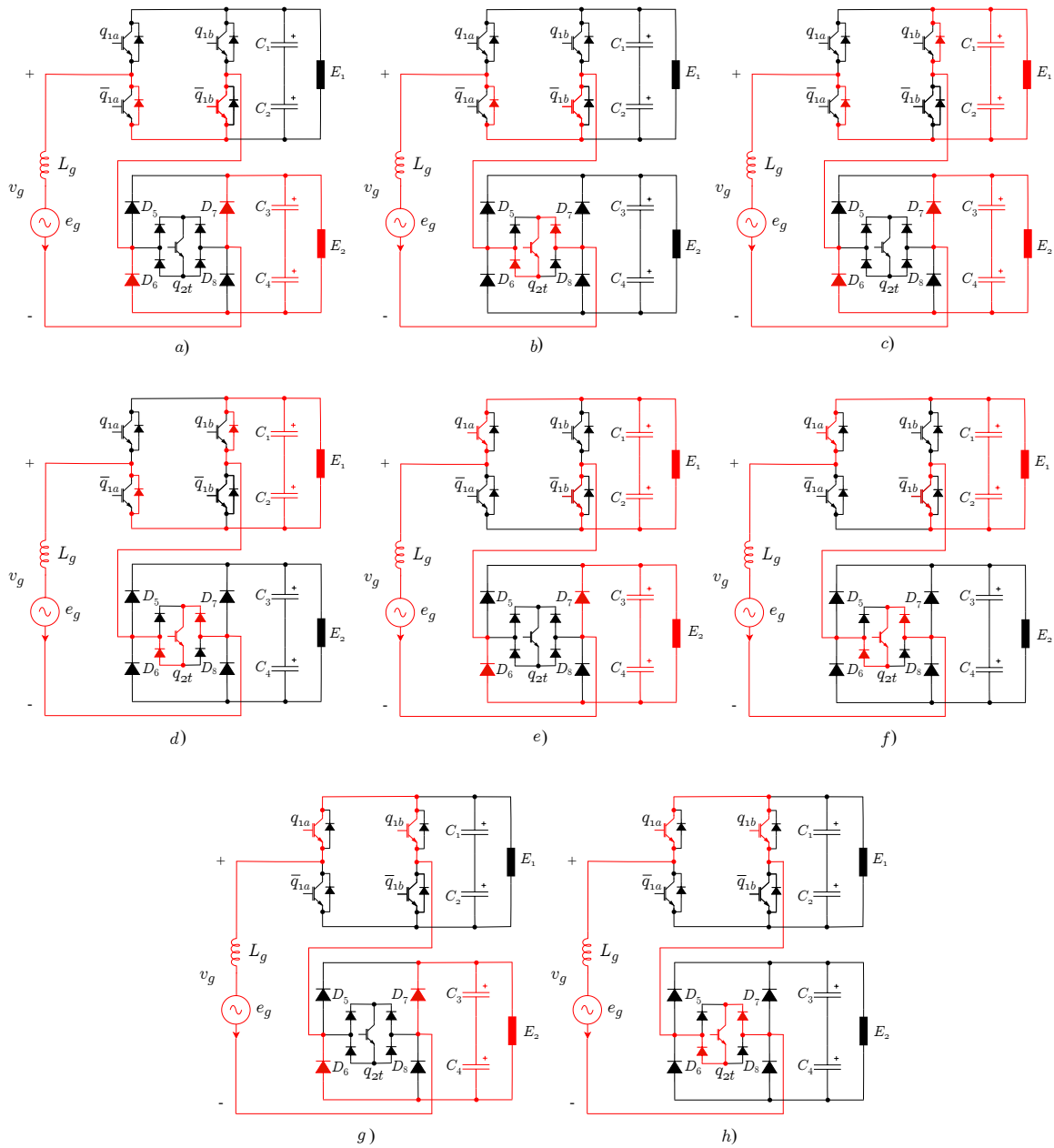
Na quinta etapa, ilustrada na Figura 10(c), a célula  $s = 1$  funciona do mesmo modo à quarta etapa, gerando a tensão de barramento negativa  $v_1 = -E$ . a segunda célula, a chave  $q_{2t}$  é aberta e a corrente passa pelos diodos  $D_6$  e  $D_7$ , gerando uma tensão de barramento  $v_2 = -E$ .

Figura 9 – Etapas de operação de acordo com o estado de chaveamento para topologia 2, quando  $i_g \geq 0$ : (a) [0 0 0], (b) [0 0 1], (c) [0 1 0], (d) [0 1 1], (e) [1 0 0], (f) [1 0 1] (g) [1 1 0], (h) [1 1 1]



Fonte: Próprio autor.

Figura 10 – Etapas de operação de acordo com o estado de chaveamento para topologia 2, quando  $i_g < 0$ : (a) [0 0 0], (b) [0 0 1], (c) [0 1 0], (d) [0 1 1], (e) [1 0 0], (f) [1 0 1] (g) [1 1 0], (h) [1 1 1]



Fonte: Próprio autor.

### 2.2.2 Tensões geradas

De acordo com as etapas de operação e observando o estado de cada chave para cada etapa, é possível gerar uma tabela para todos os possíveis estados de chaveamento e as respectivas tensões em cada caso, que varia de acordo com a quantidade de chaves. A Tabela 1 apresenta todos os estados possíveis para as chaves  $q_{1t}$  e  $q_{2t}$ , para a corrente  $i_g$  positiva e negativa.

A coluna  $v_g$  mostra a soma das tensões das duas células  $v_1$  e  $v_2$ .

Tabela 1 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 1 simétrica com 2 células em cascata

	$[q_{1t} \ q_{2t}]$	$v_1$	$v_2$	$v_g = v_1 + v_2$	$v_g$
$i_g \geq 0$	[0 0]	$E$	$E$	$E + E$	$2E$
	[0 1]	$E$	0	$E$	$E$
	[1 0]	0	$E$	$E$	$E$
	[1 1]	0	0	0	0
$i_g < 0$	[0 0]	$-E$	$-E$	$-E - E$	$-2E$
	[0 1]	$-E$	0	$-E$	$-E$
	[1 0]	0	$-E$	$-E$	$-E$
	[1 1]	0	0	0	0

Fonte: Próprio autor.

Do mesmo modo, a Tabela 2 mostra todos os estados de chaveamento das chaves  $q_{1a}$ ,  $q_{1b}$  e  $q_{2t}$ , além do somatório das tensões dos dois barramentos  $v_1$  e  $v_2$ .

Tabela 2 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 2 simétrica com 2 células em cascata

	$[q_{a1} \ q_{1b} \ q_{2t}]$	$v_1$	$v_2$	$v_g = v_1 + v_2$	$v_g$
$i_g \geq 0$	[0 0 0]	0	$E$	$E$	$E$
	[0 0 1]	0	0	0	0
	[0 1 0]	$-E$	$E$	$-E + E$	0
	[0 1 1]	$-E$	0	$-E$	$-E$
	[1 0 0]	$E$	$E$	$E + E$	$2E$
	[1 0 1]	$E$	0	$E$	$E$
	[1 1 0]	0	$E$	$E$	$E$
	[1 1 1]	0	0	0	0
$i_g < 0$	[0 0 0]	0	$-E$	$-E$	$-E$
	[0 0 1]	0	0	0	0
	[0 1 0]	$-E$	$-E$	$-E - E$	$-2E$
	[0 1 1]	$-E$	0	$-E$	$-E$
	[1 0 0]	$E$	$-E$	$E - E$	0
	[1 0 1]	$E$	0	$E$	$E$
	[1 1 0]	0	$-E$	$-E$	$-E$
	[1 1 1]	0	0	0	0

Fonte: Próprio autor.

## 2.3 Análise assimétrica

Nessa seção, serão analisadas as etapas de operação e as tensões geradas para as duas topologias estudadas, buscando a assimetria dos barramentos para sintetizar um número maior de níveis de tensão. Logo, são consideradas tensões de barramento das células iguais a  $E_1$  para a primeira célula e  $E_2$  para a segunda célula, e a relação de barramentos é de 1 : 2 na topologia 1 e 1 : 3 na topologia 2, ou seja,  $E_2 = 2E_1$  para a topologia 1 e  $E_2 = 3E_1$  para a topologia 2.

### 2.3.1 Etapas de operação

As etapas de operação da primeira configuração podem ser vistas na Figura 8, pois o funcionamento é o mesmo do modo simétrico, a diferença consiste apenas na relação dos barramentos que gera possibilidades diferentes na soma das tensões das células  $v_g$ .

Na primeira etapa, ilustrada na Figura 8(a), a corrente  $i_g$  é positiva, as chaves  $q_{1t}$  e  $q_{2t}$  estão abertas então os diodos conduzem. Na célula  $s = 1$ , conduzem os diodos  $D_1$  e  $D_4$ , gerando uma tensão de barramento  $v_1 = E_1$ . Na célula  $s = 2$ , o funcionamento é similar, com os diodos  $D_5$  e  $D_8$  conduzindo, gerando uma tensão de barramento igual a  $v_2 = E_2$ , ou seja,  $v_2 = 2E_1$ .

Na segunda etapa, ilustrada na Figura 8(c), a corrente  $i_g$  ainda é positiva,  $q_{1t}$  é fechada enquanto  $q_{2t}$  permanece aberta. Para a primeira célula, os diodos dos braços deixam de conduzir e a corrente passa pelos diodos da chave Vienna e pelo TBJ, gerando uma tensão de barramento  $v_1 = 0$ . Continuamente, o funcionamento da segunda célula é igual à primeira etapa, gerando  $v_2 = 2E_1$ .

Na terceira etapa, ilustrada na Figura 8(b), a corrente  $i_g$  continua positiva,  $q_{1t}$  é aberta e  $q_{2t}$  é fechada. Desse modo, na primeira célula, os diodos  $D_1$  e  $D_4$  conduzem, gerando uma tensão de barramento  $v_1 = E_1$ , enquanto que na segunda célula, os diodos dos braços deixam de conduzir e a corrente passa pelos diodos da chave Vienna e pelo TBJ, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ .

Na quarta etapa, ilustrada na Figura 8(d), a corrente  $i_g$  é nula,  $q_{1t}$  é fechada e  $q_{2t}$  permanece fechada, similar a terceira etapa na análise simétrica da mesma configuração. Desse modo, o funcionamento da primeira célula é alterado, pois os diodos deixam de conduzir e a corrente passa pela chave Vienna, gerando  $v_1 = 0$ . Para a segunda célula, o funcionamento permanece igual ao da segunda etapa, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ . Nota-se que a

Figura 8(h) possui o mesmo funcionamento, gerando  $v_1 = 0$  e  $v_2 = 0$ .

A partir da quinta etapa, ilustrada na Figura 8(f), a corrente  $i_g$  passa a ser negativa, alterando seu sentido e gerando tensões negativas. A chave  $q_{1t}$  é aberta, porém com  $i_g < 0$ , a corrente passa pelos diodos  $D_2$  e  $D_3$  na primeira célula, resultando na tensão de barramento de  $v_1 = -E_1$ . Já na segunda célula, a chave  $q_{2t}$  permanece fechada e a corrente passa pela chave Vienna, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ .

Na sexta etapa, ilustrada na Figura 8(g), a chave  $q_{1t}$  é fechada e a chave  $q_{2t}$  é aberta, de modo que a corrente  $i_g$  passa pela chave Vienna, gerando  $v_1 = 0$ . Para a segunda célula, a corrente passa pelos diodos  $D_6$  e  $D_7$ , o que gera a tensão na célula de  $v_2 = -E_2$ , ou seja,  $v_2 = -2E_1$ .

Na última etapa, ilustrada na Figura 8(e), a chave  $q_{1t}$  é aberta, assim, a corrente  $i_g$  passa pelos diodos  $D_2$  e  $D_3$ , resultando numa tensão de barramento de  $v_1 = -E_1$ . Para a segunda célula, a chave  $q_{2t}$  permanece fechada, similar à sexta etapa, gerando uma tensão de barramento de  $v_2 = -2E_1$ .

Para a configuração 2, o funcionamento da célula  $s = 2$  com chave Vienna é similar à configuração 1, como já foi visto. Entretanto, considerando a assimetria das tensões de barramento, a segunda célula resultará em 3 possíveis valores de tensão:  $3E_1$ ,  $0$  e  $-3E_1$ . Aqui a relação de  $E_1 : E_2$  é igual a  $1 : 3$ , pois assim é possível gerar mais níveis comparado a uma relação de  $1 : 2$ .

Para a célula de chaves ativas  $s = 1$ , o modo de operação será detalhado a seguir, sendo similar ao modo simétrico. A corrente  $i_g$  permanece positiva na primeira, segunda, terceira e quarta etapas, nula na quinta etapa e negativa na últimas 4 etapas.

Na primeira etapa, ilustrada na Figura 9(e), a chave  $q_{1a}$  está fechada e  $q_{1b}$  está aberta, logo  $\bar{q}_{1a}$  está aberta e  $\bar{q}_{1b}$  está fechada. Na célula  $s = 1$ , a corrente  $i_g$  passa pelo diodo antiparalelo de  $q_{1a}$ , pelos capacitores  $C_1$  e  $C_2$  e pela chave  $\bar{q}_{1b}$ , gerando uma tensão de barramento  $v_1 = E_1$ . Na célula  $s = 2$ , a chave  $q_{2t}$  está aberta e os diodos  $D_5$  e  $D_8$  conduzem, gerando uma tensão de barramento igual a  $v_2 = E_2$ , ou seja,  $v_2 = 3E_1$ .

