



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANDERSON JHONES PASSOS NASCIMENTO**

**INVERSOR MULTINIVEL BIDIRECIONAL COM ATÉ 15 NÍVEIS NA TENSÃO DE  
SAÍDA UTILIZANDO SOMENTE UMA FONTE CC**

**FORTALEZA**

**2021**

ANDERSON JHONES PASSOS NASCIMENTO

INVERSOR MULTINIVEL BIDIRECIONAL COM ATÉ 15 NÍVEIS NA TENSÃO DE SAÍDA  
UTILIZANDO SOMENTE UMA FONTE CC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Ph.D. Fernando Luiz Marcelo Antunes

Coorientador: Prof. Dr. Samuel Jó de Mesquita

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

N193i Nascimento, Anderson Jhones.

INVERSOR MULTINIVEL BIDIRECIONAL COM ATÉ 15 NÍVEIS NA TENSÃO DE SAÍDA  
UTILIZANDO SOMENTE UMA FONTE CC / Anderson Jhones Nascimento. – 2021.

124 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

Coorientação: Prof. Dr. Samuel Jó de Mesquita.

1. Inversor multinível. 2. Modulação staircase. 3. Inversor assimétrico. 4. Transforma-dor com múltiplos secundários. I. Título.

CDD 621.3

---

ANDERSON JHONES PASSOS NASCIMENTO

INVERSOR MULTINIVEL BIDIRECIONAL COM ATÉ 15 NÍVEIS NA TENSÃO DE SAÍDA  
UTILIZANDO SOMENTE UMA FONTE CC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ph.D. Fernando Luiz Marcelo  
Antunes (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)-Campus  
Fortaleza

---

Prof. Dr. Samuel Jó de Mesquita (Coorientador)  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)-Campus Pecém

---

Prof. Dr. Sérgio Daher  
Universidade Federal do Ceará (UFC)-Campus  
Fortaleza

---

Prof. Dr. Luan Carlos dos Santos Mazza  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)-Campus Tabuleiro  
do Norte

A Deus, a minha mãe Nazaré, minha tia Francinete, meu tio Antônio José, minha avó Luiza e minha família em geral, eu dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir realizar essa conquista e sempre me bençoar.

A meus pais pelo suporte financeiro, assim como minha avó. Além dos demais familiares por torcerem por mim e me incentivar.

Ao meu orientador, Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes, pela orientação e pelo embasamento para eu poder ser um pesquisador melhor, ao meu coorientador, Dr. Samuel Jó de Mesquita, do Instituto Federal do Ceará (IFCE), assim como ao professor Dr. Sérgio Daher, da Universidade Federal do Ceará (UFC), pela consultoria de como proceder no rearranjo do protótipo utilizado neste trabalho.

Aos professores Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes, da Universidade Federal do Ceará (UFC), Dr. Samuel Jó de Mesquita, do Instituto Federal do Ceará (IFCE), Dr. Sérgio Daher, da Universidade Federal do Ceará (UFC) e Dr. Luan Carlos dos Santos Mazza por participarem desta banca avaliadora.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por seu auxílio financeiro.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica, bem como a todos os professores que me proporcionaram conhecimento e embasamento para prosseguir com esta pesquisa e conseguir concluí-la.

Ao Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC) pelo suporte ao projeto, e aos colegas da universidade, pelas contribuições técnicas ao longo deste trabalho de mestrado e pelo compartilhamento de conhecimentos. Em especial, aos colegas do laboratório e do departamento: Willamy, Welton, Samanta, Gilmar, Emerson, Mauro e Carla.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação profissional e social.

“Lutem e lutem novamente, até cordeiros virarem  
leões.”

(Robin Hood)

## RESUMO

Este trabalho propõe um inversor multinível assimétrico bidirecional que utiliza uma única fonte de *Corrente Contínua* (CC) e um transformador de vários secundários para a obtenção de até 15 níveis na tensão de saída. A topologia sugerida é composta de um transformador, uma ponte H-bridge localizada no primário e de células assimétricas associadas com duas chaves bidirecionais no secundário do transformador. De acordo com os pesos das fontes e as combinações de estados de chaveamento aplicados nas células L o inversor pode gerar até 15 níveis na tensão de saída. O transformador empregado trabalha na frequência de 60 Hz, apresenta múltiplos secundários, o que reduz o número de fontes de tensão isoladas, e funciona como um elevador de tensão de alto ganho. O inversor funciona com a modulação staircase, cujo princípio é baseado na eliminação de harmônicos, a técnica é geralmente aplicada em baixa frequência de chaveamento e seu uso é amplo em aplicações de altas potências. A topologia proposta apresenta baixa distorção harmônica e número reduzido de chaves semicondutoras quando comparada com o conversor multinível convencional para produzir a mesma quantidade de níveis na tensão de saída. Estudos teóricos e resultados de simulação e experimentais são mostrados a fim de validar o conversor proposto. Um protótipo para até 1 kW foi desenvolvido e implementado em laboratório e posto em operação, em simulação e em laboratório, funcionando em malha aberta. Para mostrar que o inversor é bidirecional em corrente foi utilizada uma indutância de 300 mH na saída do inversor, aplicação feita em simulação, o que fez com que o retorno de energia no sentido carga para a fonte, pudesse ser observado. Em relação ao rendimento prático, colhido em laboratório, o conversor apresentou rendimento  $\eta=95\%$  no primeiro teste com 210 W e a medida que foi sendo aumentada a potência o rendimento foi decaindo. Este teste foi realizado para até 960 W, potência para a qual o rendimento apresentado foi de  $\eta=90\%$ .

**Palavras-chave:** Inversor multinível. Modulação staircase. Inversor assimétrico. Transformador com múltiplos secundários.

## ABSTRACT

This work proposes a bidirectional asymmetric multilevel inverter with a single Direct Current (DC) source and a transformer with multiple secondaries for obtaining up to 15 levels at the output voltage. The suggested topology is composed by a transformer, a H-Bridge located at the transformer primary, and asymmetric cells associated with two bidirectional switches at the transformer secondary. According to the weights of the AC secondary voltage sources and the combinations of switching states applied to the L cells, the inverter can generate up to 15 levels at the output voltage. The transformer employed works at a frequency of 60 Hz, multiple secondaries, which reduces the number of isolated voltage sources, and it operates as a high gain voltage. The inverter works with staircase modulation, whose principle is based on the elimination of harmonics, the technique is generally applied at low switching frequency and widely used in high power applications. The proposed topology presents low harmonic distortion and reduced number of semiconductor switches when compared to the conventional multilevel converter to produce the same levels number at the output voltage. Theoretical studies, simulation and experimental results are shown in order to validate the proposed converter. A 1 kW laboratory prototype was developed and implemented in laboratory and put into operation in open loop. In order to show that the inverter is bidirectional in current, an inductance of 300 mH was used at the inverter output, an application made in simulation, which made it possible to observe the return of energy in the load direction to the source, could be observed. In relation to the practical performance, collected in the laboratory, the converter showed a performance of  $\eta = 95\%$  in the first test with 210 W and the average that the power was being increased the performance was decreasing. This test was carried out for up to 960 W, power for which the yield presented was  $\eta = 90\%$ .

**Keywords:** Multilevel inverter. Staircase modulation. Asymmetric inverter. Transformer with multiple secondaries.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos de conversores multiníveis. . . . .	20
Figura 2 – Estratégias de modulação utilizadas em conversores multiníveis. . . . .	21
Figura 3 – Modulação PWM bipolar. (a) Referência senoidal e portadora triangular; (b) Pulsos gerados da comparação dos sinais. . . . .	22
Figura 4 – Modulação PWM unipolar. (a) sinais de referência e portadora triangular; (b) tensões na ponte; (c) tensão de saída. . . . .	23
Figura 5 – Pulsos modulados a partir da técnica de modulação escada. . . . .	23
Figura 6 – Conversor com ponto neutro grampeado. . . . .	27
Figura 7 – Conversor com capacitores flutuantes. . . . .	28
Figura 8 – Conversor em cascata com saída contendo 5 níveis. . . . .	29
Figura 9 – Estruturas de submódulo. . . . .	31
Figura 10 – Inversor multinível híbrido usando módulos de conversor com diodo grampeado de três níveis como célula conversora em cascata para aumentar os níveis de tensão. . . . .	31
Figura 11 – Inversor híbrido em cascata com pontes H-Bridge. . . . .	32
Figura 12 – Inversor multinível monofásico híbrido em cascata. . . . .	33
Figura 13 – Conversor multinível híbrido em cascata com capacitor grampeado. . . . .	33
Figura 14 – Conversor multinível híbrido de nível misto. . . . .	34
Figura 15 – Topologia de inversor multinível híbrido com quantidade de interruptores reduzida. . . . .	35
Figura 16 – Topologia monofásica simplificada de um inversor multinível híbrido. . . . .	36
Figura 17 – Inversor monofásico híbrido de 7 níveis em ponte H. . . . .	37
Figura 18 – Inversor com indutor acoplado em cascata híbrido de 9 níveis. . . . .	38
Figura 19 – Topologia híbrida de 7 níveis com fonte CC única. . . . .	38
Figura 20 – Topologia empregando células T. . . . .	39
Figura 21 – Inversor multinível assimétrico com 49 níveis na saída. . . . .	39
Figura 22 – Inversor com 15 níveis proposto em uma estrutura simplificada. . . . .	42
Figura 23 – Topologia do inversor proposto em sua configuração completa com 15 níveis na saída. . . . .	43
Figura 24 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 15 níveis. . . . .	46
Figura 25 – Tensão no enrolamento primário do transformador. . . . .	47

Figura 26 – Corrente primária $I_{Pri}$ . . . . .	47
Figura 27 – Corrente do barramento CC ( $I_{in}$ ). . . . .	48
Figura 28 – Tensões das fontes secundárias do inversor proposto. . . . .	49
Figura 29 – Tensão da composição das células 1 e 2 apresentando 7 níveis. . . . .	49
Figura 30 – Tensão da célula $V_{oh2}$ contando com 3 níveis. . . . .	50
Figura 31 – Tensão de saída $V_{os}$ . . . . .	50
Figura 32 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão $V_{os}$ com 15 níveis, em que $V_{oh1}$ e $V_{oh2}$ são as tensões da junção das dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente . . . . .	51
Figura 33 – Corrente de saída $I_{os}$ . . . . .	53
Figura 34 – Potência de saída $P_{os}$ . . . . .	54
Figura 35 – Sinais de gate e tensão de saída $V_{os}$ para 15 níveis. . . . .	55
Figura 36 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a. . . . .	57
Figura 37 – Corrente do barramento CC ( $I_{in}$ ) para 300 mH. . . . .	57
Figura 38 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 7 níveis. . . . .	59
Figura 39 – Tensões das células $V_{oh1}$ (2L) e $V_{oh2}$ (L). . . . .	59
Figura 40 – Tensão de saída $V_{os}$ para 7 níveis. . . . .	60
Figura 41 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão $V_{os}$ com 7 níveis, em que $V_{oh1}$ e $V_{oh2}$ são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente. . . . .	61
Figura 42 – Corrente de saída $I_{os}$ para 7 níveis. . . . .	62
Figura 43 – Sinais de gate e tensão de saída $V_{os}$ para 7 níveis. . . . .	62
Figura 44 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 7 níveis. . . . .	63
Figura 45 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 9 níveis. . . . .	64
Figura 46 – Tensões das células $V_{oh1}$ (2L) e $V_{oh2}$ (L) para 9 níveis. . . . .	65
Figura 47 – Tensão de saída $V_{os}$ para 9 níveis. . . . .	65
Figura 48 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão $V_{os}$ com 9 níveis, em que $V_{oh1}$ e $V_{oh2}$ são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente. . . . .	66
Figura 49 – Corrente de saída $I_{os}$ para 9 níveis. . . . .	67
Figura 50 – Sinais de gate e tensão de saída $V_{os}$ para 9 níveis. . . . .	67
Figura 51 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 9 níveis. . . . .	68

Figura 52 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 11 níveis. . . . .	69
Figura 53 – Tensões das células $V_{oh1}$ (2L) e $V_{oh2}$ (L) para 11 níveis. . . . .	70
Figura 54 – Tensão de saída $V_{os}$ para 11 níveis. . . . .	71
Figura 55 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão $V_{os}$ com 11 níveis, em que $V_{oh1}$ e $V_{oh2}$ são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente. . . . .	72
Figura 56 – Corrente de saída $I_{os}$ para 11 níveis. . . . .	73
Figura 57 – Sinais de gate e tensão de saída $V_{os}$ para 11 níveis. . . . .	73
Figura 58 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 11 níveis. . . . .	74
Figura 59 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 13 níveis. . . . .	75
Figura 60 – Tensões das células $V_{oh1}$ (2L) e $V_{oh2}$ (L) para 13 níveis. . . . .	76
Figura 61 – Tensão de saída $V_{os}$ para 13 níveis. . . . .	76
Figura 62 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão $V_{os}$ com 13 níveis, em que $V_{oh1}$ e $V_{oh2}$ são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente. . . . .	77
Figura 63 – Corrente de saída $I_{os}$ para 13 níveis. . . . .	78
Figura 64 – Sinais de gate e tensão de saída $V_{os}$ para 13 níveis. . . . .	78
Figura 65 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 13 níveis. . . . .	79
Figura 66 – Protótipo montado em laboratório. . . . .	82
Figura 67 – Tensão $V_{os}$ e corrente $I_{os}$ com com 7 níveis e carga R. . . . .	84
Figura 68 – Tensão $V_{os}$ e corrente $I_{os}$ com 7 níveis e carga RL. . . . .	84
Figura 69 – Tensão $V_{Pri}$ com inversor operando com 7 níveis. . . . .	85
Figura 70 – Tensão $V_{os}$ e corrente $I_{os}$ com 11 níveis para $L=0,8$ mH e $R=19,3 \Omega$ . . . . .	85
Figura 71 – Tensão $V_{os}$ e corrente $I_{os}$ com 11 níveis para $L=19,7$ mH e $R=90 \Omega$ . . . . .	86
Figura 72 – Tensão $V_{Pri}$ para funcionamento do inversor com 11 níveis. . . . .	86
Figura 73 – Sinais aplicados nas chaves Si1 e Si2. . . . .	87
Figura 74 – Tempo de transição para o devido funcionamento da ponte H. . . . .	88
Figura 75 – Sinais de gate nas chaves S11a e S13b. . . . .	88
Figura 76 – Sinais de gate nas chaves S12a e S14a. . . . .	89
Figura 77 – Sinais de gate nas chaves S21a e S22a. . . . .	89
Figura 78 – Tensão e corrente do enrolamento primário para 15 níveis com carga resistiva. . . . .	90
Figura 79 – Tensão e corrente de saída para carga resistiva. . . . .	91