Na segunda etapa, ilustrada na Figura 9(a), a corrente  $i_g$  é positiva, porém a chave  $q_{1a}$  é aberta e sua chave complementar  $\bar{q}_{1a}$  é fechada, enquanto a chave  $q_{1b}$  continua aberta, fazendo a corrente  $i_g$  fluir por  $\bar{q}_{1a}$ , não passando pelos capacitores, gerando uma tensão de barramento  $v_1 = 0$ . Na célula  $s = 2$ , o funcionamento é igual a da primeira etapa, com os diodos  $D_5$  e  $D_8$  conduzindo, resultando em uma tensão de barramento igual a  $v_2 = 3E_1$ . A Figura 9(g) apresenta

o mesmo funcionamento da quarta etapa, gerando  $v_1 = 0$  e  $v_2 = 3E_1$ .

Na terceira etapa, ilustrada na Figura 9(c), com a corrente positiva  $i_g$ , a chave  $q_{1a}$  continua aberta e  $q_{1b}$  é fechada, fazendo com que a corrente não circule pelos capacitores  $C_1$  e  $C_2$ , porém no sentido oposto ao anterior, resultando em uma tensão de barramento  $v_1 = -E_1$ . Para a segunda célula, o funcionamento permanece igual ao das etapas anteriores.

Na quarta etapa, ilustrada na Figura 9(f), ainda com a corrente sendo positiva, a chave  $q_{1a}$  é fechada enquanto a chave  $q_{1b}$  é aberta, invertendo novamente o sentido da corrente, gerando uma tensão de barramento de  $v_1 = E_1$ . Na segunda célula, a chave  $q_{2t}$  é fechada, os diodos param de conduzir, fazendo com que a corrente  $i_g$  circule pelos diodos da chave Vienna, resultando em uma tensão de barramento nula  $v_2 = 0$ . A Figura 10(f) apresenta o mesmo funcionamento da quarta etapa, gerando  $v_1 = E_1$  e  $v_2 = 0$ .

Na quinta etapa, ilustrada na Figura 9(b), a corrente  $i_g$  é nula; a célula  $s = 1$  funciona da mesma forma que a da segunda etapa, mantendo a tensão de barramento  $v_1 = 0$ . Na primeira célula, a chave  $q_{1a}$  é aberta e a chave  $q_{1b}$  permanece aberta, fazendo com que a corrente  $i_g$  não passe pelos capacitores, anulando a tensão de barramento  $v_1 = 0$ . Para a segunda célula, a chave Vienna  $q_{2t}$  continua fechada, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ . As Figuras 9(h), 10(b) e 10(h) apresentam o mesmo funcionamento da quinta etapa, gerando  $v_1 = 0$  e  $v_2 = 0$ .

Na sexta etapa, ilustrada na Figura 10(d), com a corrente  $i_g$  negativa, alterando o sentido da corrente. Para a primeira célula, a corrente  $i_g$  flui pelos diodos antiparalelos das chaves  $\bar{q}_{1a}$  e  $q_{1b}$ , pois a chave  $q_{1a}$  continua aberta e a chave  $q_{1b}$  é fechada, resultando na tensão de barramento  $v_1 = -E_1$ . Já na segunda célula, a chave  $q_{2t}$  continua fechada, como na terceira etapa, gerando uma tensão de barramento  $v_2 = 0$ . A Figura 9(d) apresenta o mesmo funcionamento da sexta etapa, gerando  $v_1 = -E_1$  e  $v_2 = 0$ .

Para a sétima etapa, ilustrada na Figura 10(e), ocorre de modo similar a terceira etapa. Na primeira célula, a chave  $q_{1a}$  é fechada e a chave  $q_{1b}$  é aberta, o que gera uma tensão de barramento positiva  $v_1 = E_1$ . Para a segunda célula, a chave  $q_{2t}$  é aberta, e a corrente circula pelos capacitores  $C_3$  e  $C_4$ , transformando a tensão  $v_2 = -3E_1$ .

Na oitava etapa, ilustrada na Figura 10(a), o funcionamento da segunda célula é idêntico ao anterior, gerando a tensão de barramento  $v_2 = 3E_1$ . Na primeira célula, a chave  $q_{1a}$  é aberta e  $q_{1b}$  continua fechada, resultando na tensão de barramento  $v_1 = 0$ . A Figura 10(g) apresenta o mesmo funcionamento da oitava etapa, gerando  $v_1 = 0$  e  $v_2 = 3E_1$ .

Na nona etapa, ilustrada na Figura 10(c), a célula  $s = 1$  funciona do mesmo modo

à quarta etapa, gerando a tensão de barramento negativa  $v_1 = -E_1$ . a segunda célula, a chave  $q_{2t}$  continua aberta e a corrente passa pelos diodos  $D_6$  e  $D_7$ , gerando uma tensão de barramento  $v_2 = -E_2 = -3E_1$ .

### 2.3.2 Tensões geradas

A Tabela 2 apresenta todos os estados possíveis para as chaves  $q_{1t}$  e  $q_{2t}$ , para a corrente  $i_g$  positiva e negativa. A coluna  $v_g$  mostra a soma das tensões das duas células  $v_1$  e  $v_2$ .

Tabela 3 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 1 assimétrica com 2 células em cascata

	$[q_{1t} \ q_{2t}]$	$v_1$	$v_2$	$v_g = v_1 + v_2$	$v_g$
$i_g \geq 0$	[0 0]	$E_1$	$E_2 = 2E_1$	$E_1 + 2E_1$	$3E_1$
	[0 1]	$E_1$	0	$E_1$	$E_1$
	[1 0]	0	$E_2 = 2E_1$	$2E_1$	$2E_1$
	[1 1]	0	0	0	0
$i_g < 0$	[0 0]	$-E_1$	$-E_2 = -2E_1$	$-E_1 - 2E_1$	$-3E_1$
	[0 1]	$-E_1$	0	$-E_1$	$-E_1$
	[1 0]	0	$-E_2 = -2E_1$	$-2E_1$	$-2E_1$
	[1 1]	0	0	0	0

Fonte: Próprio autor.

Da mesma maneira, a Tabela 2 mostra todos os estados de chaveamento das chaves  $q_{1a}$ ,  $q_{1b}$  e  $q_{2t}$ , além do somatório das tensões dos dois barramentos  $v_1$  e  $v_2$ .

Tabela 4 – Estados de chaveamento e tensões correspondentes a configuração 2 assimétrica com 2 células em cascata

	$[q_{a1} \ q_{1b} \ q_{2t}]$	$v_1$	$v_2$	$v_g = v_1 + v_2$	$v_g$
$i_g \geq 0$	[0 0 0]	0	$E_2 = 3E_1$	$3E_1$	$3E_1$
	[0 0 1]	0	0	0	0
	[0 1 0]	$-E_1$	$E_2 = 3E_1$	$-E_1 + 3E_1$	$2E_1$
	[0 1 1]	$-E_1$	0	$-E_1$	$-E_1$
	[1 0 0]	$E_1$	$E_2 = 3E_1$	$E_1 + 3E_1$	$4E_1$
	[1 0 1]	$E_1$	0	$E_1$	$E_1$
	[1 1 0]	0	$E_2 = 3E_1$	$3E_1$	$3E_1$
	[1 1 1]	0	0	0	0
$i_g < 0$	[0 0 0]	0	$-E_2 = -3E_1$	$-3E_1$	$-3E_1$
	[0 0 1]	0	0	0	0
	[0 1 0]	$-E_1$	$-E_2 = -3E_1$	$-E_1 - 3E_1$	$-4E_1$
	[0 1 1]	$-E_1$	0	$-E_1$	$-E_1$
	[1 0 0]	$E_1$	$-E_2 = -3E_1$	$E_1 - 3E_1$	$-2E_1$
	[1 0 1]	$E_1$	0	$E_1$	$E_1$
	[1 1 0]	0	$-E_2 = -3E_1$	$-3E_1$	$-3E_1$
	[1 1 1]	0	0	0	0

Fonte: Próprio autor.

Ao comparar as Tabelas 1 e 3, nota-se que apesar de ser o mesmo circuito, as combinações de chaveamento geram a tensão  $v_g$  diferente pois as tensões de barramento podem alternar entre  $-3E_1$ ,  $-E_1$ , 0,  $E_1$  e  $3E_1$ . O mesmo é perceptível ao comparar as Tabelas 2 e 4.

### 3 MODULAÇÃO E CONTROLE

Nesse capítulo serão abordadas as técnicas de modulação por largura de pulso (PWM) e o controle da corrente de entrada  $i_g$ .

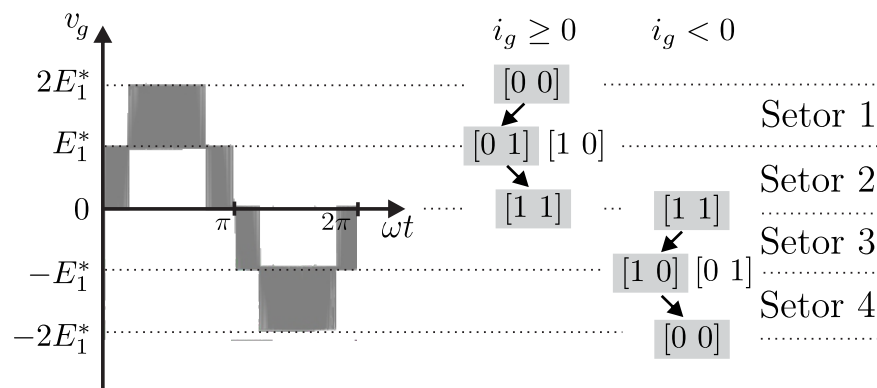
#### 3.1 Estratégia de modulação

A técnica de modulação adotada nesse trabalho tem como objetivo sintetizar a tensão de entrada do retificador multinível de forma a garantir elevada qualidade da forma de onda ao mesmo tempo em que possibilita o controle adequado da corrente de entrada para a correção do fator de potência. A estratégia empregada baseia-se na utilização de funções de razão cíclica, de modo a aplicar uma tensão média no lado CA do retificador proporcional à referência de tensão  $v_g^*$ , em que o \* se refere a uma variável de referência.

Considerando que o retificador é capaz de sintetizar  $N_l$  níveis de tensão distintos na entrada, o intervalo total da referência  $v_g^*$  é dividido em  $N_l - 1$  setores.

As Figuras 11 e 12 mostram o espaço de modulação para a configuração 1 e para a configuração 2, no modo simétrico, respectivamente. Cada célula é capaz de sintetizar três níveis de tensão ( $-E_s, 0, E_s$ ) para a configuração simétrica e a combinação das células resulta em múltiplos níveis igualmente espaçados na tensão de entrada. De acordo com as Tabelas da seção anterior, foi considerado os estados com menos chaveamentos possíveis a fim de diminuir as perdas nas chaves. As Figuras mostram os semiciclos positivos e negativos, além dos valores máximo e mínimo da tensão  $v_g$  para cada setor.

Figura 11 – Espaço de modulação para a configuração 1 no modo simétrico.

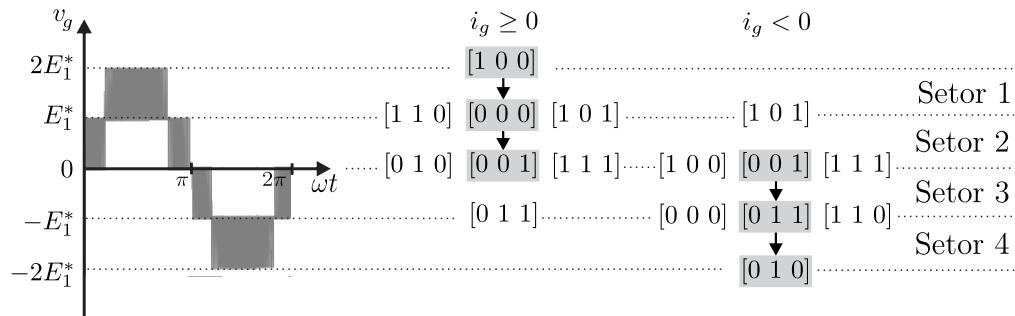


Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado nas Figuras 11 e 12, as topologias 1 e 2, operando no

modo simétrico, são capazes de gerar cinco níveis de tensão.

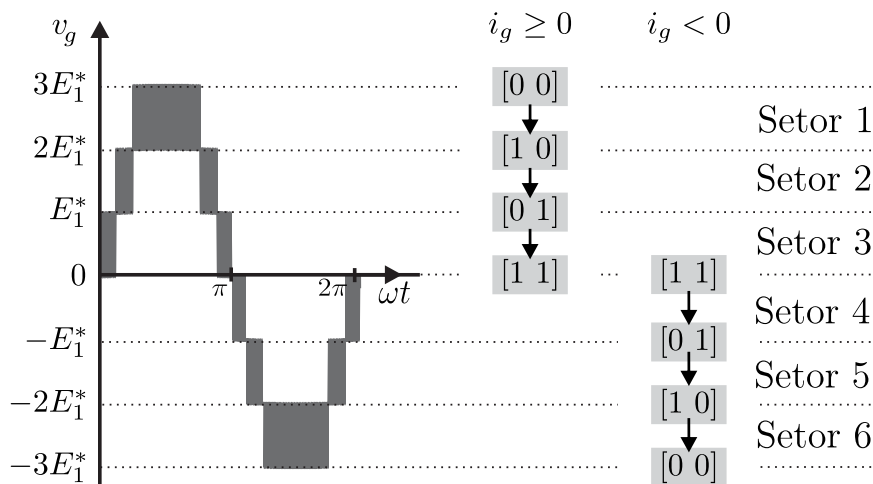
Figura 12 – Espaço de modulação para a configuração 2 no modo simétrico.



Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 13 e 14 são representadas o espaço de modulação para a configuração 1 e para a configuração 2, no modo assimétrico. Para esse modo, na configuração 1, as células assumem níveis de tensão diferentes que resultam em combinações diferentes para sintetizar o maior número de níveis.

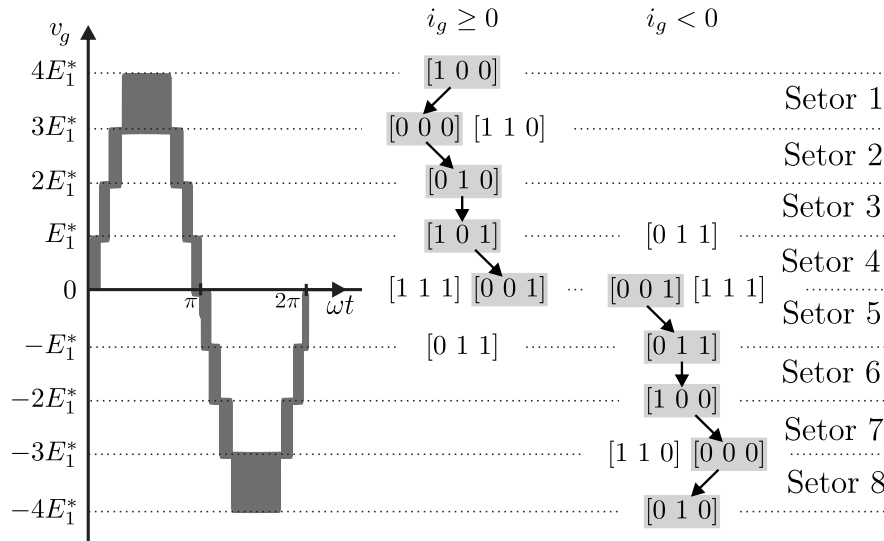
Figura 13 – Espaço de modulação para a configuração 1 no modo assimétrico.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado, a topologia 1 apresentada na Figura 13, operando no modo assimétrico, é capaz de gerar até 7 níveis de tensão. Enquanto isso, a configuração 2, apresentada na 14, pode gerar até 9 níveis de tensão operando no modo assimétrico.

Figura 14 – Espaço de modulação para a configuração 2 no modo assimétrico.



Fonte: Próprio autor.

Cada setor é delimitado por dois níveis adjacentes de tensão, sendo um superior  $v_{g,hig}^*$  e um inferior  $v_{g,low}^*$ , de forma que:

$$v_{g,low}^* \leq v_g^* < v_{g,hig}^* \quad (3.1)$$

A estratégia de modulação utilizada para gerar as razões cíclicas das chaves é por largura de pulso. Dentro de cada setor, os estados de comutação são alternados de modo a produzir, em média, a tensão de referência desejada. As razões cíclicas associadas às chaves controladas são então calculadas com base na posição instantânea da referência  $v_g^*$  dentro do setor correspondente, sendo normalizadas no intervalo entre 0 e 1.

A razão cíclica de cada chave é calculada com base na Equação 3.2. É importante destacar que, devido à presença de dispositivos semicontrolados (diodos) nas células do tipo Vienna, a tensão sintetizada por cada célula depende do sentido da corrente de entrada  $i_g$ . Dessa forma, a modulação considera explicitamente o sinal da corrente, resultando em setores distintos para  $i_g \geq 0$  e  $i_g < 0$ .

$$d_{sx} = \begin{cases} 1, & \text{se } q_{sx} = 1 \rightarrow q_{sx} = 1 \therefore \phi_{sx} = 0 \\ \frac{v_g^* - v_{g,low}^*}{v_{g,hig}^* - v_{g,low}^*}, & \text{se } q_{sx} = 1 \rightarrow q_{sx} = 0 \therefore \phi_{sx} = 0 \\ 0, & \text{se } q_{sx} = 0 \rightarrow q_{sx} = 0 \therefore \phi_{sx} = 0 \\ \frac{v_{g,hig}^* - v_g^*}{v_{g,hig}^* - v_{g,low}^*}, & \text{se } q_{sx} = 0 \rightarrow q_{sx} = 1 \therefore \phi_{sx} = 180^\circ. \end{cases} \quad (3.2)$$

Para a configuração 1, composta exclusivamente por células do tipo Vienna em cascata, a Tabela 5 apresenta os setores de operação, os estados de comutação correspondentes, bem como as expressões utilizadas para o cálculo das razões cíclicas e os defasamentos das portadoras. As razões cíclicas associadas às chaves controladas  $q_{st}$  são determinadas a partir da referência de tensão  $v_g^*$  considerando os setores definidos pelo arranjo das tensões do barramento CC.

Tabela 5 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 1 simétrica com 2 células em cascata

	<b>Sector</b>	$V_{g,low}^* \leq v_g^* < V_{g,hig}^*$	<b>Transição</b>	$d_{1t}$	$d_{2t}$	$\phi_{1t}$	$\phi_{2t}$
$i_g \geq 0$	1	$E^* \leq v_g^*$	[0 0] → [0 1]	0	$2 - v_g^*/E^*$	0°	180°
	2	$0 \leq v_g^* < E^*$	[0 1] → [1 1]	$1 - v_g^*/E^*$	1	180°	0°
$i_g < 0$	3	$-E^* \leq v_g^* < 0$	[1 1] → [1 0]	1	$1 + v_g^*/E^*$	0°	0°
	4	$v_g^* < -E^*$	[1 0] → [0 0]	$2 + v_g^*/E^*$	0	0°	0°

Fonte: Próprio autor.

O uso de portadoras defasadas entre as células contribui para a redução da ondulação na tensão sintetizada e melhora a distribuição espectral dos harmônicos, resultando em menor distorção harmônica total. Além disso, essa abordagem permite que o número de comutações por chave seja mantido relativamente baixo, favorecendo a eficiência do conversor.

A modulação da célula em ponte completa é realizada a partir das razões cíclicas associadas às chaves  $q_{1a}$  e  $q_{1b}$  enquanto as células Vienna utilizam as chaves  $q_{st}$ . Assim como na configuração 1, o cálculo das razões cíclicas depende do setor em que a referência  $v_g^*$  se encontra e do sentido da corrente de entrada.

A Tabela 6 apresenta os setores de operação, os estados de comutação e as expressões das razões cíclicas para a configuração 2. Observa-se que a presença da ponte completa permite maior flexibilidade na síntese da tensão de entrada, o que contribui para a obtenção de uma forma de onda com menor conteúdo harmônico.

Tabela 6 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 1 simétrica com 2 células em cascata

	Setor	$V_{g,low}^* \leq v_g^* < V_{g,hig}^*$	Transição	$d_{1a}$	$d_{1b}$	$d_{2t}$	$\phi_{1a}$	$\phi_{1b}$	$\phi_{2t}$
$i_g \geq 0$	1	$E^* \leq v_g^*$	$[1\ 0\ 0] \rightarrow [0\ 0\ 0]$	$-1 + v_g^*/E^*$	0	0	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
	2	$0 \leq v_g^* < E^*$	$[0\ 0\ 0] \rightarrow [0\ 0\ 1]$	0	0	$-v_g^*/E^*$	$0^\circ$	$0^\circ$	$180^\circ$
$i_g < 0$	3	$-E^* \leq v_g^* < 0$	$[0\ 0\ 1] \rightarrow [0\ 1\ 1]$	0	$1 - v_g^*/E^*$	1	$0^\circ$	$180^\circ$	$0^\circ$
	4	$v_g^* < -E^*$	$[0\ 1\ 1] \rightarrow [0\ 1\ 0]$	0	1	$2 + v_g^*/E^*$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$

Fonte: Próprio autor.

De modo similar, a Tabela 7 apresenta os estados de comutação e as expressões das razões cíclicas para a configuração 1, no modo assimétrico. Nota-se que as células são capazes de sintetizar níveis de tensão diferentes, pois a célula 1 sintetiza três níveis de tensão  $(-E_1, 0, E_1)$  e a célula 2 sintetiza três níveis de tensão distintos  $(-E_2, 0, E_2)$ , em uma razão de 1 : 2, que, quando combinados, resultam em 7 níveis.

Tabela 7 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 1 assimétrica com 2 células em cascata

	Setor	$V_{g,low}^* \leq v_g^* < V_{g,hig}^*$	Transição	$d_{1t}$	$d_{2t}$	$\phi_{1t}$	$\phi_{2t}$
$i_g \geq 0$	1	$2E_1^* \leq v_g^*$	$[0\ 0] \rightarrow [1\ 0]$	$3 - v_g^*/E_1^*$	0	$180^\circ$	$0^\circ$
	2	$E_1^* \leq v_g^* < 2E_1^*$	$[1\ 0] \rightarrow [0\ 1]$	$-1 + v_g^*/E_1^*$	$2 - v_g^*/E_1^*$	$0^\circ$	$180^\circ$
	3	$0 \leq v_g^* < E_1^*$	$[0\ 1] \rightarrow [1\ 1]$	$1 - v_g^*/E_1^*$	1	$180^\circ$	$0^\circ$
$i_g < 0$	4	$-E_1^* \leq v_g^* < 0$	$[1\ 1] \rightarrow [0\ 1]$	$1 + v_g^*/E_1^*$	1	$0^\circ$	$0^\circ$
	5	$-2E_1^* \leq v_g^* < -E_1^*$	$[0\ 1] \rightarrow [1\ 0]$	$-1 - v_g^*/E_1^*$	$2 + v_g^*/E_1^*$	$180^\circ$	$0^\circ$
	6	$v_g^* < -2E_1^*$	$[1\ 0] \rightarrow [0\ 0]$	$3 + v_g^*/E_1^*$	0	$0^\circ$	$0^\circ$

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 8 mostra os setores, os estados de comutação e as razões cíclicas para a configuração 2 no modo assimétrico. Para esse caso, foi considerado uma proporção entre os barramentos CC de 1 : 3, logo, a combinação dos níveis de tensão entre as duas células resultaram em nove níveis.

Tabela 8 – Razão cíclica e fases da portadora correspondentes a configuração 2 assimétrica com 2 células em cascata

	Setor	$V_{g,low}^* \leq v_g^* < V_{g,hig}^*$	Transição	$d_{1a}$	$d_{1b}$	$d_{2t}$	$\phi_{1a}$	$\phi_{1b}$	$\phi_{2t}$
$i_g \geq 0$	1	$3E_1^* \leq v_g^*$	$[1\ 0\ 0] \rightarrow [0\ 0\ 0]$	$-3 + v_g^*/E_1^*$	0	0	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
	2	$2E_1^* \leq v_g^* < 3E_1^*$	$[0\ 0\ 0] \rightarrow [0\ 1\ 0]$	0	$3 - v_g^*/E_1^*$	0	$0^\circ$	$180^\circ$	$0^\circ$
	3	$E_1^* \leq v_g^* < 2E_1^*$	$[0\ 1\ 0] \rightarrow [1\ 0\ 1]$	$2 - v_g^*/E_1^*$	$-1 + v_g^*/E_1^*$	$2 - v_g^*/E_1^*$	$180^\circ$	$0^\circ$	$180^\circ$
	4	$0 \leq v_g^* < E_1^*$	$[1\ 0\ 1] \rightarrow [0\ 0\ 1]$	$v_g^*/E_1^*$	0	1	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
$i_g < 0$	5	$-E^* \leq v_g^* < 0$	$[0\ 0\ 1] \rightarrow [0\ 1\ 1]$	0	$-1 + v_g^*/E_1^*$	1	$0^\circ$	$180^\circ$	$0^\circ$
	6	$-2E_1^* \leq v_g^* < -E^*$	$[0\ 1\ 1] \rightarrow [1\ 0\ 0]$	$-1 - v_g^*/E_1^*$	$2 + v_g^*/E_1^*$	$2 + v_g^*/E_1^*$	$180^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
	7	$-3E_1^* \leq v_g^* < -2E_1^*$	$[1\ 0\ 0] \rightarrow [0\ 0\ 0]$	$3 + v_g^*/E_1^*$	0	0	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
	8	$v_g^* < -3E_1^*$	$[0\ 0\ 0] \rightarrow [0\ 1\ 0]$	0	$-3 - v_g^*/E_1^*$	0	$0^\circ$	$180^\circ$	$0^\circ$

Fonte: Próprio autor.