Figura 80 – Tensão e corrente de saída com $L=0,8$ mH e $R=97,8 \Omega$ . . . . .	91
Figura 81 – Tensão e corrente de saída com $L=8,95$ mH e $R=74 \Omega$ . . . . .	92
Figura 82 – Tensão e corrente de saída com $L=18,7$ mH e $R=35 \Omega$ . . . . .	92
Figura 83 – Tensão e corrente de saída com $L=41,7$ mH. . . . .	93
Figura 84 – Tensão $V_{os}$ e corrente $I_{Pri}$ com $L=41,7$ mH. . . . .	94
Figura 85 – Tensão $V_{os}$ e corrente $I_{os}$ com $L=52,7$ mH. . . . .	94
Figura 86 – Tensão no barramento CC. . . . .	95
Figura 87 – Rendimento versus a potência de saída para 15 níveis. . . . .	95
Figura 88 – Circuito do inversor simulado no Powersim com bloco de código em linguagem C. . . . .	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 15 níveis. . . . .	45
Tabela 2 – Contribuição de cada célula em relação a potência $P_{os}$ e seu somatório para a saída total. . . . .	55
Tabela 3 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 7 níveis na tensão de saída. . . . .	58
Tabela 4 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 9 níveis na tensão de saída. . . . .	64
Tabela 5 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 11 níveis na tensão de saída. . . . .	69
Tabela 6 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 13 níveis na tensão de saída. . . . .	75
Tabela 7 – Distorção harmônica total e pesos das fontes para as configuração de 7 até 15 níveis. . . . .	80
Tabela 8 – Tensões de pico aplicadas nas chaves e filtro indutivo demandado para DHT=5% em $I_{os}$ . . . . .	80
Tabela 9 – Relação de frequência das chaves das células 2L e L em comparação com a frequência fundamental para as configurações de 7 a 15 níveis. . . . .	81
Tabela 10 – Chaves utilizadas na montagem da topologia. . . . .	83
Tabela 11 – Dados de rendimento, resistência, indutância, potência ativa e fator de potência. . . . .	96

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	<i>Corrente Contínua</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation (Modulação por largura de pulso)</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems (Sistemas de transmissão em corrente alternada flexíveis)</i>
DHT	<i>Distorção Harmônica Total</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
NPC	<i>Neutral Point Clamped (Ponto neutro grampeado)</i>
IEM	<i>Interferência Eletromagnética</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolar de porta isolada)</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor (Tiristor de desligamento pela porta)</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V$	Volt
$I_{os}$	Corrente de saída do inversor
$S_{xyz}$	Chave bidirecional em que os termos: x está relacionado ao número de cada módulo em cascata; y é a posição da chave pertencente a cada módulo e z é o termo que corresponde a definição de um dos interruptores pertencente a chave bidirecional utilizando dois mosfets anti-serie (a,b)
$Si1 a Si4$	Chaves do módulo em ponte H de entrada
$2L + L$	Células pertencentes à parte secundária do inversor
$V_{sx}$	Tensão da célula x
$I$	Corrente elétrica
$P$	Potência
$V_{cc}$	Tensão em corrente contínua
$T_n$	Tempo de transição de níveis
$P_x$	Peso da célula x
$\xi_{x,j}$	Peso de uma fonte da célula x, na posição j
$V_{Pri}$	Tensão do enrolamento primário
$V_{in}$	Tensão do barramento CC
$N_{Pri}$	Tensão do enrolamento primário
$N_{sx}$	Tensão do enrolamento x
$\phi$	Fluxo magnético
$I_{in}$	Corrente do barramento CC
$t$	Tempo
$V$	Tensão
$T_{iT}$	Período da tensão $V_{Pri}(t)$
$T_{pz}$	Tempo de Passagem Por Zero
$B_{max}$	Máxima densidade de fluxo magnético
$\lambda$	Ganho de tensão

$\eta$	Rendimento
$RL$	Carga resistiva e indutiva
$V_{P1} V_{P2} V_{P3}$	Tensões das fontes secundárias do inversor proposto com pesos ( $\xi$ ) 1, 2 e 4 respectivamente
$V_{os}$	Tensão de saída do inversor
$V_{oh1}$	Tensão da célula 2L
$V_{oh2}$	Tensão da célula L
$\psi$	Ângulo do fator de deslocamento
$P_{os}$	Potência de saída do inversor
$\partial$	Relação de transformação
$r$	Variável que compõe a equação para cálculo do indutor estando o inversor operando com 7 níveis e a frequência sendo alterada, conforme a necessidade requerida pela aplicação desejada, variando de década em década para valores iguais, maiores ou menores que 60 Hz.
$m$	Variável que compõe a equação para cálculo do indutor estando o inversor operando desde 9 até 15 níveis e a frequência sendo alterada, conforme a necessidade requerida pela aplicação desejada, variando de década em década para valores iguais, maiores ou menores que 60 Hz.

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	19
1.1	<b>Proposta da dissertação</b>	24
1.2	<b>Objetivo</b>	24
2	<b>REVISÃO SOBRE CONVERSORES MULTINÍVEIS</b>	26
2.1	<b>Introdução</b>	26
2.2	<b>Revisão bibliográfica sobre topologias de conversores multiníveis</b>	26
2.2.1	<i>Conversores multiníveis simétricos</i>	26
2.2.2	<i>Conversores multiníveis híbridos</i>	30
2.3	<b>Considerações finais</b>	40
3	<b>PROPOSTA DE UM INVERSOR MULTINIVEL BIDIRECIONAL COM ATÉ 15 NÍVEIS NA TENSÃO DE SAÍDA TRABALHANDO SOMENTE COM UMA FONTE CC E UTILIZANDO POUCAS CHAVES EM CONDUÇÃO</b>	41
3.1	<b>Introdução</b>	41
3.2	<b>Topologia proposta operando com 15 níveis na saída</b>	41
3.2.1	<i>Funcionamento da topologia de inversor híbrido proposto</i>	42
3.2.2	<i>Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 15 níveis na saída</i>	44
3.3	<b>Topologia proposta operando com 7 níveis na saída</b>	57
3.3.1	<i>Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 7 níveis na saída</i>	58
3.4	<b>Topologia proposta operando com 9 níveis na saída</b>	63
3.4.1	<i>Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 9 níveis na saída</i>	63
3.5	<b>Topologia proposta operando com 11 níveis na saída</b>	68
3.5.1	<i>Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 11 níveis na saída</i>	68
3.6	<b>Topologia proposta operando com 13 níveis na saída</b>	74
3.6.1	<i>Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 13 níveis na saída</i>	74

3.7	Considerações finais . . . . .	80
4	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . .</b>	<b>82</b>
4.1	<b>Resultados para operação do transformador em 60 Hz e com 7, 11 e 15</b> <b>níveis na saída, respectivamente . . . . .</b>	<b>83</b>
4.1.1	<i>Teste realizado para 7 níveis . . . . .</i>	83
4.1.2	<i>Teste realizado para 11 níveis . . . . .</i>	83
4.1.3	<i>Teste realizado para 15 níveis . . . . .</i>	87
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>97</b>
5.1	Conclusões . . . . .	97
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	98
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>100</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO VHDL</b> <b>DESENVOLVIDO NO FPGA EP4CE22F17C6N . . . . .</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE B – CIRCUITO DO INVERSOR SIMULADO NO POWER-</b> <b>SIM E CÓDIGO DA MODULAÇÃO STAIRCASE FEITO</b> <b>EM LINGUAGEM C . . . . .</b>	<b>120</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Formas distintas de integrar as fontes de energia são presentes nos tempos contemporâneos, nessas circunstâncias, atualmente o sistema elétrico tem contado com a participação crescente das fontes renováveis. Neste cenário, o fluxo bidirecional de potência é visto como uma importante necessidade especialmente em redes elétricas inteligentes.

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência tem sido possível fazer a interface de fontes renováveis ao sistema elétrico e também proporcionar que moradores de áreas isoladas desfrutem da energia elétrica.

Segundo Singh *et al.* (2003), quando se trata de conversores CA-CC, CC-CC, ou CC-CA. Nas aplicações que requerem baixas potências e baixas tensões é frequente o uso de inversores baseados na estrutura ponte completa monofásica ou trifásica trabalhando com modulação *Pulse Width Modulation (Modulação por largura de pulso)* (PWM) bipolar ou unipolar. No entanto, quando os inversores são designados a operar em altas potências e altas tensões prevalece a capacidade de bloqueio de tensão dos dispositivos semicondutores no arranjo topológico. De acordo com Rech *et al.* (2004), as topologias multiníveis surgem no intuito de assegurar reduzidos esforços de tensão nos semicondutores e uma tensão de saída controlada em baixa frequência e com a mitigação do conteúdo harmônico.

Os conversores bidirecionais são elementos fundamentais nesse contexto. Estas topologias de conversores realizam um papel muito importante como a interligação de sistemas de transmissão em corrente contínua em alta tensão com os sistemas que trabalham em corrente alternada, além de poderem operar em sistemas de armazenamento para conexão com a rede, micro redes, atuação em veículos elétricos, sistemas isolados, dentre outras aplicações.

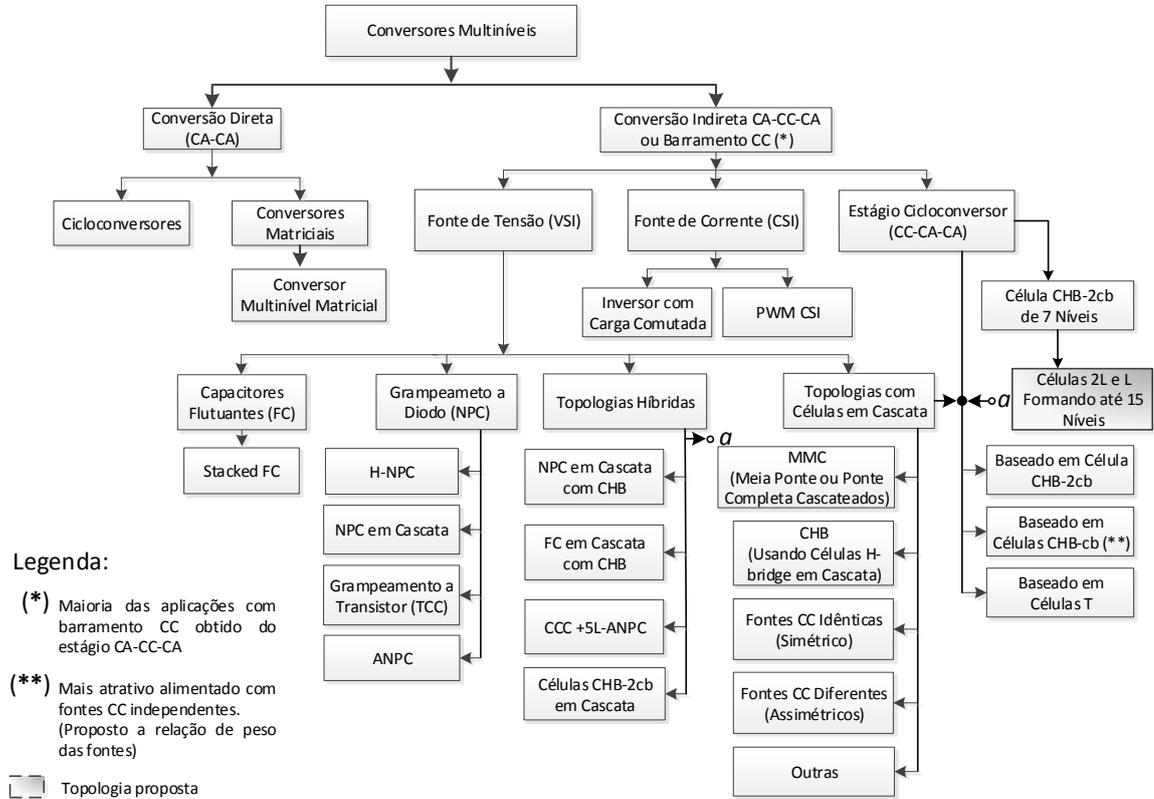
Como explica Manjrekar *et al.* (2000), as topologias conhecidas como híbridas ou assimétricas têm se mostrado bastante interessantes por proporcionar mais níveis na saída com menos componentes se comparados com a topologia convencional multinível.

Segundo Khoucha *et al.* (2009), os conversores multiníveis híbridos hoje em dia são utilizados em diversas aplicações como no acionamento de máquinas elétricas, pois possibilitam a diminuição das variações do torque quando comparadas com outras estruturas de inversor.

Ademais é comum seu uso em *Flexible AC Transmission Systems (Sistemas de transmissão em corrente alternada flexíveis)* (FACTS) e em sistemas de energias renováveis, possibilitando o controle do fluxo de potência e a diminuição do conteúdo harmônico dos sinais elétricos de saída.

A Figura 1 mostra um diagrama de blocos de conversores multiníveis.

Figura 1 – Diagrama de blocos de conversores multiníveis.



Fonte: Adaptado de Mesquita (2016).

Um ponto negativo nas topologias híbridas é a quantidade de fontes de tensão isoladas, no entanto, a topologia proposta reduz significativamente esse número de fontes para a produção da mesma quantidade de níveis na saída.