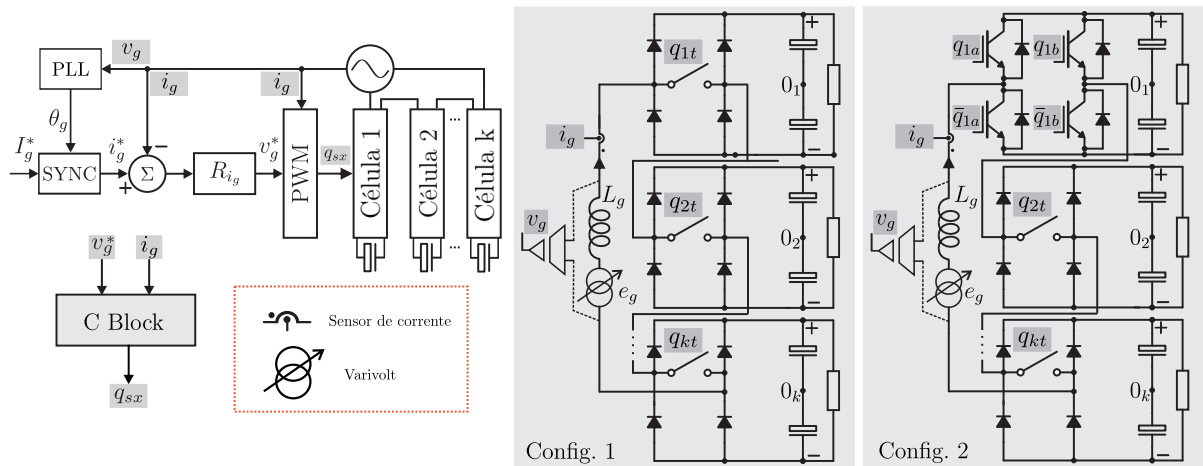
### 3.2 Estratégia de controle

A estratégia de controle adotada tem como principal objetivo garantir a correção do fator de potência, forçando a corrente de entrada  $i_g$  a seguir uma referência senoidal em fase com a tensão da rede elétrica. Para isso, seria necessário um controle em malha dupla, composto por uma malha externa de tensão e uma malha interna de corrente. Entretanto, o objetivo do trabalho é verificar o funcionamento da modulação das configurações estudadas e compará-las com a topologia convencional. Assim, o controle será limitado apenas ao controle da corrente, substituindo o barramento CC por uma fonte de tensão ideal para mantê-la estável.

A malha de corrente compara a corrente de entrada medida com a referência  $i_g^*$  que foi adotada, gerando a referência de tensão  $v_g$  que será utilizada pelo modulador. Dessa forma, o sistema assegura que a corrente de entrada permaneça senoidal e em fase com a tensão da rede, promovendo a correção do fator de potência e reduzindo a distorção harmônica.

A Figura 15 mostra o diagrama de controle adotado para a simulação implementada para as configurações estudadas. O funcionamento inicia-se com a geração da referência de corrente  $i_g^*$ . Para isso, utiliza-se um bloco *Phase-Locked Loop* (PLL) que detecta o ângulo de fase  $\theta_g$  da tensão da rede. Este ângulo é então multiplicado por uma amplitude fixa pré-determinada ( $I_g^*$ ), resultando em uma referência senoidal sincronizada com a rede. Na etapa de realimentação, a corrente de entrada medida ( $i_g$ ) é comparada com essa referência gerada, e o erro resultante ( $\varepsilon = i_g^* - i_g$ ) serve de entrada para um controlador proporcional-integral (PI), representado pelo bloco  $R_{i_g}$ .

Figura 15 – Diagrama de controle geral para as configurações estudadas.



Fonte: Próprio autor.

A função do controlador PI é processar esse erro e gerar como saída a tensão de referência  $v_g^*$  que o retificador deve sintetizar para anulá-lo. Por fim, esse sinal de tensão de referência  $v_g^*$  é enviado para o bloco modulador, identificado como C Block. Este bloco é responsável por executar a lógica da modulação por setores, calculando as razões cíclicas necessárias e gerando os sinais de comando ( $q_{sx}$ ) para as chaves das configurações estudadas. Assim, o sistema assegura que a corrente de entrada permaneça senoidal, com baixa distorção harmônica e fator de potência unitário.

## 4 RESULTADOS

Esse capítulo foi dividido em três análises: análise topológica, análise gráfica e análise de distorção harmônica. Todas as análises foram realizadas em comparação com a topologia convencional, apresentada na Figura 4, por representar uma solução amplamente conhecida na literatura, permitindo avaliar de forma objetiva os ganhos proporcionados pelas topologias multiníveis propostas.

### 4.1 Análise topológica

A análise topológica tem como objetivo comparar as duas configurações estudadas com a topologia convencional, considerando os parâmetros como número de níveis de tensão sintetizados  $N_l$ , número de chaves controladas  $N_{sw}$  e a quantidade de células em cascata  $k$ . Essa análise é apresentada de forma resumida na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação de parâmetros entre as topologias propostas e a convencional para casos simétricos e assimétricos

		<b>Topologia 1</b>	<b>Topologia 2</b>	<b>Convencional</b>
Simétrico	$N_l$	$2k + 1$	$2k + 1$	$2k + 1$
	$N_{sw}$	$k$	$k + 3$	$2k$
Assimétrico	$N_l$	$2^{(k+1)} - 1$	$3 \cdot 2^k - 3$	$2^{(k+1)} - 1$
	$N_{sw}$	$k$	$k + 3$	$2k$

Fonte: Próprio autor.

Para o modo de operação simétrico, observa-se que todas as topologias apresentam o mesmo número de níveis de tensão, dado por  $N_l = 2k + 1$ , onde  $k$  representa o número de células em cascata, no caso, para  $k = 2$ , todas as topologias apresentam cinco níveis. Entretanto, a principal diferença entre as topologias encontra-se no número de chaves controladas necessárias para a implementação do conversor. A configuração 1 destaca-se por utilizar um menor número de chaves em comparação à configuração 2 e à topologia convencional, o que resulta em menor complexidade de implementação e potencial redução de perdas por comutação. Exemplificando para  $k = 2$ , nota-se que a topologia 1 é a mais vantajosa pois consegue gerar cinco níveis precisando apenas de duas chaves, enquanto a topologia 2 gera cinco níveis com cinco chaves.

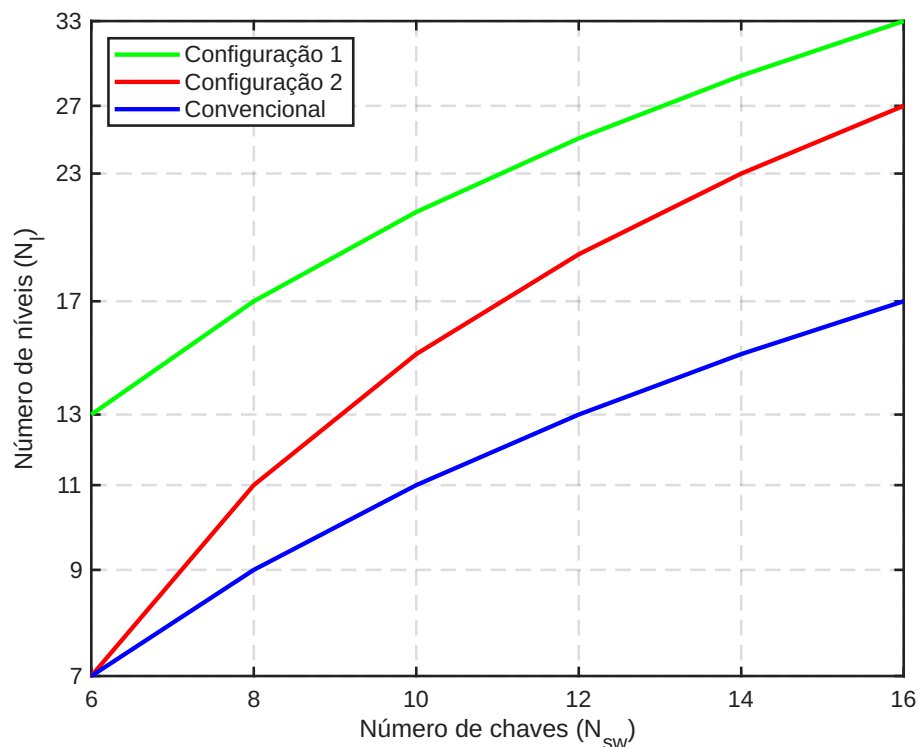
No modo de operação assimétrico, as vantagens das topologias propostas tornam-se mais evidentes. Observa-se que a configuração 1 apresenta crescimento exponencial no número

de níveis de tensão com o aumento do número de células, mantendo um número reduzido de chaves controladas. A configuração 2, por sua vez, apresenta o maior número de níveis de tensão dentre as topologias analisadas, resultado da maior assimetria entre os barramentos e da presença de chaves ativas adicionais.

Para  $k = 2$ , observa-se que a topologia 1 consegue gerar sete níveis, a topologia 2 gera nove níveis e a topologia convencional gera sete níveis como a topologia 1. Entretanto, para a topologia 1, é gerado sete níveis com apenas duas chaves, enquanto a convencional gera sete níveis precisando de quatro chaves. Além disso, a topologia 2 gera nove níveis precisando de cinco chaves. Ou seja, com uma chave a mais que a topologia convencional, a topologia 2 gera dois níveis a mais. Logo, nota-se que, em comparação à topologia convencional, a topologia 2 é mais vantajosa em relação a quantidade de níveis e a topologia 1 mostra vantagem em relação a quantidade de chaves.

Os gráficos das Figuras 16 e 17 ressaltam que, para um mesmo número de chaves, as configurações propostas são capazes de sintetizar um número significativamente maior de níveis de tensão quando comparadas à topologia convencional. Esse comportamento torna-se especialmente relevante em aplicações que demandam elevada qualidade da forma de onda, uma vez que o aumento do número de níveis está associado à redução da distorção harmônica.

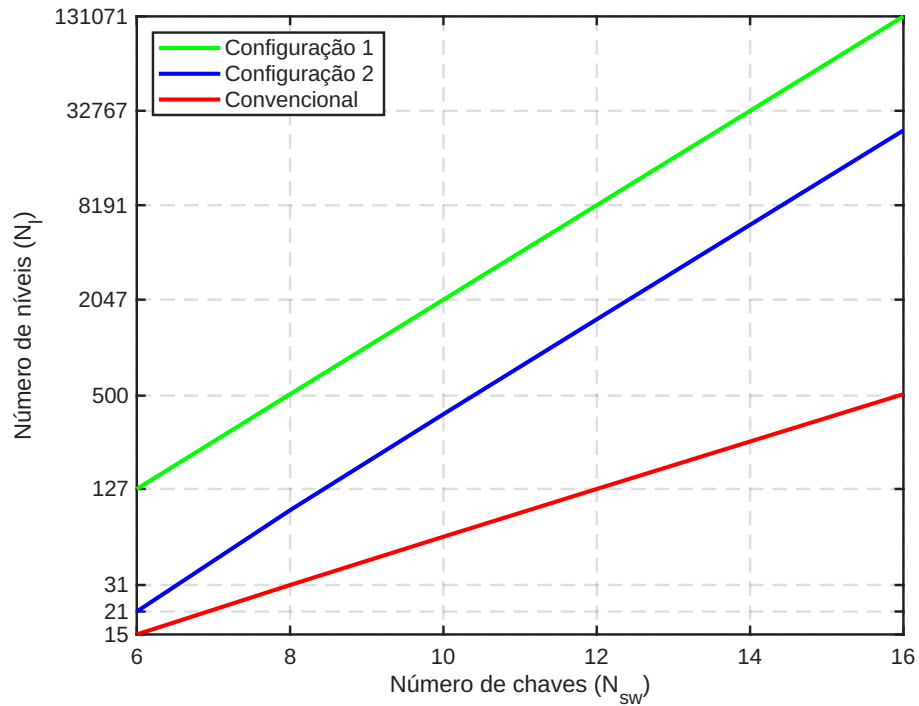
Figura 16 – Gráfico de relação entre número de níveis por número de chaves para análise simétrica.



Fonte: Próprio autor.

Também é notável que a relação de níveis por chaves é muito maior para as topologias 1 e 2, em comparação com a topologia convencional, principalmente para o caso assimétrico, apresentado na Figura 17. Isso torna possível aumentar significativamente o número de níveis mesmo com um número reduzido de chaves.

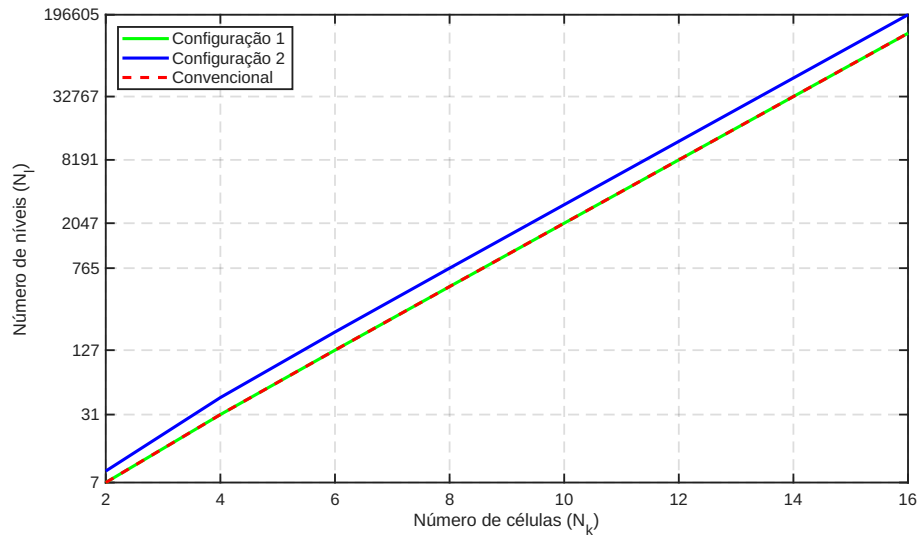
Figura 17 – Gráfico de relação entre número de níveis por número de chaves para análise assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 18 apresenta o gráfico de relação entre o número de níveis  $N_l$  e o número de células  $k$ . Pode-se observar que para essa análise, a configuração 2 se destaca pois consegue produzir um número maior de níveis com a mesma quantidade de níveis que a configuração 1 e a convencional.

Figura 18 – Gráfico de relação entre número de níveis por número de células para análise assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, a análise topológica confirma que as configurações propostas oferecem um compromisso vantajoso entre complexidade estrutural e desempenho elétrico. A configuração 1 destaca-se pela simplicidade e menor número de chaves, enquanto a configuração 2 se sobressai pela maior capacidade de síntese de níveis de tensão, especialmente no modo assimétrico, posicionando ambas como alternativas competitivas à topologia convencional.

## 4.2 Análise gráfica

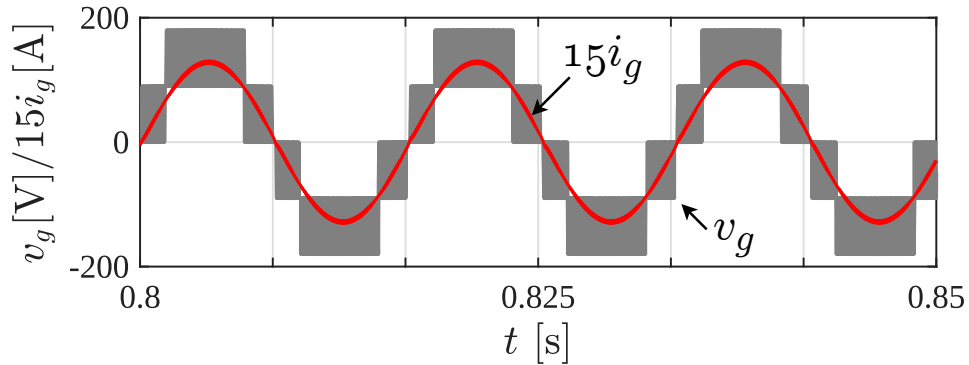
A simulação para validação das considerações teóricas foi realizada no software *PSIM*, com parâmetros diferentes de tensão de entrada  $e_g$  para a análise simétrica e para a análise assimétrica. A indutância de acoplamento  $L_g$  considerada nas duas análises foi de  $7\text{ mH}$  e a frequência de comutação  $f = 10\text{ kHz}$ . Para a análise simétrica, adotou-se a tensão de entrada  $e_g = 155\text{ V}$  e para a análise assimétrica  $e_g = 210\text{ V}$ . Além disso, foi simulada a topologia convencional para fins de comparação, considerando a modulação dos estados de chaveamento com menor comutação possível, tanto no modo simétrico quanto no modo assimétrico.

### 4.2.1 Análise simétrica

A Figura 19 apresenta as formas de onda da tensão de entrada  $v_g$  e da corrente  $i_g$  para a configuração 1 operando em modo simétrico. Observa-se que a corrente de entrada apresenta comportamento praticamente senoidal e encontra-se em fase com a tensão  $v_g$ , o que indica a

operação em alto fator de potência. Nota-se, ainda, que a tensão  $v_g$  apresenta cinco níveis, resultado da igualdade entre as tensões de barramento das células.

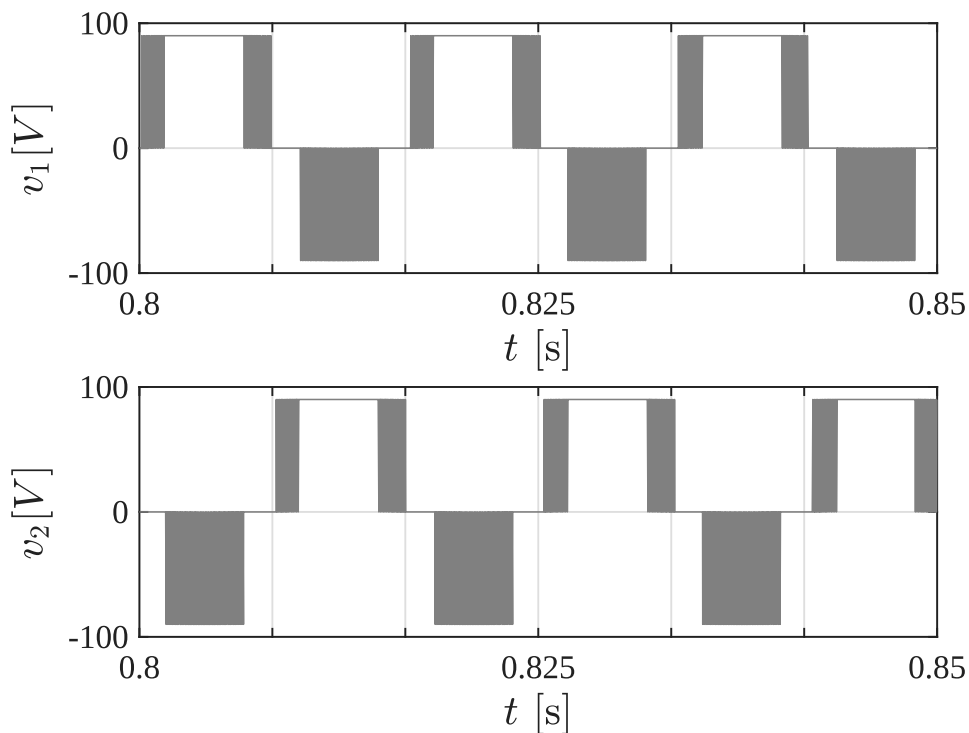
Figura 19 – Resultado de simulação da tensão  $v_g$  e corrente  $i_g$  ampliada para a configuração 1 simétrica.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 20 apresenta as tensões  $v_1$  e  $v_2$  das duas células em cascata. Verifica-se que ambas operam com amplitudes semelhantes, uma vez que a relação de barramentos adotada no modo simétrico é de 1 : 1. Esse comportamento resulta na síntese de níveis igualmente espaçados na tensão de saída.

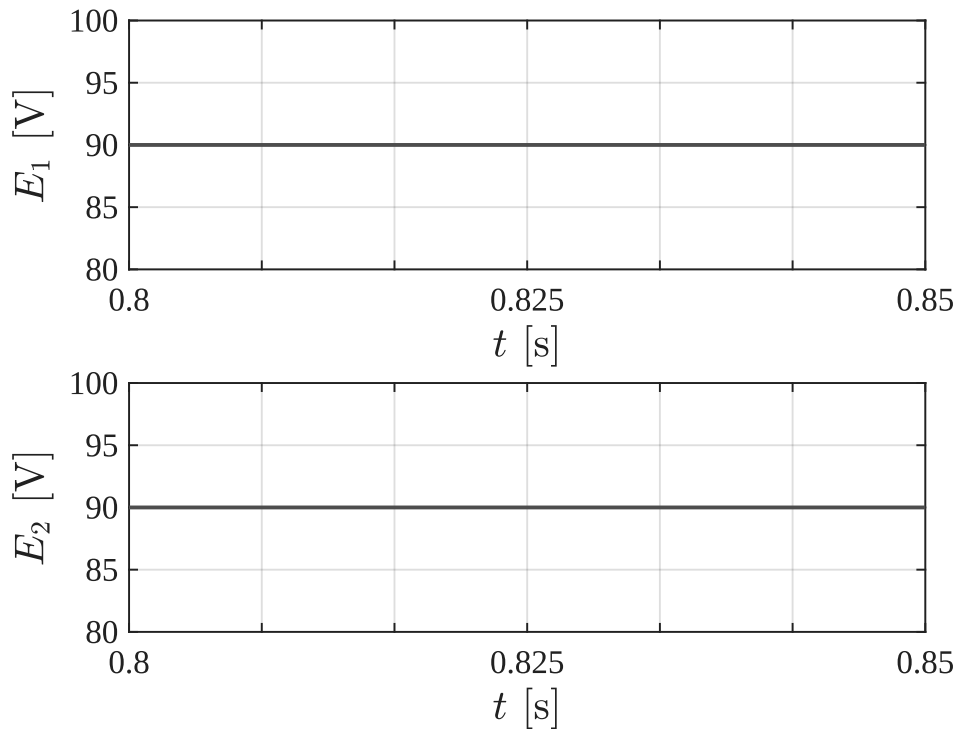
Figura 20 – Resultado de simulação da tensão  $v_1$  e tensão  $v_2$  para a configuração 1 simétrica.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 21 são apresentadas as tensões dos barramentos CC  $E_1$  e  $E_2$ . Observa-se que ambas permanecem reguladas em torno do valor de referência, evidenciando o uso de fontes de tensões para substituir o barramento CC, pois não foi realizado o controle de tensão de barramento no trabalho.

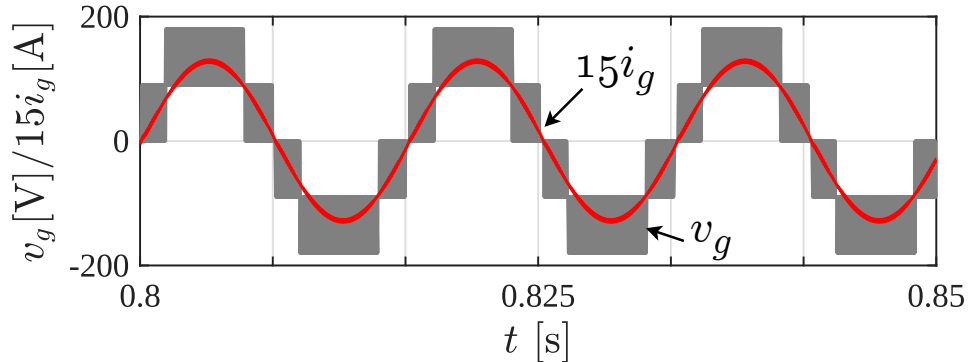
Figura 21 – Resultado de simulação das tensões de barramento  $E_1$  e  $E_2$  para a configuração 1 simétrica.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 22 apresenta as formas de onda da tensão de entrada  $v_g$  e da corrente  $i_g$  para a configuração 2 operando em modo simétrico. Assim como observado na configuração 1, a corrente de entrada mantém-se aproximadamente senoidal e em fase com a tensão, indicando a operação em alto fator de potência.

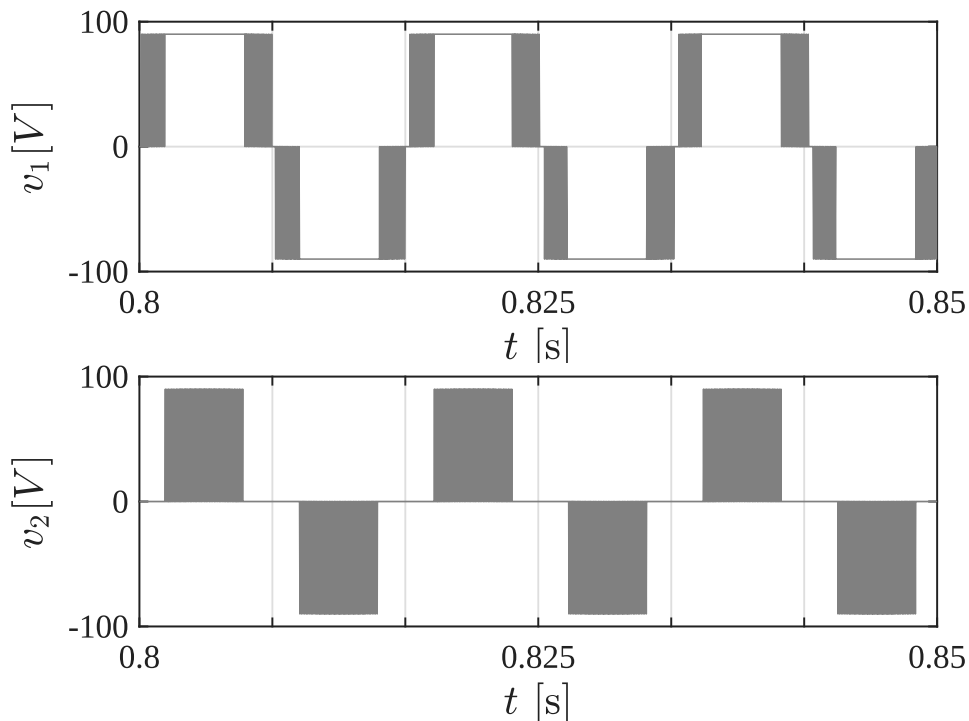
Figura 22 – Resultado de simulação da tensão  $v_g$  e corrente  $i_g$  ampliada para a configuração 2 simétrica.



Fonte: Próprio autor.

As tensões  $v_1$  e  $v_2$  das células são apresentadas na Figura 23. Verifica-se que, no modo simétrico, ambas as células operam com tensões de mesma magnitude, refletindo a igualdade entre os barramentos. Esse fator limita o número de níveis sintetizados, porém mantém a estrutura do conversor mais simples.

Figura 23 – Resultado de simulação da tensão  $v_1$  e tensão  $v_2$  para a configuração 2 simétrica.