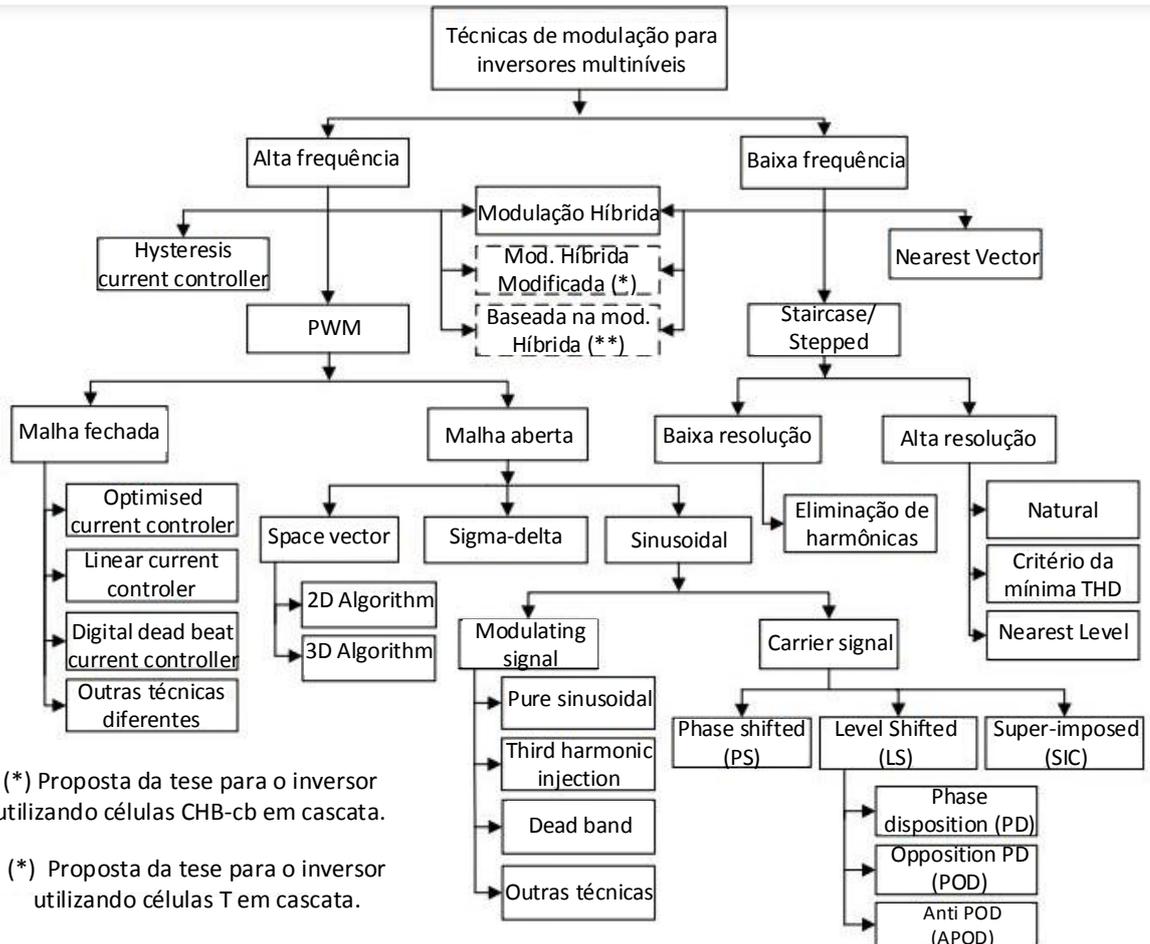
Conforme explica Xue *et al.* (2011), inversores utilizando apenas uma fonte CC e empregando um transformador de múltiplos secundários trabalhando em baixa frequência estão sendo implementados e seu uso tem sido eficaz.

Segundo Oh *et al.* (2007), em relação à utilização de estratégias de modulação aplicadas em inversores multiníveis encontramos dois grandes grupos fundamentados na modulação staircase e na modulação PWM.

O emprego dessas estratégias de modulação tem por finalidade assegurar uma baixa distorção harmônica na tensão de saída e operação do conversor com filtro de saída reduzido ou até mesmo sem filtro.

A Figura 2 mostra as principais estratégias de modulação utilizadas em conversores multiníveis.

Figura 2 – Estratégias de modulação utilizadas em conversores multiníveis.



Fonte: Adaptado de Mesquita (2016).

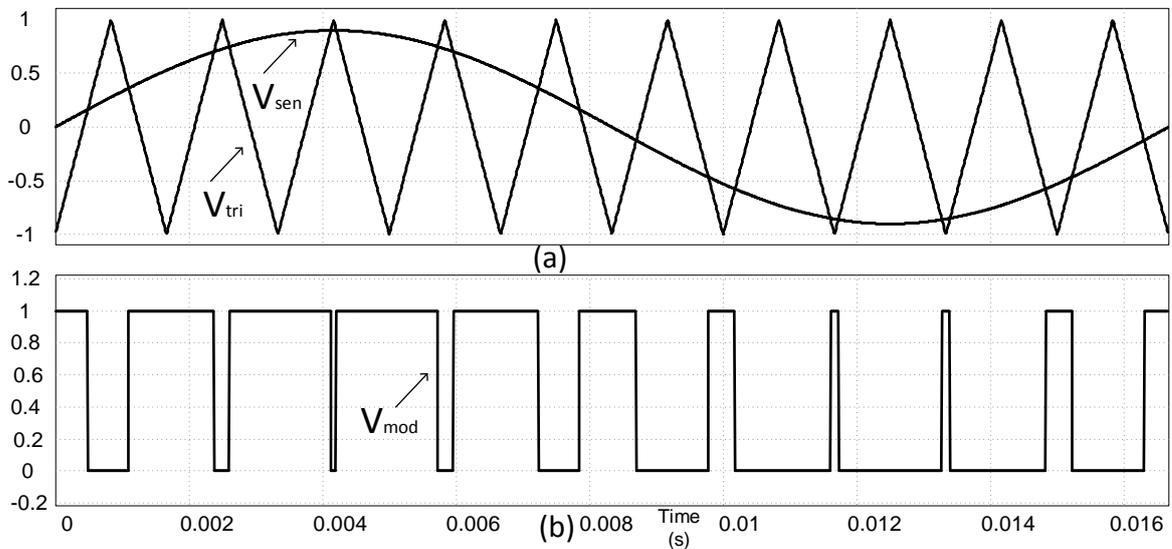
A aplicação das estratégias de modulação mostradas, proporciona saída em tensão com níveis fixos, conseguidos a partir da modulação staircase ou níveis modulados advindos de modulações PWM.

Segundo Hart (2016), a modulação PWM possibilita uma maneira de reduzir a distorção harmônica total da corrente na carga. A saída de um inversor PWM com algumas filtragens pode normalmente manter a *Distorção Harmônica Total* (DHT) em níveis aceitáveis de forma mais fácil do que um esquema de chaveamento em onda quadrada. A saída de um PWM sem filtro terá uma DHT relativamente alta, no entanto as harmônicas serão em frequências muito mais elevadas em comparação com uma onda quadrada, isto facilita a filtragem. Controle da amplitude de tensão e redução do filtro de saída são vantagens da modulação PWM, as

desvantagens ficam por parte de circuitos mais complexos para as chaves e aumento das perdas por chaveamento.

Na Figura 3, pode-se ver a técnica de modulação PWM bipolar que consiste na comparação de um sinal senoidal, servindo como moduladora e uma portadora triangular. A saída dos pulsos gerados na comparação é 1, quando o sinal senoidal, é maior que a portadora triangular e zero quando a portadora é maior que o sinal modulador.

Figura 3 – Modulação PWM bipolar. (a) Referência senoidal e portadora triangular; (b) Pulsos gerados da comparação dos sinais.



Fonte: Próprio autor (2021).

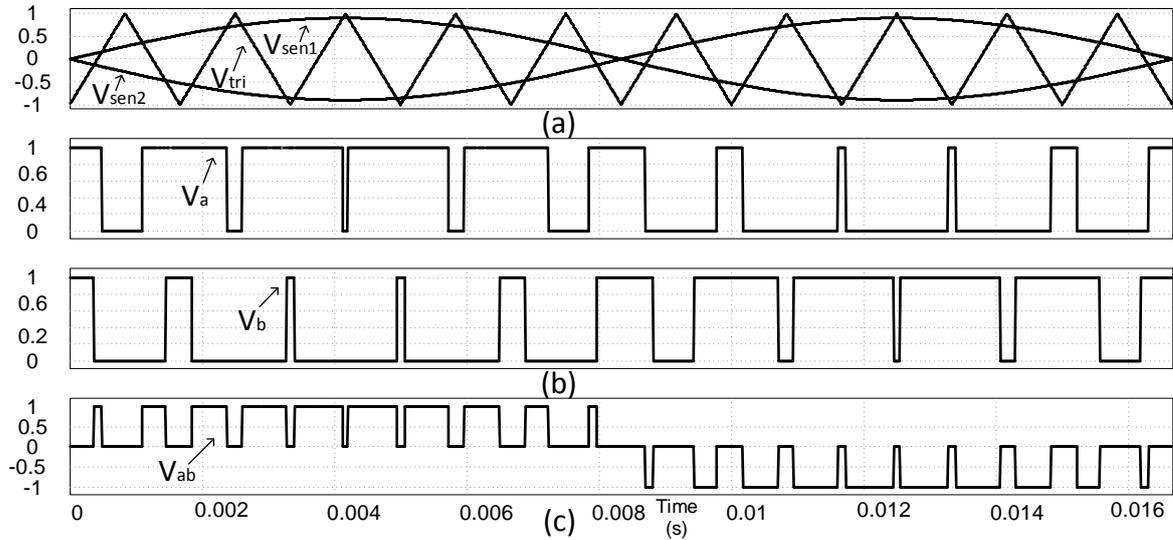
Como explica Hart (2016), no chaveamento PWM unipolar a saída é chaveada em ambos cemiciclos, de valor alto para zero e de valor baixo para zero, diferentemente do chaveamento bipolar que trabalha de valor alto para baixo.

A Figura 4 mostra a técnica de modulação PWM unipolar que consiste na comparação de duas senoides, servindo como moduladoras, com uma portadora triangular. Na Figura tem-se  $V_{tri}$  como portadora,  $V_{sen1}$  e  $V_{sen2}$  como referências,  $V_a$  e  $V_b$  são as tensões da ponte e  $V_{ab}$  é a tensão de saída.

A Figura 5 mostra os pulsos modulados a partir da técnica de modulação staircase (modulação escada).

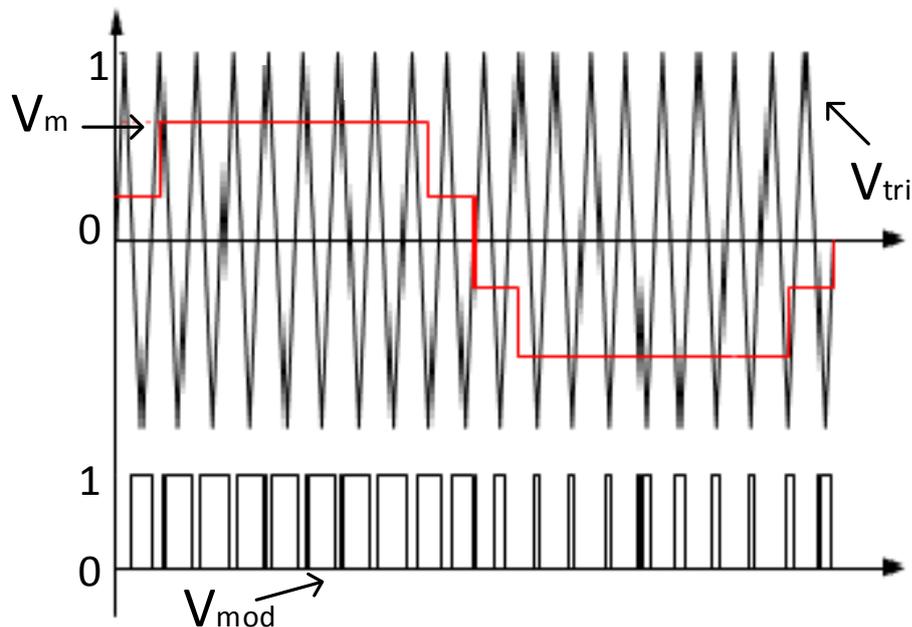
De acordo com Thorborg e Nystrom (1988), o primeiro uso da técnica de modulação em escada foi dado por Kjeld Thorborg e Ake Nystrom. A modulação escada é baseada no princípio de comparar uma onda triangular de alta frequência, com uma forma de onda modulante

Figura 4 – Modulação PWM unipolar. (a) sinais de referência e portadora triangular; (b) tensões na ponte; (c) tensão de saída.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 5 – Pulsos modulados a partir da técnica de modulação escada.



Fonte: Adaptado de Arinjoy Biswas et al. (2012).

em escada. Os pulsos são obtidos sempre que o valor do sinal de modulação em escada é maior do que o sinal da portadora triangular. Este padrão PWM é otimizado no intuito de obter um espectro de tensão de saída aceitável sobre o controle total alcançado. A frequência e o componente fundamental da tensão de saída são controlados de forma independente e são proporcionais às tensões de controle.

Segundo Mesquita (2016), a modulação staircase, baseada na eliminação de harmônicos é amplamente empregada em aplicações de altas potências com baixa frequência de comutação, normalmente, igual ou próxima a da componente fundamental.

Os valores aproximados para o cálculo dos tempos de transição de cada nível do sinal em escada são conseguidos a partir da equação 1.1.

$$T_n \approx \sin^{-1} \left[ \frac{V_{cc}(n-0,5)}{V_p} \right] \quad (1.1)$$

É importante ressaltar que a técnica utilizada em Thorborg e Nystrom (1988), é aplicada com portadora em alta frequência, enquanto que em Mesquita (2016), calcula-se os tempos de cada nível e a modulação é feita em baixa frequência.

## 1.1 Proposta da dissertação

Este trabalho propõe uma topologia de inversor multinível assimétrico com até 15 níveis que utiliza um transformador com uma fonte CC em seu primário e com múltiplos secundários operando em 60 Hz, com estágios CC-CA-CA, dessa forma a presença de adicionais pontes de diodo são dispensadas. A solução apresenta um transformador com vários secundários com pesos distintos, mas que são utilizadas apenas 3 configurações de bobinas por vez, visando-se obter uma saída com até 15 níveis na tensão. O intuito do trabalho é propor o inversor, mostrar e analisar seus sinais elétricos em simulação e em laboratório. O inversor utiliza um número reduzido de chaves semicondutoras e fonte ioladas se comparado ao inversor multinível convencional. O inversor possui uma ponte H-Bridge no primário e seu transformador funciona como um elevador de tensão, mas tendo a possibilidade também de operar como abaixador de tensão. Além de ter a vantagem de operar com baixas perdas em condução e reduzido conteúdo harmônico em comparação com o conversor multinível convencional.