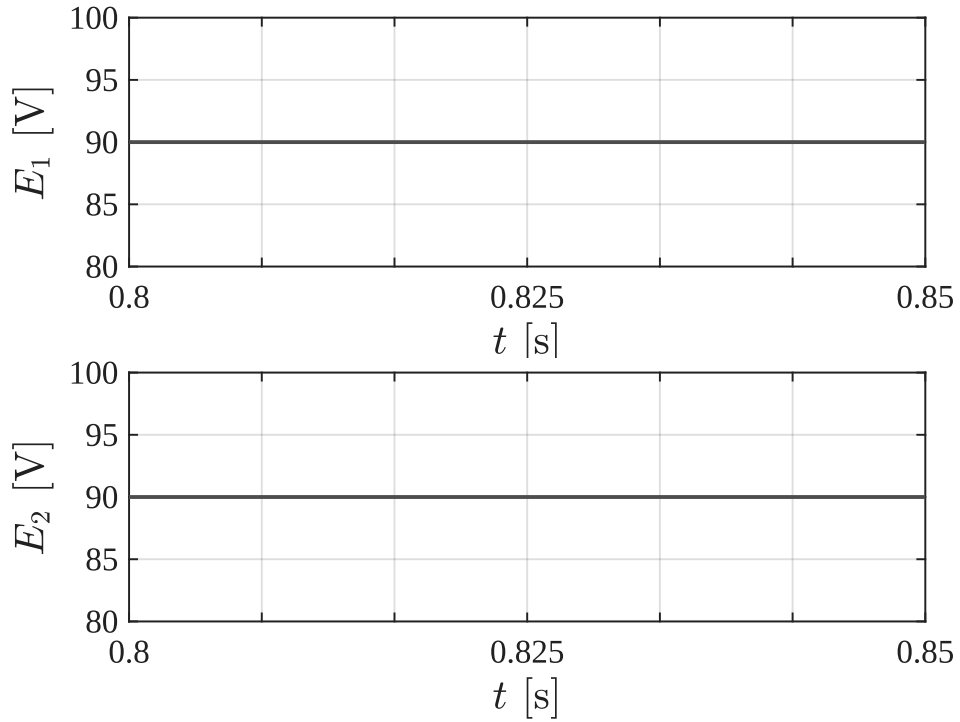


Fonte: Próprio autor.

A Figura 24 apresenta as tensões dos barramentos  $E_1$  e  $E_2$  para a configuração 2 simétrica. Observa-se novamente a estabilidade das tensões em torno do ponto de referência

devido a presença de fontes de tensão na saída.

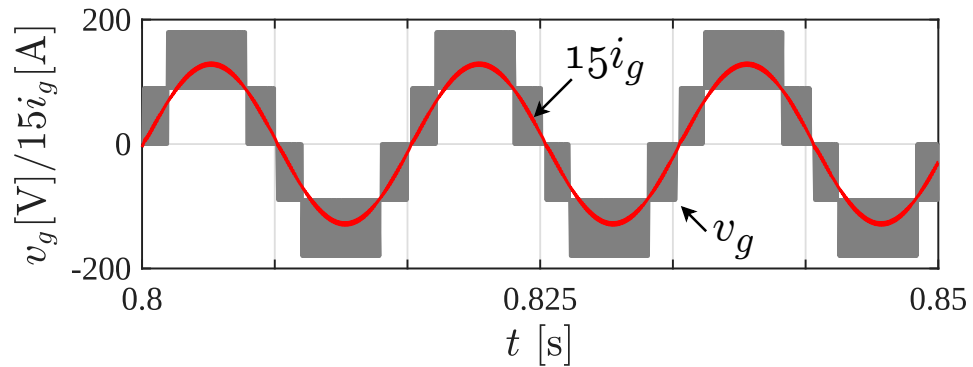
Figura 24 – Resultado de simulação das tensões de barramento  $E_1$  e  $E_2$  para a configuração 2 simétrica.



Fonte: Próprio autor.

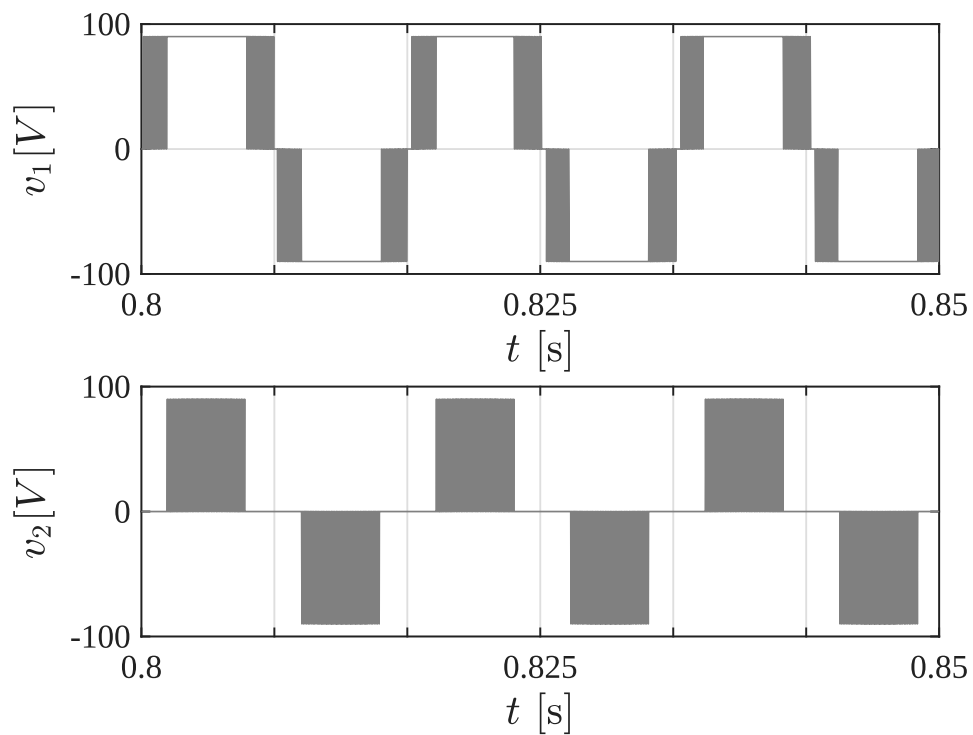
As Figuras 25, 26 e 27 apresentam os resultados obtidos para a topologia convencional operando em modo simétrico. Comparando-se essas formas de onda com aquelas obtidas para as configurações propostas, observa-se que todas as topologias apresentam comportamento adequado quanto à operação em alto fator de potência. No entanto, as configurações propostas apresentam maior flexibilidade topológica, possibilitando redução do número de chaves ativas para um mesmo número de níveis, especialmente na configuração 1.

Figura 25 – Resultado de simulação da tensão  $v_g$  e corrente  $i_g$  ampliada para a configuração convencional simétrica.



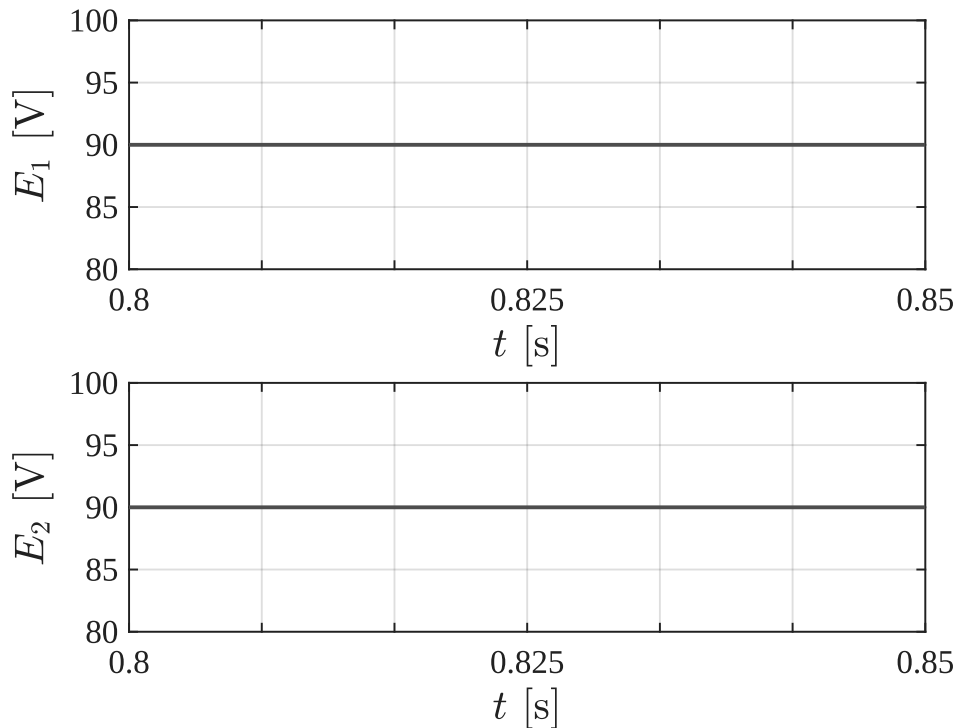
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Resultado de simulação da tensão  $v_1$  e tensão  $v_2$  para a configuração convencional simétrica.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – Resultado de simulação das tensões de barramento  $E_1$  e  $E_2$  para a configuração convencional simétrica.



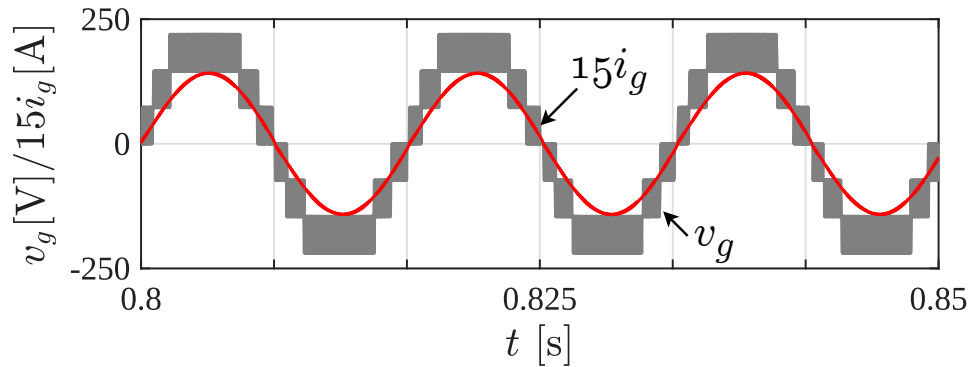
Fonte: Próprio autor.

De modo geral, a análise simétrica evidencia que, embora o número de níveis sintetizados seja o mesmo em todas as configurações para duas células, as configurações propostas apresentam desempenho equivalente ou superior à topologia convencional em termos de correção do fator de potência e estabilidade dos barramentos CC. Dessa forma, o modo simétrico mostra-se uma alternativa viável quando se busca simplicidade de implementação.

#### 4.2.2 Análise assimétrica

A Figura 28 apresenta as formas de onda de tensão de entrada  $v_g$  e da corrente  $i_g$  para a configuração 1 operando em modo assimétrico. Observa-se que a corrente de entrada apresenta um comportamento próximo de uma senoide e encontra-se em fase com a tensão de entrada, o que indica a operação em alto fator de potência do sistema. Do mesmo modo, nota-se que o controle da corrente  $i_g$  está funcionando corretamente, pois  $i_g$  está em um formato senoidal e não apresenta distorções na passagem pelo zero. Além disso, nota-se que a tensão  $v_g$  apresenta 7 níveis, evidenciando a contribuição da assimetria dos barramentos para o aumento do número de níveis sintetizados.

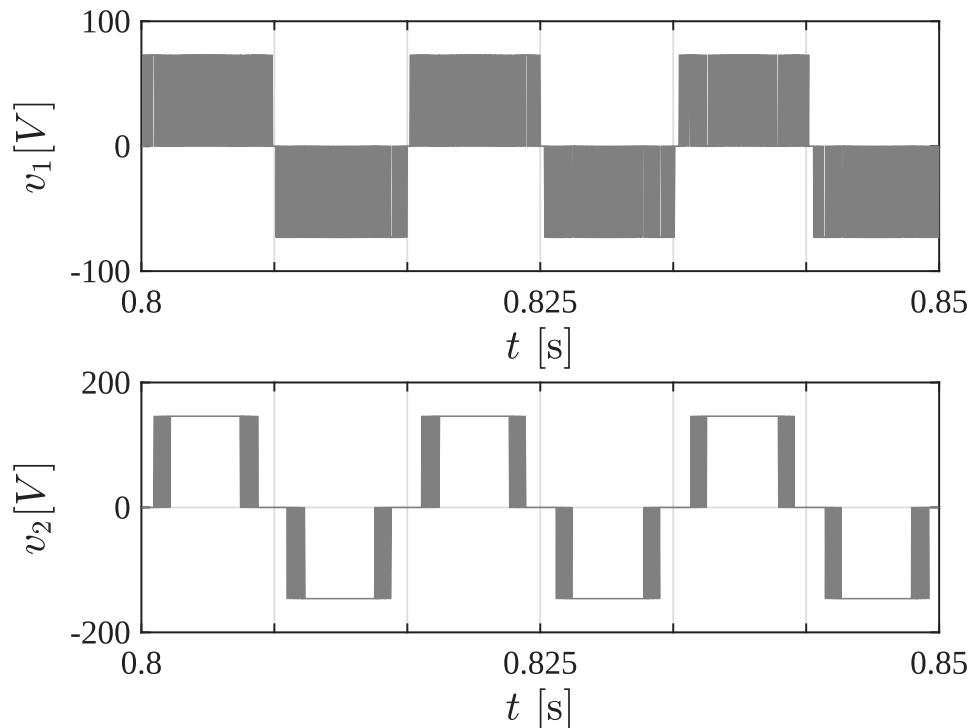
Figura 28 – Resultado de simulação da tensão  $v_g$  e corrente  $i_g$  ampliada para a configuração 1 assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 29 são apresentadas as tensões  $v_1$  e  $v_2$  referentes às duas células em cascata. É possível verificar que a segunda célula opera com um nível maior de tensão comparado ao da primeira, conforme a relação de barramentos adotada para a configuração assimétrica, permitindo a geração de níveis intermediários adicionais na tensão de saída.