## 1.2 Objetivo

Apresentação da topologia proposta com a obtenção de resultados práticos e de simulação, mostrando seu funcionamento com a modulação staircase, fazendo combinações de estados para a operação do inversor de 7 a 15 níveis, evidenciando a distorção harmônica total na saída e o filtro indutivo necessário para que a corrente fique dentro dos padrões permitidos em

normas, tais como o módulo 8 dos procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST).

## 2 REVISÃO SOBRE CONVERSORES MULTINÍVEIS

### 2.1 Introdução

Neste capítulo serão abordadas algumas topologias de conversores multiníveis, mostrando a evolução desses tipos de conversores.

### 2.2 Revisão bibliográfica sobre topologias de conversores multiníveis

#### 2.2.1 *Conversores multiníveis simétricos*

De acordo com Krishna e Suresh (2016), o inversor convencional de dois níveis produz apenas dois níveis na tensão de saída. A saída em *Corrente Alternada* (CA) é gerada, mas possui muitos harmônicos que causam alta taxa de distorção em comparação com o conversor multinível. No inversor multinível, gera-se mais de dois níveis de tensão que exibem forma de onda de tensão de saída senoidal quase pura, apresenta baixa variação de tensão e baixa distorção harmônica. Por conter vários níveis na tensão de saída, a forma de onda se torna mais suave a medida que tem-se mais níveis, mas com níveis crescentes, o circuito se torna mais complexo devido a adição de chaves semicondutoras e um circuito de controle faz-se necessário.

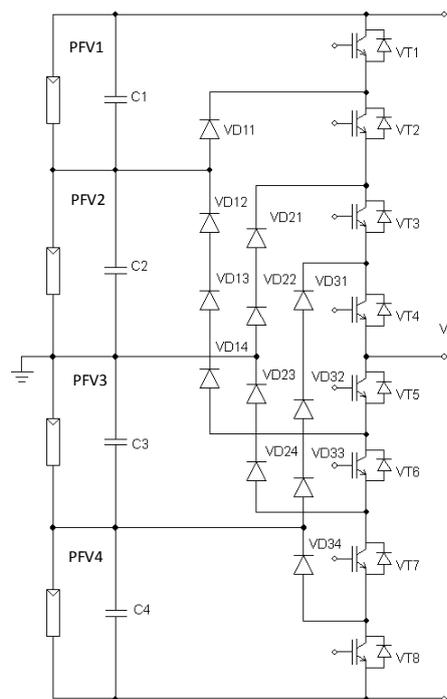
Segundo Enjeti e Choi (1993), Kouro *et al.* (2010), Krishnamoorthy *et al.* (2012), ao longo do tempo, diversas topologias de conversores multiníveis têm sido propostas pela comunidade científica, com características peculiares como o uso de apenas uma fonte CC ou de fontes CC isoladas, CC-CC, conversão direta CA-CA, ou indireta na maior parte dos casos CA-CC-CA.

De acordo com Franquelo *et al.* (2008), os conversores multiníveis se enquadram em três categorias principais: conversores com diodos de bloqueio, conversores com capacitores flutuantes e associação de pontes H. Na Figura 6 é mostrado o circuito do conversor com diodos de bloqueio.

Segundo Khomfoi e Tolbert (2011), Rodriguez *et al.* (2002), Perez *et al.* (2011), cada fase do conversor com diodos de bloqueio é alimentada pelo barramento CC que pode ser composto por painéis fotovoltaicos ou por outras fontes de corrente contínua. O nó que divide o número de capacitores em duas partes pode ser nomeado como ponto médio (este é o nó entre C2 e C3 no exemplo). Por esta razão, esse conversor é chamado de *Neutral Point Clamped* (*Ponto neutro grampeado*) (NPC). A tensão de entrada é dividida entre os capacitores de entrada e o

número deles é proporcional ao número de níveis. Esta topologia se caracteriza pela presença de diodos de bloqueio. Tensões reversas de valores diferentes são aplicadas aos diodos, então é necessário selecionar diodos com características diferentes dependendo da tensão imposta em cada um. Além disso, este problema pode ser resolvido introduzindo vários diodos com pequenas tensões reversas de valores iguais em vez de único diodo de maior tensão. O circuito é de fácil implementação, tem alta eficiência, mas mostra baixa modularidade. O Número de níveis eleva a quantidade de interruptores eletrônicos. Para o caso de vários níveis este conversor torna-se impraticável, pois a quantidade de chaves simicindutoras necessária é muito alta. É necessário escolher diodos com tempo de recuperação bem rápido, tratando-se do uso de modulação PWM devido as altas freqüências de comutação. A dificuldade do circuito em questão é o controle de cada tensão de nível.

Figura 6 – Conversor com ponto neutro grampeado.



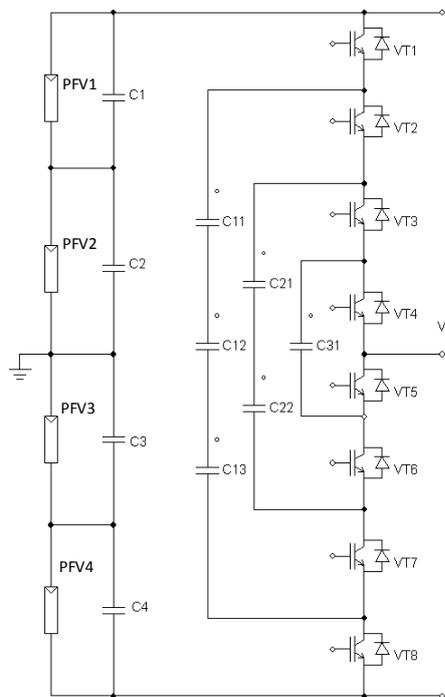
Fonte: Adaptado de Sergey V et al. (2013).

O circuito principal do conversor com capacitores flutuantes é mostrado na Figura 7.

De acordo Calais e Agelidis (1998), Rodriguez *et al.* (2002), a estrutura e as características do conversor com capacitor flutuante são semelhantes aos do conversor a diodo grampeado. Existem capacitores de alta tensão além dos interruptores de alimentação usados neste circuito, ressaltando-se que pode-se construir este tipo de conversor com tensões baixas ou médias também. A tensão da fonte CC é dividida entre os capacitores, no entanto, é possível usar

várias fontes de tensão, por exemplo células solares. É necessário que as tensões em cada painel fotovoltaico, da Figura 7, sejam iguais e a corrente através do capacitor C31 seja zero neste caso. Diferentemente do inversor com diodo grampeado. O circuito é aplicado principalmente em sistemas de média tensão com ampla faixa de frequência de comutação das chaves. Os circuitos construídos sobre esta topologia apresentam alta modularidade enquanto usado em sistemas de geração fotovoltaica. Esta topologia permite controlar o fluxo de potência ativa e reativa, para que possa atuar como um filtro ativo. Os principais deméritos desta topologia são grandes quantidades de capacitores e alto custo, o que se aproxima do custo de transformador utilizando inversor com diodos de bloqueio. Devido ao grande número de componentes, a configuração de todo o sistema é extremamente complicada, tratando-se do número de níveis do conversor.

Figura 7 – Conversor com capacitores flutuantes.



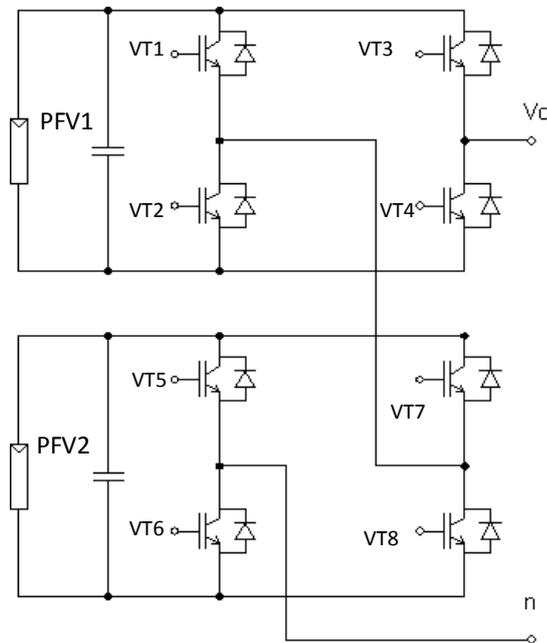
Fonte: Adaptado de Sergey V et al. (2013).

Na Figura 8 é possível observar o inversor de cinco níveis com pontes H.

Como explica Brovanov e Egorov (2013), Cada ponte é possível fornecer três níveis de tensão em sua saída. Desta forma, o número do nível de tensão de saída é definido por  $m = 2s + 1$ , onde  $s$  é um número de fontes de tensão separadas. O número de fontes de tensão CC separadas necessárias é igual ao número de pontes H requeridas. Isto determina uma característica da topologia. Este recurso é uma limitação para muitas aplicações, mas é possível utilizar esta topologia para implementações fotovoltaicas. A vantagem desta topologia de circuito

é a alta modularidade que é indispensável para vários tipos de conexões com transformadores para fornecimento ou carregamento. Além disso, este tipo de circuito fornece forma de onda quase senoidal da tensão de saída.

Figura 8 – Conversor em cascata com saída contendo 5 níveis.



Fonte: Adaptado de Sergey V et al. (2013).

Ressalta-se que os conversores mostrados nas Figuras 6, 7 e 8 estão recebendo energia de células fotovoltaicas, mas podendo ser outra a fonte provedora de energia CC para essas topologias.

Segundo Jana *et al.* (2016), os conversores multiníveis em cascata são encontrados em muitos esquemas de conversão de energia para aplicações de médias e altas potências devido a várias vantagens, como baixo DHT, tamanho do filtro reduzido e perdas no núcleo específicas reduzidas com o filtro indutivo. Ele também mantém na comutação baixas perdas e baixa *Interferência Eletromagnética* (IEM). Na condução as perdas aumentam devido ao aumento no número de interruptores em caminho de condução. A seleção adequada das chaves eletrônicas pode diminuir as perdas em condução, em comparação com uma escolha incorreta, em proporção ao número de dispositivos comutadores semicondutores usados. Estes inversores são utilizados em aplicações como energia renovável. Existem inúmeras vantagens dos inversores Ponte H em cascata (do inglês *Cascaded H-Brige*, CHB) em comparação com outras topologias de inversor multinível. Pode-se citar algumas vantagens: redução dos componentes gerais e do estresse de tensão. Isso também resulta em melhor qualidade de energia. inversor multinível de pontes H

em cascata CHB é formado pela conexão em série de inversores em ponte H monofásicos.

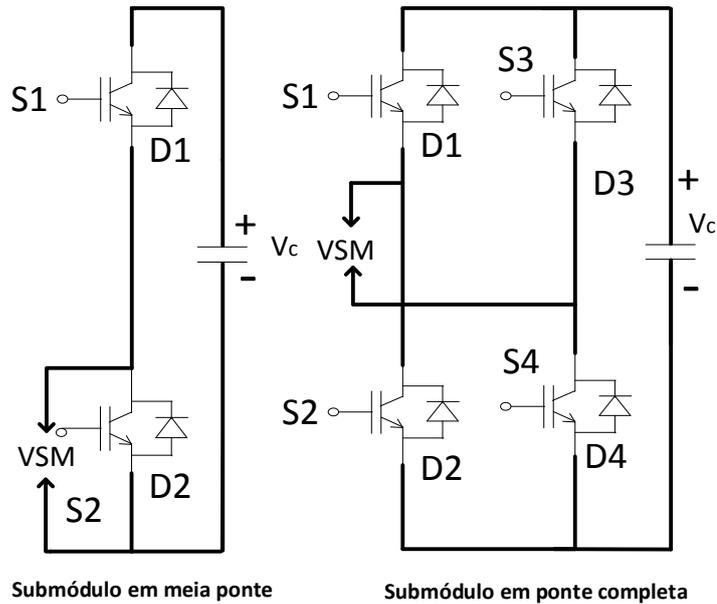
Segundo Debnath *et al.* (2014), Thitichaiworakorn *et al.* (2013), Akagi (2011), Kenzelmann *et al.* (2014), Li *et al.* (2003), Vatani *et al.* (2014), Wang *et al.* (1998), Son *et al.* (2012), Solas *et al.* (2012) o conversor modular multinível pode ser monofásico ou trifásico.

Uma Estrutura de Submódulo simplificada e comumente usada é mostrado na Figura 9 (a). O conversor é composto por duas chaves e um capacitor conectado em configuração de meia ponte. Os *Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolar de porta isolada)* (IGBT) são usados como interruptores devido a sua alta capacidade de trabalho em elevados níveis de tensão e corrente. Dois níveis de tensão podem ser obtidos de acordo com a mudança de estado. A tensão do capacitor  $V_c$  está disponível no circuito conversor se a chave S1 estiver fechada e a chave S2 estiver aberta ou simplesmente o submódulo é inserido no circuito. Quando fecha-se a chave S1 e abri-se a chave S2, tem-se tensão zero no submódulo. Outro tipo de submódulo que consiste em um capacitor e quatro chaves semicondutoras conectadas em configuração de ponte completa é mostrado na Figura 9 (b). Três níveis de tensão diferentes podem ser obtidos usando esta configuração. A tensão  $V_c$  é inserida no circuito conversor quando os interruptores S1 e S4 estão fechados enquanto os interruptores S2 e S3 estão abertos. A tensão negativa  $-V_c$  é obtida quando os interruptores S1 e S4 estão em nível baixo e os interruptores S2 e S3 estão em nível alto. Algumas outras estruturas de submódulos são submódulo grampeado em modo duplo, submódulo do tipo capacitor flutuante e submódulo grampeado com ponto neutro. O circuito de meia ponte é o mais utilizado entre os discutidos a cima devido à sua estrutura simples, controle fácil e baixas perdas. Os conversores de ponto neutro grampeado e submódulo do tipo capacitor flutuante raramente são usados, pois estes não são uma opção atrativa do ponto de vista de controle.