Figura 29 – Resultado de simulação da tensão  $v_1$  e tensão  $v_2$  para a configuração 1 assimétrica.

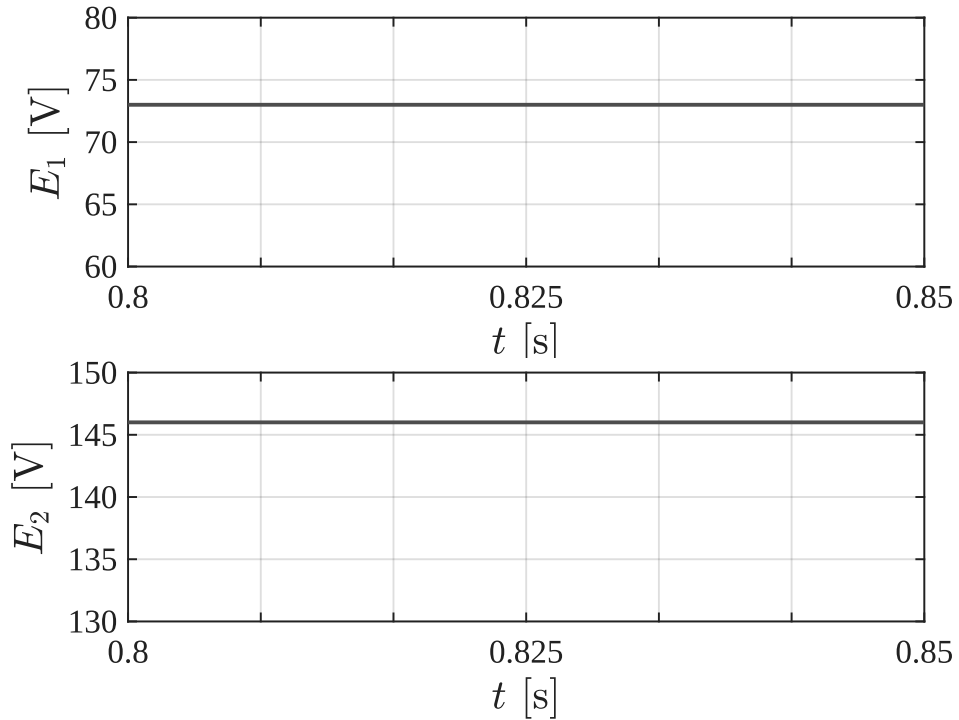


Fonte: Próprio autor.

A Figura 30 ilustra as tensões de barramentos CC  $E_1$  e  $E_2$ . Observa-se que ambas permanecem reguladas em torno de seus valores de referência, indicando o equilíbrio das células,

mesmo operando sob condição assimétrica.

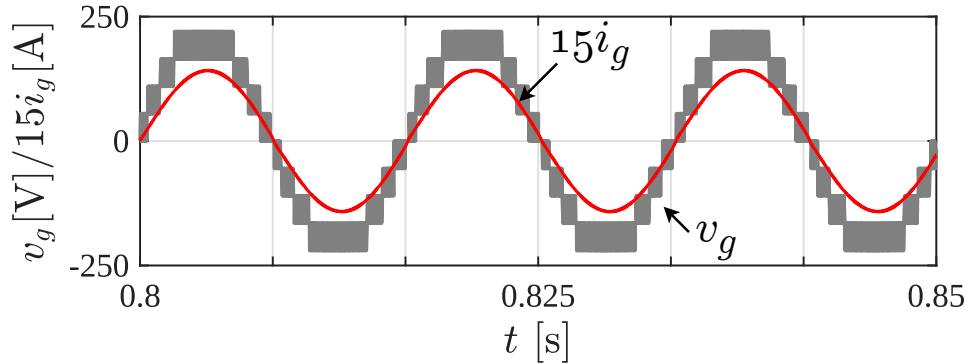
Figura 30 – Resultado de simulação das tensões de barramento  $E_1$  e  $E_2$  para a configuração 1 assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 31 apresenta as formas de onda de tensão de entrada  $v_g$  e da corrente  $i_g$  para a configuração 2 assimétrica. Assim como observado na configuração 1, a corrente de entrada mantém-se praticamente senoidal e em fase com a tensão, evidenciando a adequada operação em alto fator de potência. No entanto, observa-se que foram gerados nove níveis de tensão, número maior em comparação à configuração 1, resultado da relação de barramentos adotada nesta configuração, de 1 : 3, maior que a utilizada na configuração 1.

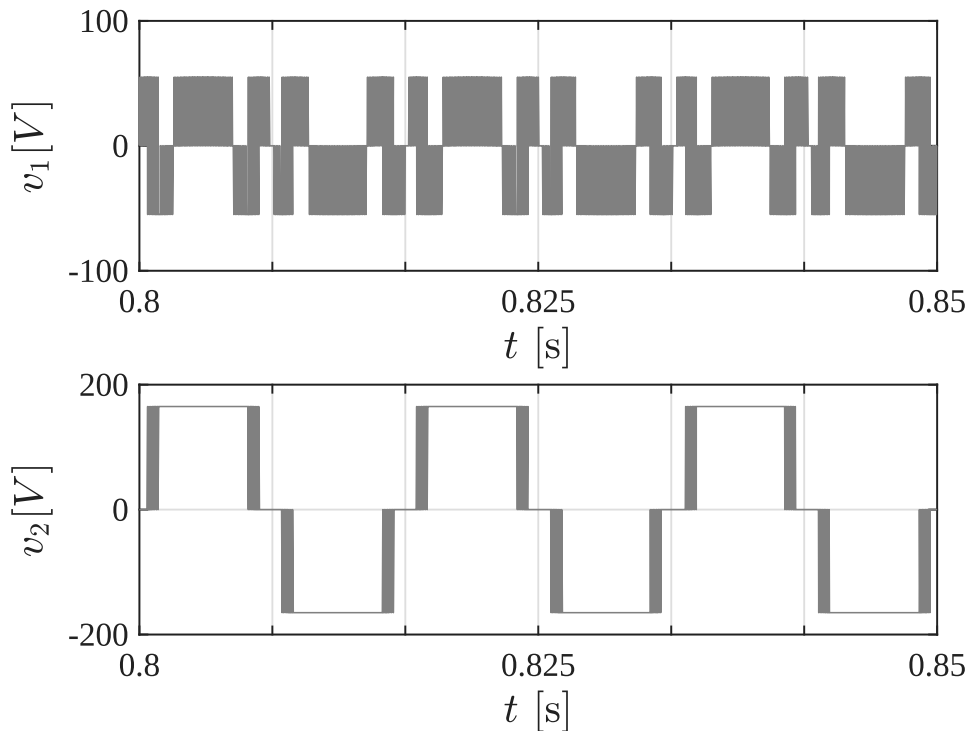
Figura 31 – Resultado de simulação da tensão  $v_g$  e corrente  $i_g$  ampliada para a configuração 2 assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

As tensões  $v_1$  e  $v_2$  das células em cascata são apresentadas na Figura 32. Nota-se que a assimetria mais acentuada entre os barramentos contribui diretamente para a ampliação do número de níveis da tensão de saída, quando comparada à configuração 1.

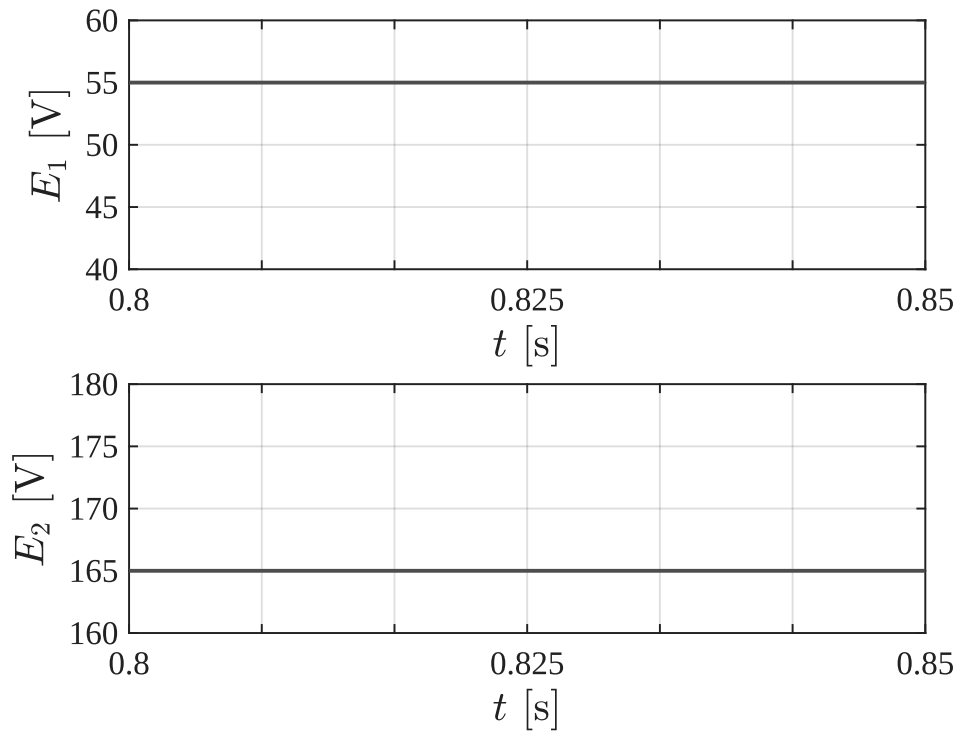
Figura 32 – Resultado de simulação da tensão  $v_1$  e tensão  $v_2$  para a configuração 2 assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 33 apresenta as tensões de barramentos  $E_1$  e  $E_2$ , as quais permanecem estáveis ao longo do tempo da simulação.

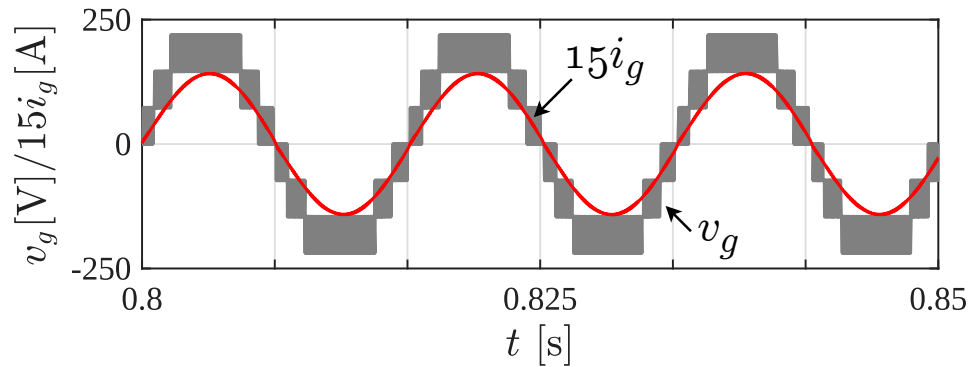
Figura 33 – Resultado de simulação das tensões de barramento  $E_1$  e  $E_2$  para a configuração 2 assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

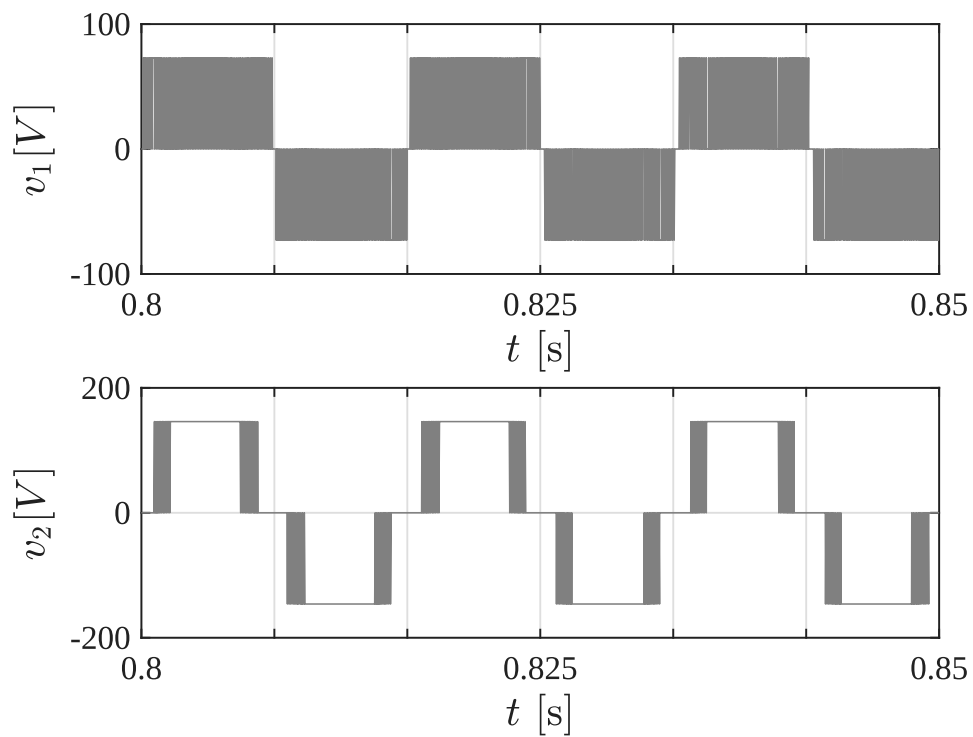
As Figuras 34, 35 e 36 apresentam os resultados obtidos para a topologia convencional operando em modo assimétrico. Comparando-se essas formas de onda com aquelas obtidas para as configurações propostas, observa-se que, apesar de a topologia convencional também apresentar correção do fator de potência, o número de níveis sintetizados na tensão de saída é inferior ao da configuração 2 e igual ao da configuração 1. Esse fator contribui para maiores variações na forma de onda da tensão e, conseqüentemente, para um desempenho harmônico inferior quando comparado às topologias propostas.