### **2.2.2 Conversores multiníveis híbridos**

Como relata Krishna e Suresh (2016), para diminuir o número de fontes CC em aplicações em alta potência utilizando inversor multinível com diodo grampeado e capacitor flutuante, são usados em vez dos inversores em ponte H com multicelulas, o inversor multinível híbrido de nível misto. O conversor de 9 níveis pode ser implementado usando o inversor com grampeamento a diodo de três níveis em associação. Apenas duas fontes CC são necessárias para uma fase. A vantagem desta nova estrutura é que ela precisa de fontes CC menores, enquanto a desvantagem é que seu controle é muito complicado. Na Figura 10 pode-se observar o inversor

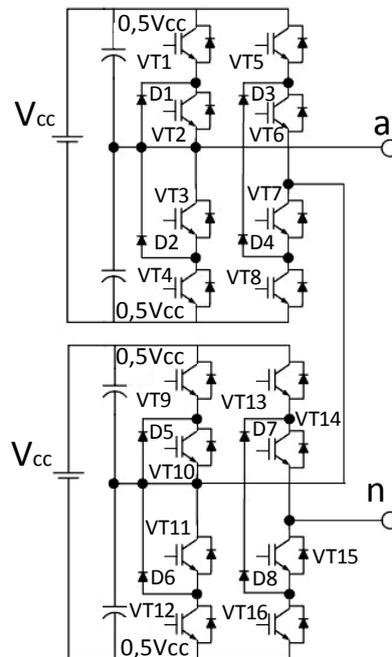
Figura 9 – Estruturas de submódulo.



Fonte: Adaptado de Akbar, Hasan (2018).

multinível híbrido de nível misto com 9 níveis.

Figura 10 – Inversor multinível híbrido usando módulos de conversor com diodo grampeado de três níveis como célula conversora em cascata para aumentar os níveis de tensão.



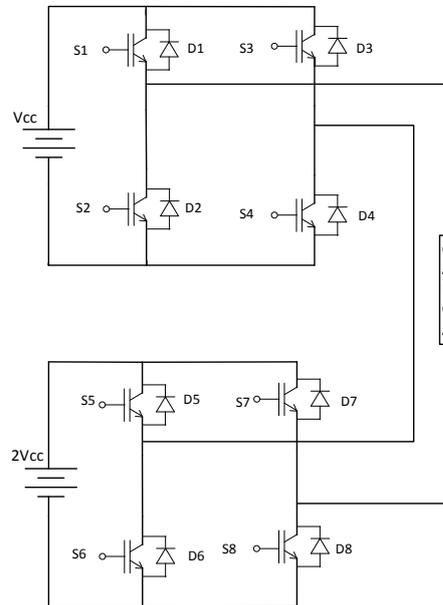
Fonte: Adaptado de Krishna, Suresh (2016).

A Figura 11 mostra o inversor em ponte H em cascata com duas fontes CC de valores  $V_{cc}$  e  $2V_{cc}$ , respectivamente.

Segundo Song *et al.* (2009), o inversor multinível H-bridge em cascata com duas

fontes CC separadas com magnitudes distintas é conhecido como inversor H-Bridge em cascata assimétrico.

Figura 11 – Inversor híbrido em cascata com pontes H-Bridge.



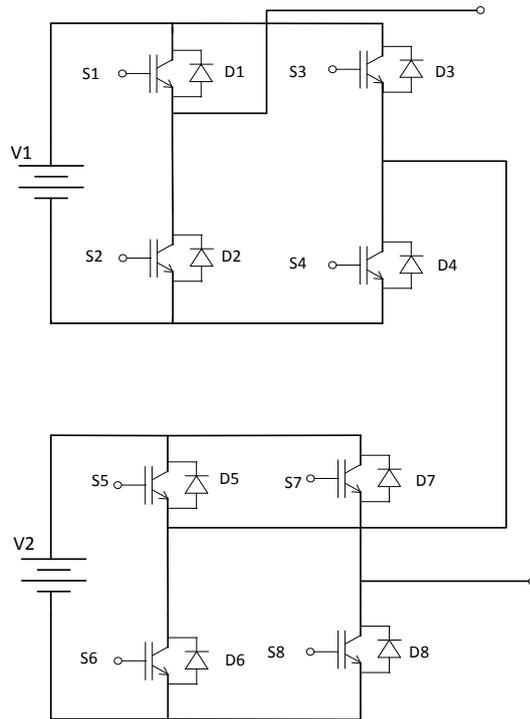
Fonte: Adaptado de Krishna e Suresh (2016).

Segundo Manjrekar *et al.* (2000), Lund *et al.* (1999), Manjrekar e Lipo (1998), o conversor multinível híbrido é derivado do tradicional conversor em cascata. No conversor em cascata tradicional, a tensão CC do barramento de cada módulo tem o mesmo valor, frequência de comutação e a capacidade de bloqueio de tensão de todos interruptores é a mesma. Conforme mostrado na Figura 12, o conversor multinível híbrido em cascata tem a mesma configuração que o conversor ponte completa em cascata tradicional, mas a tensão CC do barramento, bem como os dispositivos, frequência de comutação e o estresse de tensão entre os dispositivos é diferente.

De acordo com Sneineh *et al.* (2006), empregando o método de modulação híbrida e o conversor multinível em cascata com capacitor grampeado com barramentos CC de tensões distintas, um conversor multinível híbrido em cascata com capacitor grampeado é criado. *Gate Turn-Off Thyristor (Tiristor de desligamento pela porta)* (GTO)s e IGBTs são empregados no módulo de alta tensão e de menor tensão respectivamente. O conversor é mostrado na Figura 13. O conversor produz mais níveis de tensão de saída quando comparado à configuração convencional com o mesmo número de fontes CC.

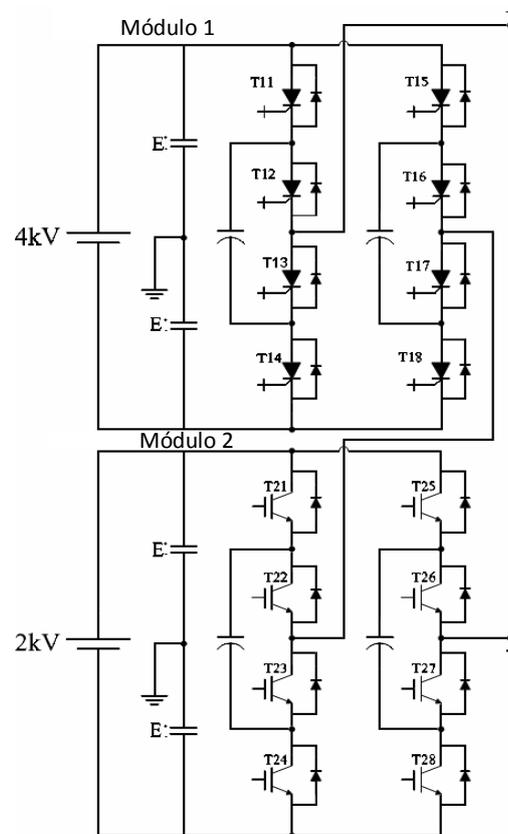
Como relatam Rodriguez *et al.* (2002), Khomfoi e Tolbert (2011), a topologia, mostrada na Figura 14, é adquirida pela substituição das pontes H pelo esquema de diodos de bloqueio formando o inversor em cascata. Além disso, as pontes H podem ser substituídas pelo

Figura 12 – Inversor multinível monofásico híbrido em cascata.



Fonte: Adaptado de Sneineh (2006).

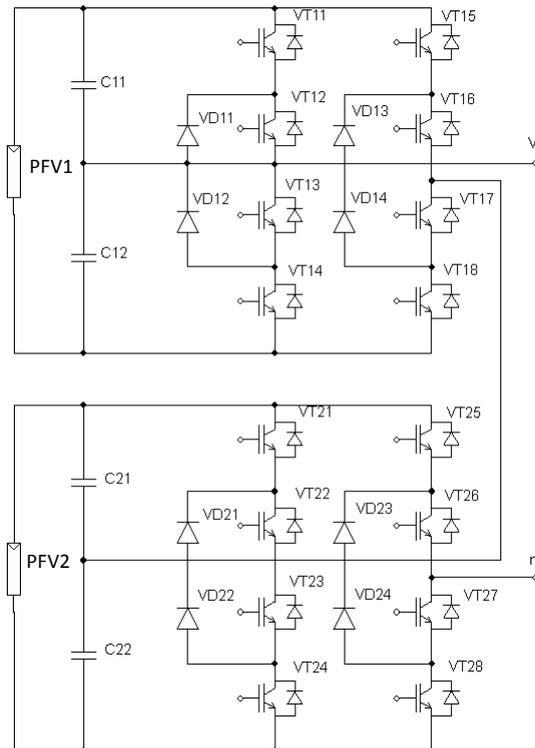
Figura 13 – Conversor multinível híbrido em cascata com capacitor grampeado.



Fonte: Adaptado de Sneineh (2006).

esquema de capacitores flutuantes. Por exemplo, tendo apenas duas fontes CC, uma tensão saída com nove níveis pode ser obtida. O mesmo resultado pode ser alcançado usando quatro fontes CC separadas em uma topologia em cascata convencional. O Circuito é apropriado para diminuir o número de Fontes CC e é empregado em aplicações de alta tensão e alta potência. Uma desvantagem do conversor fica por parte do complicado controle de todo o circuito.

Figura 14 – Conversor multinível híbrido de nível misto.

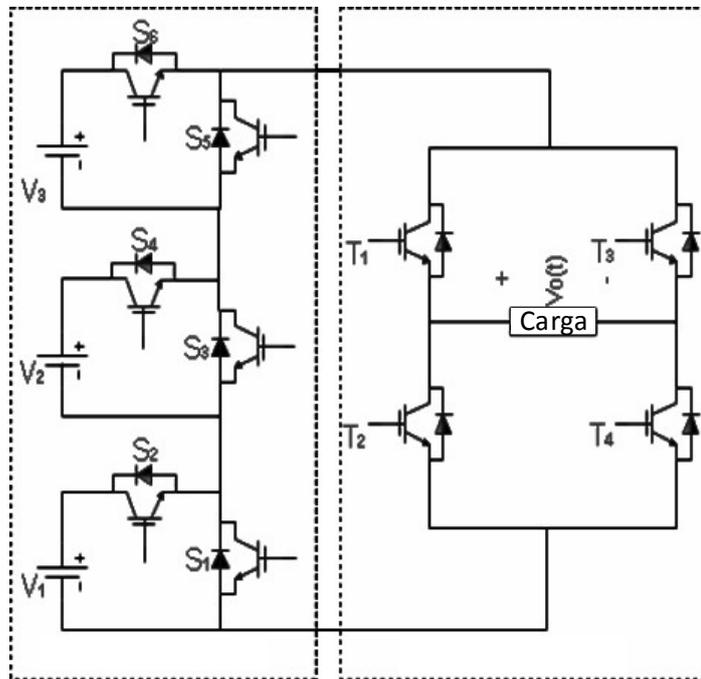


Fonte: Adaptado de Sneineh (2006).

Segundo Ghazanfari *et al.* (2013), Uma topologia de inversor multinível híbrido monofásico com quinze níveis e número de chaves reduzido é mostrada na Figura 15. Esta topologia consiste em três fontes de tensão CC e dez interruptores eletrônicos de potência. A topologia pode ser dividida em duas partes, ou seja, gerador de nível e gerador de polaridade. O conversor possui fontes assimétricas com configuração de :  $V_1 = 48 \text{ V}$ ,  $V_2 = 96 \text{ V}$  e  $V_2 = 192 \text{ V}$ . A função do gerador de nível é sintetizar diferentes níveis de tensão usando uma combinação adequada de fontes e chaves semicondutoras. O gerador de polaridade consiste em quatro interruptores eletrônicos de potência de bloqueio unidirecional e de condução bidirecional independentemente do número de níveis de produzidos. O gerador de polaridade inverte a polaridade dos níveis gerados pelo gerador de nível alternadamente usando uma combinação de comutação adequada para produzir uma forma de onda simétrica. Chaves usadas em geradores

de polaridade são de classificação de alta tensão e baixa frequência, esses interruptores serão operados em 50 Hz, enquanto os interruptores usados no gerador de nível são de baixa tensão e trabalham em alta frequência.

Figura 15 – Topologia de inversor multinível híbrido com quantidade de interruptores reduzida.



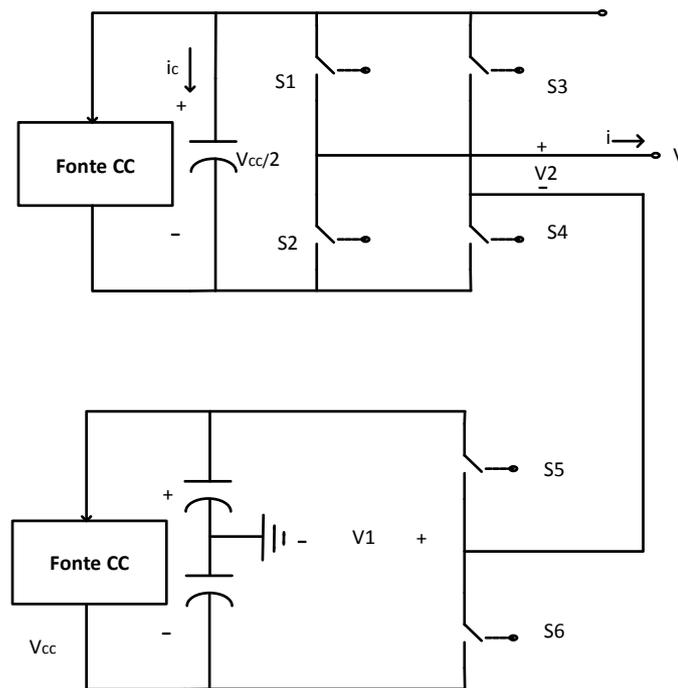
Fonte: Adaptado de Azad (2018).

A Figura 16 mostra a topologia de um inversor multinível híbrido.

De acordo com Ghazanfari *et al.* (2013), Liao *et al.* (2008), a parte inferior do inversor da Figura 16 é um braço de um padrão de inversor de 3 braços com fonte de alimentação CC. A parte superior é uma ponte H em série com cada braço do inversor padrão. A ponte H pode usar um fonte de alimentação CC separada ou um capacitor como a fonte de energia CC. A tensão de saída  $V_1$  deste braço (em relação ao terra) é  $+V_{CC}/2$  ( $S_5$  fechado) ou  $-V_{CC}/2$  ( $S_6$  fechado). Este braço é conectado em série com uma ponte H que por sua vez a tensão é fornecida por um capacitor. Se o capacitor for mantido carregado para  $V_{CC}/2$ , então a tensão de saída da ponte H pode assumir os valores  $+V_{CC}/2$  ( $S_1, S_4$  fechado), 0 ( $S_1, S_2$  fechado ou  $S_3, S_4$  fechado) ou  $-V_{CC}/2$  ( $S_2, S_3$  fechado).

Conforme Khoucha *et al.* (2010), o circuito de alimentação de um inversor multilevel em cascata utilizando pontes H é ilustrado na Figura 17. O inversor é composto por uma conexão em série de células de potência, cada uma contendo um inversor em ponte H e uma fonte CC isolada. No caso particular de inversores assimétricos, essas fontes não são iguais ( $V_1 > V_2$ ).

Figura 16 – Topologia monofásica simplificada de um inversor multinível híbrido.



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2008).

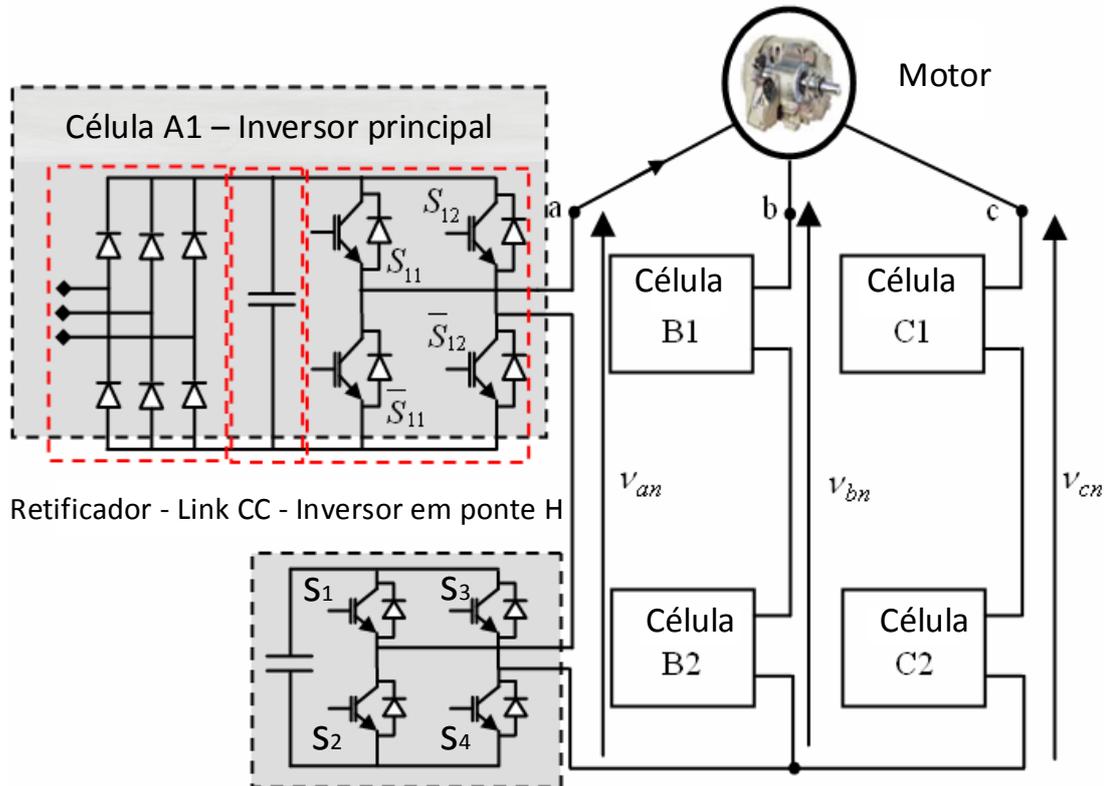
A assimetria das tensões de entrada pode reduzir, ou quando projetado corretamente, eliminar níveis de saída redundantes, maximizando o número de diferentes níveis gerados pelo inversor. Uma célula particular  $i$  pode gerar três níveis de tensão  $(+V_i, 0, -V_i)$ . A tensão total de saída do inversor para uma determinada fase  $j$  é então definida pela equação 2.1. Onde  $V_{in}$  é a tensão de saída total da fase  $i$ . Observa-se como a tensão de saída de uma célula é definida por uma das quatro combinações binárias do estado de comutação, com “1” e “0” representando os estados ligado e desligado da correspondente chave, respectivamente. O inversor gera diferentes níveis de tensão (por exemplo, um inversor com  $m = 4$  células pode gerar  $(2m + 1 - 1 = 31)$  diferentes níveis de tensão). Ao usar sistemas trifásicos, o número de vetores de tensão diferentes é dado por  $3nl(nl - 1) + 1$ , onde  $nl$  é o número de níveis. Por exemplo, para  $m = 4$  caso com 31 níveis, há 2791 vetores de tensões diferentes.

$$V_{iN} = \sum_{j=1}^m V_{ij} = \sum_{j=1}^m V_j (S_{j1} - S_{j2}), i \in \{a, b, c\} \quad (2.1)$$

A Figura 18 mostra um inversor híbrido de 9 níveis em cascata com indutor acoplado.

Segundo Salehahari e Babaei (2016), o inversor da Figura 18 consiste em duas partes. A primeira parte é um inversor com indutor acoplado de 5 níveis. Esta parte tem seis chaves eletrônicas de potência ( $S_{1,1}$  a  $S_{6,1}$ ), e um indutor acoplado. Este inversor de 5 níveis é

Figura 17 – Inversor monofásico híbrido de 7 níveis em ponte H.



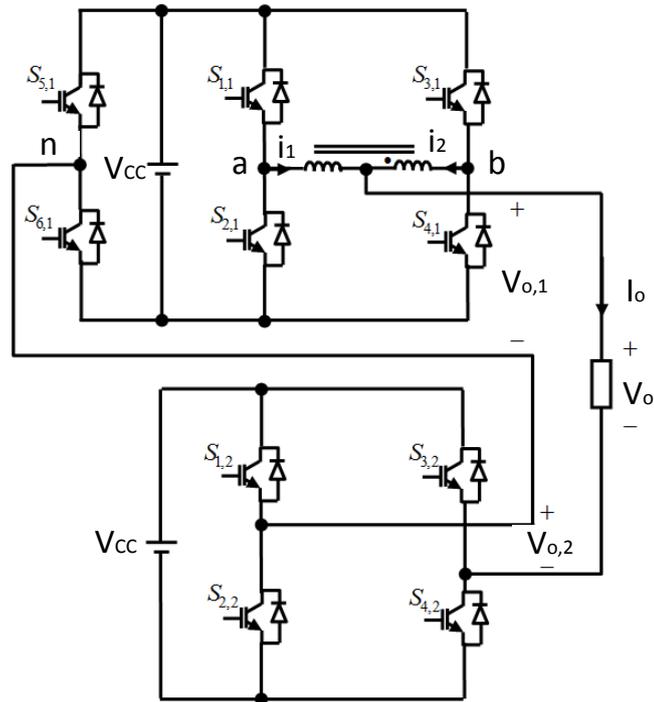
Fonte: Adaptado de koucha et al. (2010).

conectado em cascata com uma ponte H. Devido ao uso do indutor acoplado, a corrente através dos interruptores ( $S_{11}$  a  $S_{4,1}$ ) é a metade da corrente de saída. No entanto, as chaves  $S_{51}, S_{6,1}, S_{12}$  e  $S_{4,2}$  operam com a faixa de corrente igual a corrente de saída.

Uma topologia híbrida de 7 níveis é apresentada na Figura 19. De acordo com Yanhong *et al.* (2014), a estrutura é composta por um tipo de topologia em T trifásico de 3 níveis como um inversor principal e 3 células tipo T de 3 níveis monofásicas (inversores auxiliares) para formar uma topologia de 7 níveis. Na proposta, apenas uma única fonte CC é necessária para alimentar o inversor. Dois capacitores são conectados em série como barramento CC dos inversores auxiliares.

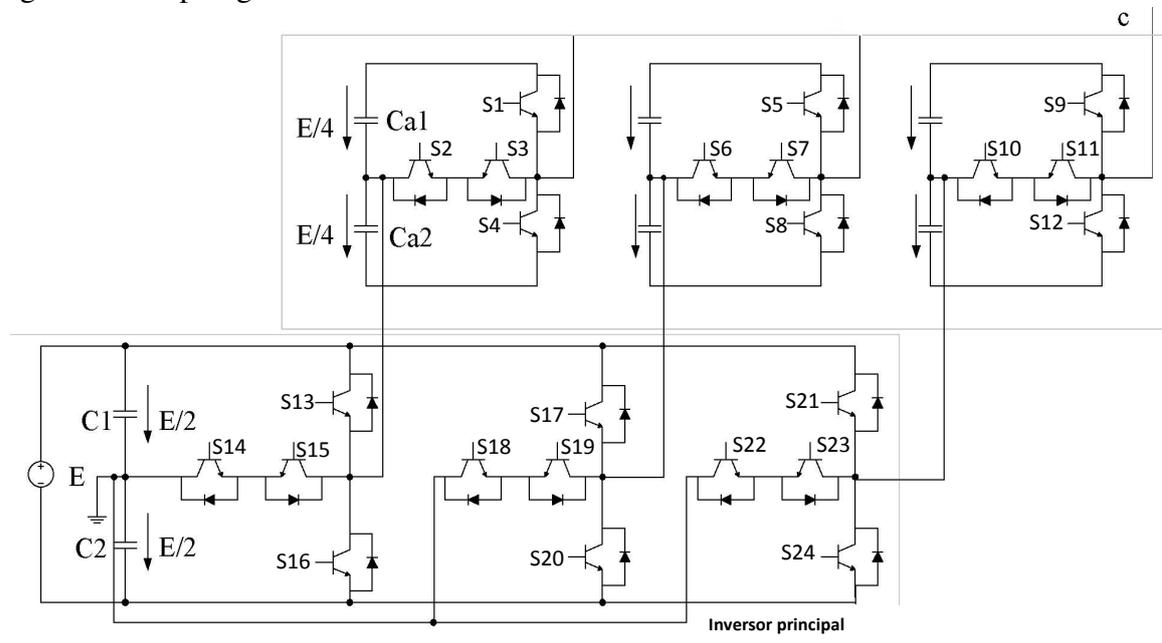
Conforme Mesquita (2016), a topologia exibida na Figura 20 é composta por uma ponte completa que chaveia o primário de um transformador de múltiplos secundários o qual opera na frequência fundamental. Cada módulo base intitulado neste trabalho como célula T é composto por apenas três chaves bidirecionais. A associação de duas células T em cascata é possível gerar 17 níveis modulados na tensão de saída com modulação PWM proposta. As principais vantagens desta topologia são: bidirecionalidade, pode operar como elevador ou abaixador, apresenta reduzido filtro de saída, baixo IEM e emprega apenas 2 chaves bidirecionais

Figura 18 – Inversor com indutor acoplado em cascata híbrido de 9 níveis.



Fonte: Adaptado de Salehari, Babaei (2010).

Figura 19 – Topologia híbrida de 7 níveis com fonte CC única.

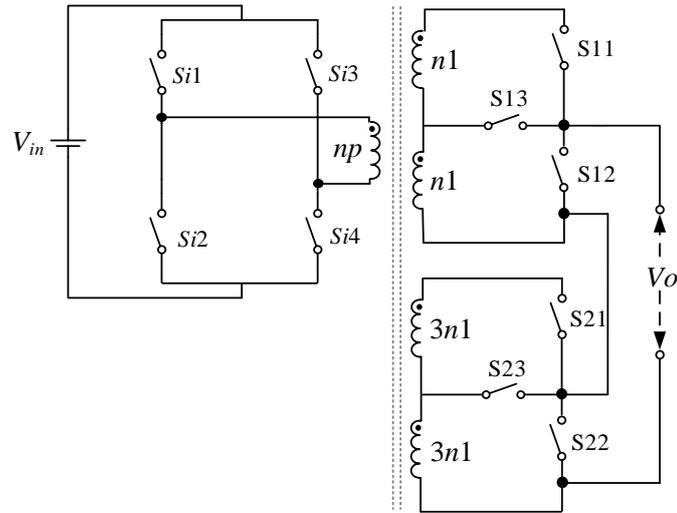


Fonte: Adaptado de Yanhong et al. (2014).

em condução no estágio de saída para confecção dos 17 níveis.

O inversor da Figura 21 é capaz de gerar 49 níveis na tensão de saída e trabalha com duas células denominadas CHB-2cb. Segundo Mesquita (2016), a topologia é composta por uma tensão,  $V_{in}$ , que alimenta o barramento de entrada da célula H-bridge que por sua vez

Figura 20 – Topologia empregando células T.

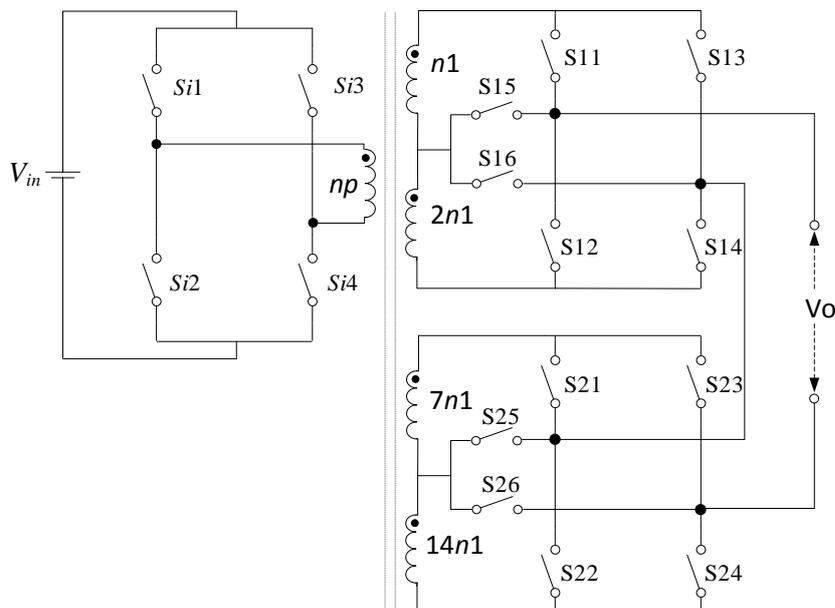


Fonte: Mesquita (2016).

alimenta o primário do transformador de múltiplos secundários que opera em média frequência e é responsável por garantir a magnitude de tensão desejada de cada célula, CHB2cb. Para o funcionamento da topologia proposta, as células CHB-2cb em cascata devem operar com chaves bidirecionais.