Figura 34 – Resultado de simulação da tensão  $v_g$  e corrente  $i_g$  ampliada para a configuração convencional assimétrica.



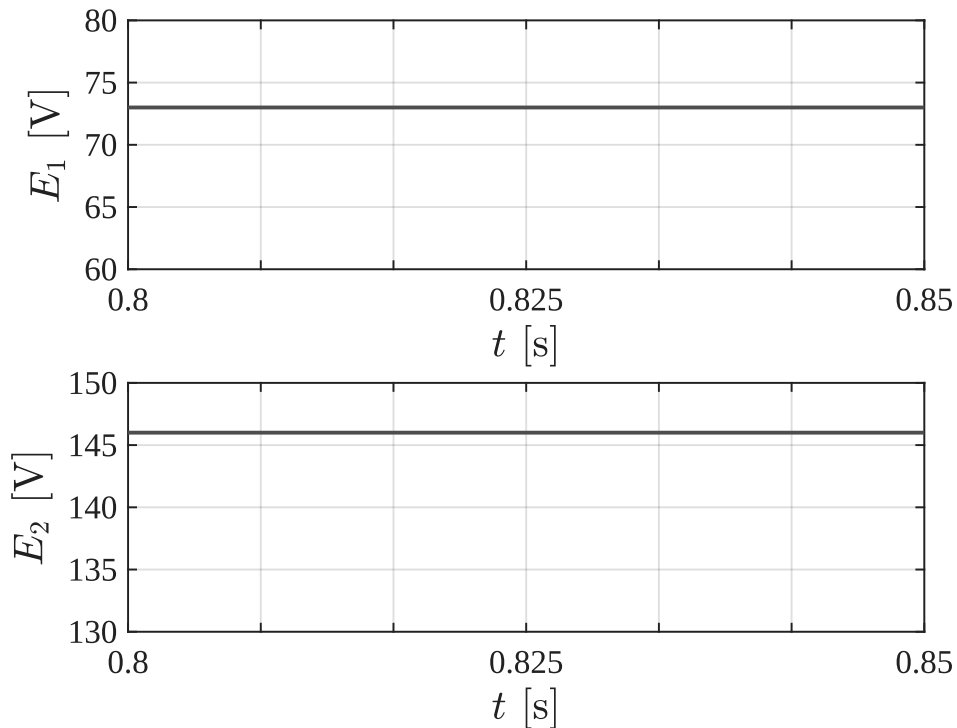
Fonte: Próprio autor.

Figura 35 – Resultado de simulação da tensão  $v_1$  e tensão  $v_2$  para a configuração convencional assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Resultado de simulação das tensões de barramento  $E_1$  e  $E_2$  para a configuração convencional assimétrica.



Fonte: Próprio autor.

A partir da análise dos resultados apresentados, observa-se que as topologias propostas apresentam desempenho satisfatório tanto no modo simétrico quanto no modo assimétrico. Inicialmente, a análise simétrica evidenciou que ambas as configurações são capazes de operar com um alto fator de potência, mantendo a corrente de entrada praticamente senoidal e em fase com a tensão. Nesse modo de operação, destaca-se a simplicidade estrutural das topologias, bem como o desempenho equivalente à topologia convencional.

Em seguida, a análise assimétrica demonstrou as principais vantagens das configurações estudadas. A assimetria dos barramentos permitiu a síntese de um número significativamente maior de níveis de tensão na saída do conversor, quando comparado ao caso simétrico e à topologia convencional. Esse aumento no número de níveis resulta em formas de onda de tensão mais próximas do comportamento senoidal, contribuindo diretamente para a melhoria da qualidade da energia entregue ao sistema.

Dessa forma, os resultados confirmam que a operação em modo assimétrico se mostra mais vantajosa quando o objetivo principal é a melhoria da qualidade da forma de onda, ainda que à custa de maior complexidade no controle e na definição das tensões de barramento. Por outro lado, o modo simétrico permanece como uma alternativa viável quando se prioriza

simplicidade de implementação e menor complexidade do sistema.

### 4.3 Análise de distorção harmônica

A análise de distorção harmônica foi realizada com o objetivo de avaliar a qualidade da corrente de entrada obtida pelas topologias estudadas, tanto no modo simétrico quanto no modo assimétrico, bem como compará-las à topologia convencional. Os valores de DHT obtidos para cada caso são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação de topologias simétricas e assimétricas com 2 células em cascata

	<b>Topologia</b>	<b>nº células</b>	<b>nº chaves</b>	<b>nº níveis</b>	<b>DHT</b>
Simétrico	Configuração 1	2	2	5	1,29065%
	Configuração 2	2	5	5	1,33183%
	Convencional	2	4	5	1,33029%
Assimétrico	Configuração 1	2	2	7	1,15659%
	Configuração 2	2	5	9	1,08814%
	Convencional	2	4	7	1,15464%

Fonte: Próprio autor.

No modo simétrico, observa-se que todas as topologias apresentam valores de DHT próximos entre si, indicando desempenho semelhante quanto à qualidade da corrente de entrada. A configuração 1 apresentou o menor valor de DHT dentre os casos simétricos analisados, enquanto a configuração 2 e a topologia convencional apresentaram valores ligeiramente superiores. Esses resultados indicam que, mesmo com um menor número de chaves ativas, a configuração 1 é capaz de manter desempenho harmônico equivalente ou superior às demais topologias.

Ao analisar o modo assimétrico, verifica-se uma redução significativa dos valores de DHT para todas as topologias quando comparadas ao modo simétrico. Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento do número de níveis de tensão sintetizados na saída do conversor, o que resulta em formas de onda mais próximas do comportamento senoidal e, conseqüentemente, menor conteúdo harmônico.

Dentre os casos analisados em modo assimétrico, a configuração 2 apresentou o menor valor de DHT, evidenciando o impacto positivo da maior assimetria dos barramentos e do maior número de níveis gerados por essa topologia. A configuração 1 assimétrica também apresentou desempenho harmônico superior ao da topologia convencional, mesmo utilizando um número reduzido de chaves ativas, o que reforça a eficiência da topologia proposta.

Dessa forma, a análise de distorção harmônica confirma os resultados observados nas análises gráfica e topológica, demonstrando que a operação em modo assimétrico proporciona melhoria significativa na qualidade da corrente de entrada. Assim, as topologias propostas mostram-se vantajosas para aplicações que exigem baixa distorção harmônica, destacando-se como alternativas eficientes à topologia convencional.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo analisar topologias de retificadores em duas configurações diferentes, baseadas em células ponte-H, no modo simétrico e assimétrico, com duas células. A comparação dessas topologias, para o modo simétrico, com a configuração de retificador convencional formada por chaves controladas e diodos, mostrou que, apesar de as configurações apresentarem a mesma quantidade de níveis para duas células, foi vantajosa por apresentar uma quantidade menor de chaves e, conseqüentemente, uma quantidade menor de circuitos de acionamento para essas chaves, além de um controle mais simples. Para o modo assimétrico, as topologias estudadas também apresentaram vantagens por resultar em uma quantidade maior de níveis de tensão, além de precisarem de menos chaves.

Na análise topológica, as vantagens das topologias estudadas foram ainda mais ressaltadas, pois mostraram uma quantidade maior de níveis, necessitando de menos chaves para retificadores com mais células. Também foi estudada a relação dos níveis por célula para o modo assimétrico, pois mostrou a aplicabilidade de conseguir a mesma quantidade de níveis com menos células para a configuração 2.

A análise gráfica se apresentou satisfatória, com êxito na modulação por setor e no controle da corrente de entrada, tendo como resultados a tensão de entrada em níveis de acordo com o esperado. O estudo da distorção harmônica também foi essencial para provar como uma maior quantidade de níveis na tensão de entrada proporciona um menor valor de distorção harmônica, o que é indispensável para aplicações em sistemas de energia.

Como melhoria para trabalhos futuros, pode-se ressaltar:

- A validação experimental do protótipo das configurações em bancada, para validação dos resultados de simulação.
- A análise de perdas dos componentes semicondutores, como diodos e chaves.
- A modelagem e o controle da corrente de entrada e de tensão dos barramentos CC.
- O estudo de possíveis variações de braços para as células.

## REFERÊNCIAS

- CARRARA, G.; GARDELLA, S.; MARCHESONI, M.; SALUTARI, R.; SCIUTTO, G. A new multilevel pwm method: a theoretical analysis. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 7, n. 3, p. 497–505, 1992.
- COLAK, I.; KABALCI, E.; BAYINDIR, R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 2, p. 1114–1128, 2011. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410004085>>.
- DUTRA, A. D. E.; VITORINO, M. A.; CORRÊA, M. B. D. R. A survey on multilevel rectifiers with reduced switch count. **IEEE Access**, v. 11, p. 56098–56141, 2023.
- HAMMOND, P. A new approach to enhance power quality for medium voltage ac drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 1, p. 202–208, 1997.
- HOLTZ, J. Pulsewidth modulation for electronic power conversion. **Proceedings of the IEEE**, v. 82, n. 8, p. 1194–1214, 1994.
- IEC. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions**. Geneva, Switzerland, 2018. Standard available at <https://webstore.iec.ch/>.
- IEEE. **IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems**. New York, NY, USA, 2022.
- IMAN-EINI, H.; FARHANGI, S.; SCHANEN, J.-L.; AIME, J. Design of power electronic transformer based on cascaded h-bridge multilevel converter. In: **2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 877–882.
- KOLAR, J.; ZACH, F. A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 44, n. 4, p. 456–467, 1997.
- KOURO, S.; MALINOWSKI, M.; GOPAKUMAR, K.; POU, J.; FRANQUELO, L. G.; WU, B.; RODRIGUEZ, J.; PÉREZ, M. A.; LEON, J. I. Recent advances and industrial applications of multilevel converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 8, p. 2553–2580, 2010.
- LEON, J. I.; VAZQUEZ, S.; FRANQUELO, L. G. Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2066–2081, 2017.
- MALINOWSKI, M.; GOPAKUMAR, K.; RODRIGUEZ, J.; PÉREZ, M. A. A survey on cascaded multilevel inverters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 7, p. 2197–2206, 2010.
- MONTEIRO, A. P.; JACOBINA, C. B.; BAHIA, F. A. D. C.; SOUSA, R. Palmer Rezende de; CARDOSO, J. T.; PINTO, A. R. A. Single-phase unidirectional multilevel rectifiers based on cascaded cells. In: **2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 3064–3071.

RODRIGUEZ, J.; BERNET, S.; STEIMER, P. K.; LIZAMA, I. E. A survey on neutral-point-clamped inverters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 7, p. 2219–2230, 2010.

RODRIGUEZ, J.; FRANQUELO, L. G.; KOURO, S.; LEON, J. I.; PORTILLO, R. C.; PRATS, M. M.; PEREZ, M. A. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 97, n. 11, p. 1786–1817, 2009.

SALMON, J. Circuit topologies for pwm boost rectifiers operated from 1-phase and 3-phase ac supplies and using either single or split dc rail voltage outputs. In: **Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'95**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 473–479 vol.1.

SINGH, B.; SINGH, B.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K.; PANDEY, A.; KOTHARI, D. A review of single-phase improved power quality ac-dc converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 50, n. 5, p. 962–981, 2003.

TURNBULL, F. G. Selected harmonic reduction in static d-c a-c inverters. **IEEE Transactions on Communication and Electronics**, v. 83, n. 73, p. 374–378, 1964.

VAHEDI, H.; SHOJAEI, A. A.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K. Five-level reduced-switch-count boost pfc rectifier with multicarrier pwm. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 5, p. 4201–4207, 2016.

VEMUGANTI, H. P.; SREENIVASARAO, D.; GANJIKUNTA, S. K.; SURYAWANSHI, H. M.; ABU-RUB, H. A survey on reduced switch count multilevel inverters. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, v. 2, p. 80–111, 2021.

WANG, C.; ZHUANG, Y.; JIAO, J.; ZHANG, H.; WANG, C.; CHENG, H. Topologies and control strategies of cascaded bridgeless multilevel rectifiers. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 5, n. 1, p. 432–444, 2017.