A topologia proposta neste trabalho baseia-se no inversor de 49 níveis de Mesquita (2016), a estrutura com foi rearranjada para operação com até 15 níveis na saída e operando com apenas 3 secundários, diferentemente do inversor de até 49 níveis, que funciona com 4 bobinas secundárias de pesos distintos.

Figura 21 – Inversor multinível assimétrico com 49 níveis na saída.



Fonte: Mesquita (2016).

### **2.3 Considerações finais**

Este capítulo abordou diferentes topologias de conversores multiníveis, desde as mais convencionais até estruturais mais atuais, mostrando suas características peculiares, funcionamento e componentes empregados. Foi explanado tanto sobre conversores multiníveis simétricos como acerca dos assimétricos. A revisão bibliográfica foi realizada com o intuito de mostrar inversores multiníveis desde os primórdios do estudo desta área, com inversores simétricos, e sua evolução, sendo utilizadas fontes de valores distintos para, assim formarem topologias multiníveis híbridas, e com intenção de embasar esta pesquisa.

### **3 PROPOSTA DE UM INVERSOR MULTINIVEL BIDIRECIONAL COM ATÉ 15 NÍVEIS NA TENSÃO DE SAÍDA TRABALHANDO SOMENTE COM UMA FONTE CC E UTILIZANDO POUCAS CHAVES EM CONDUÇÃO**

#### **3.1 Introdução**

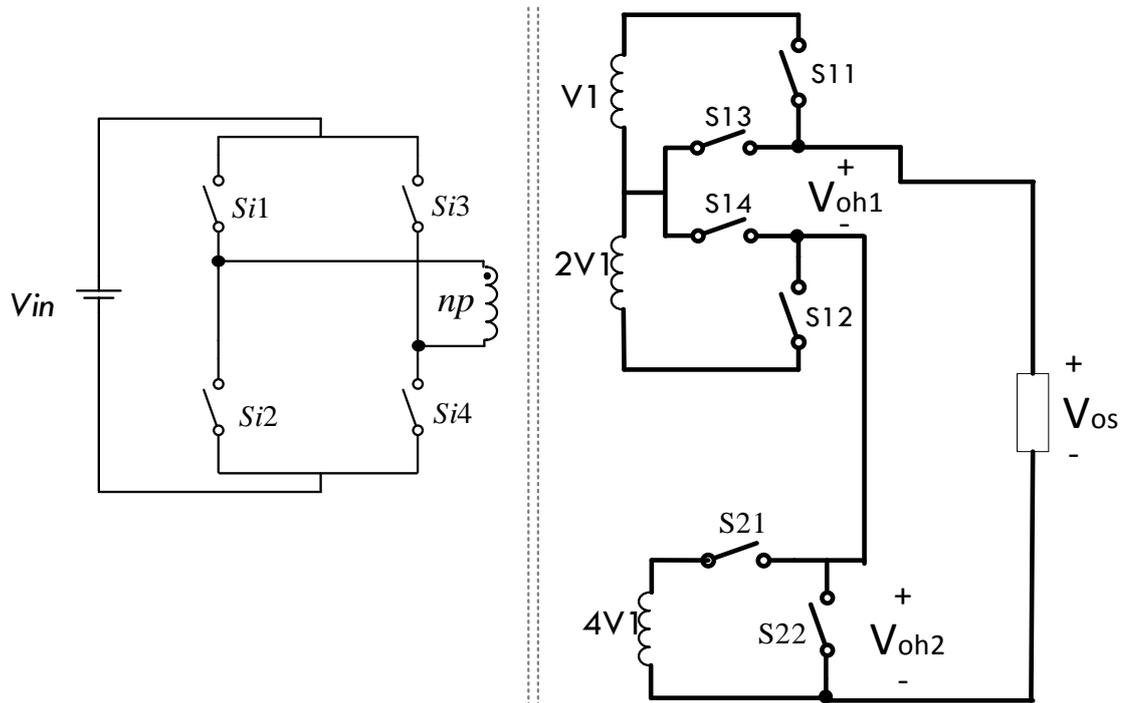
Este trabalho tem por finalidade apresentar a estrutura de uma nova topologia de inversor multinível híbrido utilizando transformador com múltiplos secundários e mostrar a análise dos sinais elétricos do inversor que utiliza um número reduzido de chaves semicondutoras se comparado ao inversor multinível convencional. Os termos assimétrico e híbrido quando utilizados em referência ao conversor, tratam da assimetria entre as fontes secundárias dos módulos que possuem valores diferentes. Serão apresentadas as informações adquiridas em simulações feitas no software powersim. O conversor foi projetado para entregar até 15 níveis na tensão de saída. O conversor possui uma ponte H-Bridge no primário do transformador e células secundárias que com uma combinação de 3 secundários por vez, com pesos diferentes das fontes, têm-se combinações distintas para se obter de 7 até 15 níveis na tensão de saída, ressaltando que para 7 níveis o conversor opera com enrolamentos secundários de mesma tensão (fontes de igual valor). O conversor utiliza 6 chaves bidirecionais (pares de mosfets) na geração dos níveis, um número bem reduzido quando comparado com o conversor multinível convencional, como já mencionado, em se tratando da máxima quantidade de níveis que a topologia proposta pode entregar. A topologia foi simulada em malha aberta para configurações de 7 até 15 níveis, isto foi possível com diferentes combinações de estados e alterando-se a tensão primária e as fontes dos módulos secundários.

#### **3.2 Topologia proposta operando com 15 níveis na saída**

Será mostrado o arranjo do inversor proposto. A topologia foi projetada visando operar em sistemas renováveis, sobretudo em sistemas isolados, entregando uma baixa taxa de distorção harmônica nos sinais de tensão e corrente de saída. A Figura 22 mostra o inversor com 15 níveis proposto em um arranjo simplificado.

A Figura 23 mostra a proposta de inversor com 15 níveis em sua configuração completa. Pode-se perceber a ponte completa disposta no primário do transformador no intuito de se obter a tensão alternada em sua saída para alimentar o transformador, formando um estágio CC-CA-CA. A utilização do transformador possibilita que o inversor opere apenas com uma

Figura 22 – Inversor com 15 níveis proposto em uma estrutura simplificada.



Inversor de 15 níveis Célula 2L+L

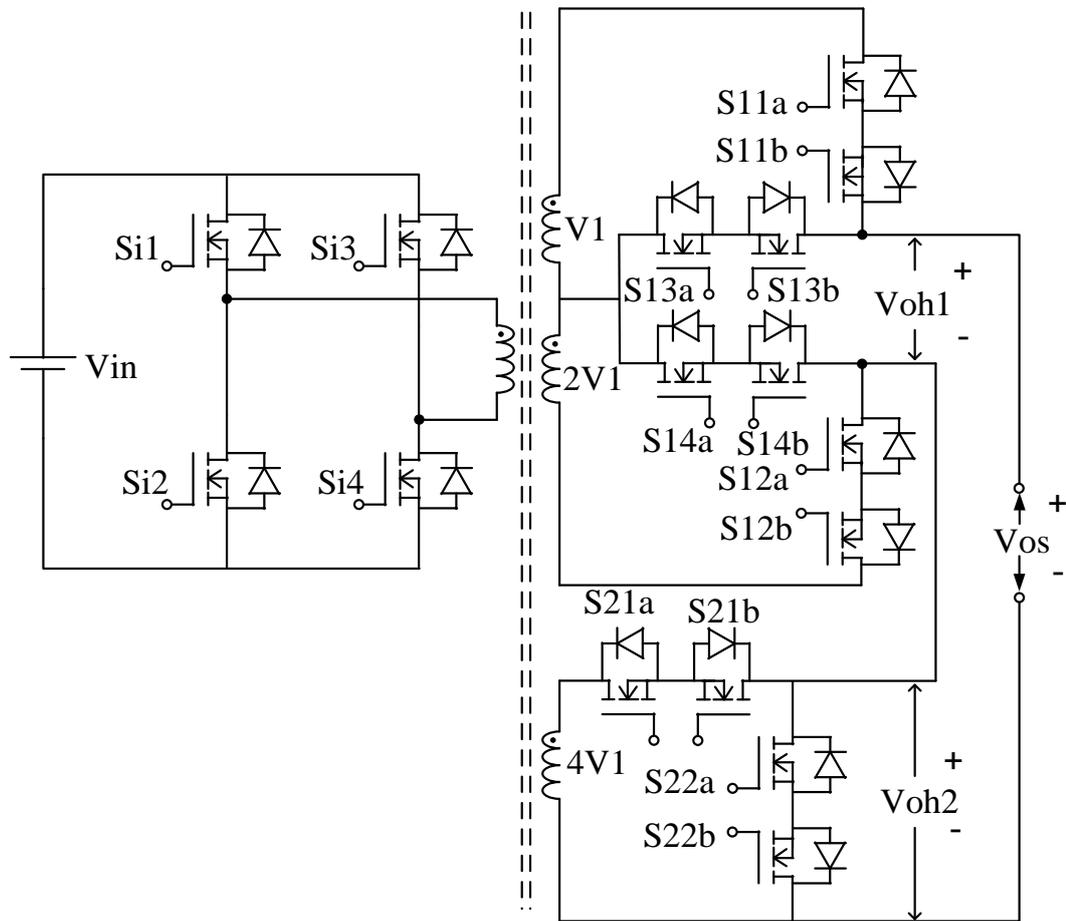
Fonte: Próprio autor (2021).

fonte CC, reduzindo assim o elevado custo encontrado na aplicação de várias fontes CC em inversores em cascata, eliminando a necessidade de um conversor CC-CC elevador de alto ganho, além de não necessitar fazer uso de capacitores eletrolíticos nas células 2L + L. A configuração empregada para as chaves bidirecionais, utiliza dois mosfets de canal n em anti-série (source comum), o arranjo é responsável por garantir o caminho da corrente  $I_{os}$ , de acordo com a lógica de chaveamento e ainda proporcionar menores perdas quando comparado com interruptores IGBT em baixas tensões.

### 3.2.1 Funcionamento da topologia de inversor híbrido proposto

De acordo com Mesquita (2016), o acionamento independente da chave bidirecional,  $S_{xyz}$ , ( $S_{xya}$  ou  $S_{xyb}$ ) confere modularidade a topologia além de permitir a dupla condução dreno-source de  $S_{xya}$  e  $S_{xyb}$ , ao invés da condução de uma chave e um diodo de  $S_{xyz}$ , durante um estado de nível n. A condução de uma chave e um diodo, ambos de  $S_{xyz}$  para manter o

Figura 23 – Topologia do inversor proposto em sua configuração completa com 15 níveis na saída.



Fonte: Próprio autor (2021).

estado de nível  $n$  é evitada neste trabalho, por gerar maiores perdas do que a condução simultânea dos mosfets de  $S_{xyz}$ . Esta configuração de condução de uma chave e um diodo, é imposta apenas durante o intervalo de transição de nível o que reduz ao máximo o tempo de condução do diodo. Para um melhor entendimento, resalta-se que os termos:  $x$  equivale ao número de cada módulo em cascata;  $y$  é a posição da chave pertencente a cada módulo e  $z$  é o termo referente à descrição de um dos interruptores pertencente a chave bidirecional empregando dois mosfets anti-serie (a,b), como exemplo a chave bidirecional  $S_{11}$ , que é composta por  $S_{11a}$  e  $S_{11b}$ , em que o primeiro número 1 equivale ao número do módulo, o segundo número 1 corresponde a posição da chave no módulo 1 e a e b referem-se às chaves do par de mosfets, formando, dessa forma, a chave bidirecional.

A tensão de saída da célula H-bridge pode ser obtida com a comutação das chaves  $S_{i1}$  e  $S_{i3}$  e suas complementares,  $S_{i2}$  e  $S_{i4}$ , podendo ser analisada observando apenas as chaves superiores. No momento em que forem acionadas as chaves bidirecionais em cada braço em

formato de L os interruptores complementares devem estar imprescindivelmente bloqueados.

Segundo Mesquita (2016), o peso de uma fonte  $\xi_{x,j}$ , na posição  $j$ , é  $\xi_{x,j}=V_{s_{x,j}}/V_{s_{1,1}}$ , para uma dada célula  $x$ , e tem conexão com o peso da célula  $P_x$ , que é  $P_x=V_{s_x}/V_{s_{1,1}}$ , onde  $V_{s_x}$  é a tensão da célula  $x$ ,  $V_{s_x}=V_{s_{x,1}} + V_{s_{x,2}}$ . Pode-se obter diferentes níveis  $n$  na saída do conversor de acordo com o peso escolhido para a fonte (parâmetro  $\xi_{x,j}$ ). O peso da célula  $x$  é dado pela tensão do barramento da célula sobre a tensão da primeira fonte tensão secundária, portanto  $V_{s_x}/V_{s_{1,1}}$ . A associação em cascata das células permite diferentes combinações de  $\xi_{x,j}$ , resultando em mais níveis igualmente espaçados na tensão de saída com o mesmo número de componentes. Isso pode ser obtido por uma relação específica entre os distintos pesos das células  $P_x$ , normalizados em função de  $V_{s_{1,1}}$ ,  $P_{nor(x)}$ , e relacionados por um fator multiplicativo.

Os secundários apresentam pesos 1, 2 e 4, a célula de baixo processa a maior quantidade de potência, pois tem a maior tensão aplicada, além disso a carga é composta por um resistor e um indutor que funciona como filtro.

A tensão de saída do conversor,  $V_{os}$  é a combinação das tensões sobre os enrolamentos secundários das células  $2L + L$  conforme a lógica de chaveamento adotada.

Foram utilizados vários medidores de tensão e corrente para monitoramento dos níveis de tensão e corrente, a fim de se concluir que estavam em uma faixa de valores permitidos dentro do requerido e se não havia curto-circuito em alguma parte do inversor ou sobressinais, por exemplo.

### ***3.2.2 Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 15 níveis na saída***

Agora serão vistos os resultados decorrentes das medições feitas dos primário e secundário do transformador do inversor e os estados fixos e em transição das chaves bidirecionais, em tabelas, para a operação com 15 níveis.

A Tabela 1 apresenta os estados fixos (dois mosfets de canal  $n$  em anti-série) e os estados aplicados durante o intervalo de transição de nível (com uma chave e um diodo) para os interruptores bidirecionais. Ressalta-se que as chaves estão ligadas com nível lógico igual a 1 e desacionadas quando nível lógico for 0. A Tabela mostra o comportamento das chaves em 1/4 de ciclo da frequência fundamental em 60 Hz, com o cuidado para não ser posto um estado adjacente imediatamente ao outro, criando um caminho para o fluxo da corrente  $I_{os}$ , evitando dessa forma danos às chaves por sobretensões causadas pelo  $L \frac{di}{dt}$ .

Tabela 1 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 15 níveis.

Níveis	Níveis fixos e em transição para saída com 15 níveis											
	S13a	S13b	S11a	S11b	S12a	S12b	S14a	S14b	S21a	S21b	S22a	S22b
0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0 transição	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1 transição	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
2	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
2 transição	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
3	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
3 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
4	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
4 transição	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
5	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
5 transição	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1
6	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
6 transição	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
7	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
7 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1

Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 24 mostra os níveis sintetizados da tensão  $V_{os}$  com 15 níveis e os estados para esta configuração. Nesta Figura não se encontram os estados de transição de nível, mas são apresentados todos os estados das chaves de ambos os semicilos, positivo e negativo.

A Figura 25 mostra a tensão na ponte completa localizada no primário e como de esperado temos uma onda quadrada como resultado. A análise feita em Mesquita (2016), pode ser aplicada para expressar a tensão no enrolamento primário da topologia proposta.  $V_{Pri}$  mostrada em função de chaveamento fica:  $V_{Pri}=V_{in}(Si1-Si3)$ .

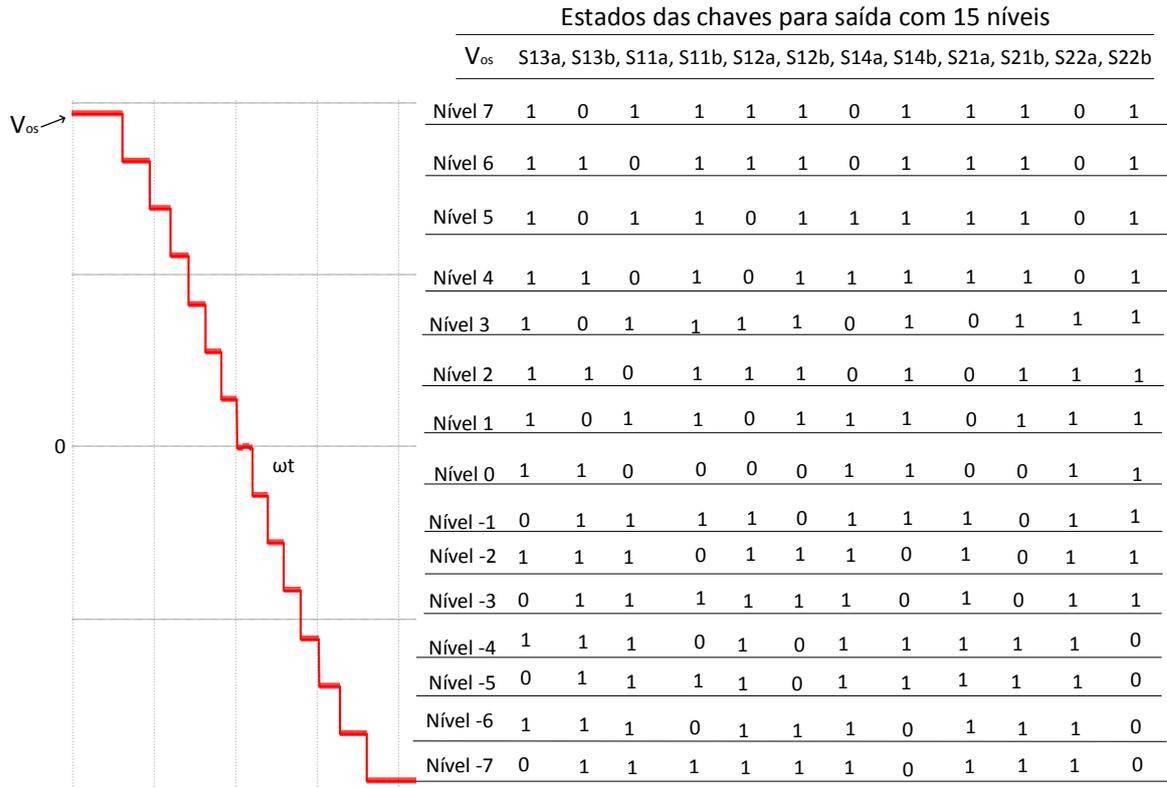
Segundo Mesquita (2016), essa tensão apresenta-se nos enrolamentos secundários  $N_{S_{x,j}}$ , com tensão  $V_{S_{x,j}}=N_{S_{x,j}}/N_{Pri} \cdot [V_{in}(Si1-Si3)]$ . A conexão entre o fluxo magnético  $\phi$  (mostrado por Maxwell) com a forma de onda da tensão do enrolamento,  $V_{Pri}$  é demonstrada nas equações 3.1 e 3.2.

$$V_{Pri}(t) = N_{Pri} \frac{d\phi}{dt} \cdot 10^{-8} (V) \begin{cases} V_{Primax} = N_{Pri} \cdot \frac{\phi_{max}}{(1/4)T_{tr}} \cdot 10^{-8} (V) & se \frac{T_{pz}}{2} \leq t \leq \frac{T_{tr}-T_{pz}}{2} \\ V_{Primin} = -N_{tr} \cdot \frac{\phi_{max}}{(1/4)T_{tr}} \cdot 10^{-8} (V) & se \frac{T_{tr}+T_{pz}}{2} \leq t \leq \frac{2T_{tr}-T_{pz}}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$V_{Primrms} = \sqrt{\int_{\frac{T_{pz}}{2}}^{\frac{T_{tr}-T_{pz}}{2}} V_{Primax}^2 dt + \int_{\frac{T_{tr}+T_{pz}}{2}}^{\frac{2T_{tr}-T_{pz}}{2}} (-V_{Primax})^2 dt} \quad (3.2)$$

$$V_{Primrms} = V_{Primax} \sqrt{1 - \frac{2T_{pz}}{T_{tr}}} = N_{Pri} \frac{\phi_{max}}{1/4T_{tr}} \sqrt{1 - \frac{2T_{pz}}{T_{tr}}} \cdot 10^{-8}$$

Figura 24 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 15 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

$$V_{Prims} = 4N_{Pri} \cdot f_{tr} \cdot B_{max} \cdot A_{ef} \cdot \sqrt{1 - \frac{2T p_z}{T_{tr}}} \cdot 10^{-8}$$

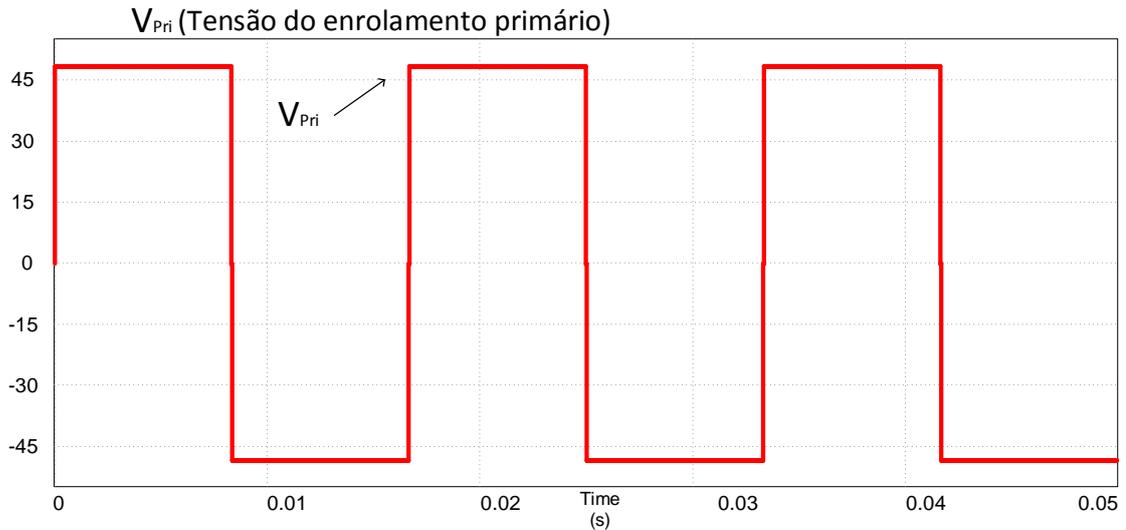
Isolando o termo  $N_{Pri}$  da equação 3.2 temos o número de espiras do enrolamento primário mostrado em 3.3. Considerando  $A_{ef}$  a área efetiva do núcleo em  $cm^2$  e transformando  $B_{max}$  de Gauss para Tesla obtemos:

$$N_{Pri} = \frac{V_{Prims} \cdot 10^4}{4 \cdot f_{tr} \cdot B_{max} \cdot A_{ef} \cdot \sqrt{1 - \frac{2T_C}{T_{tr}}} \cdot 10^{-8}} \quad (3.3)$$

Na Figura 26 pode-se visualizar a corrente que flui pelo primário  $I_{Pri}$ . Como de esperado temos uma corrente alternada, pois já está sendo medida após a inversão.

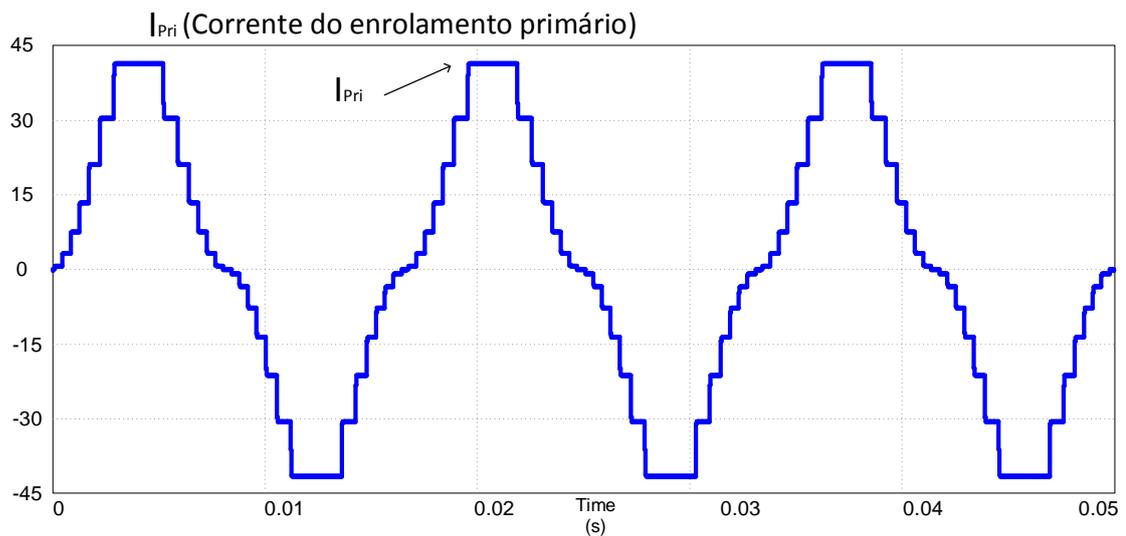
A corrente de entrada  $I_{in}$  (corrente do barramento CC), mostrada na Figura 27 é a corrente do enrolamento primário  $I_{pri}$  refletida para o semiciclo positivo, expressa pela função de chaveamento  $I_{in}(t) = (Si1 - Si3) \cdot I_{Pri}(t)$ .

Figura 25 – Tensão no enrolamento primário do transformador.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 26 – Corrente primária  $I_{Pri}$ .



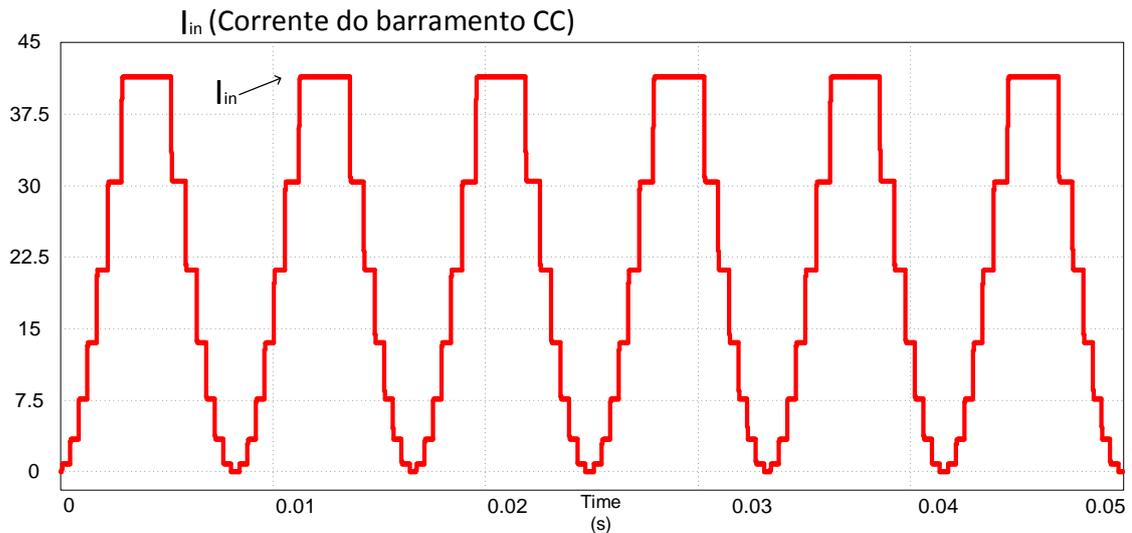
Fonte: Próprio autor (2021).

O valor médio da corrente no barramento CC é dado por 3.4.

$$I_{inmed} = \frac{1}{T} \int_0^{\pi} i_p \cdot \text{sen}^2 \omega t \cdot d\omega t \quad (3.4)$$

$$I_{inmed} = \frac{i_p}{2}$$

A corrente eficaz na entrada  $I_{inef}$  é dada em termos da função  $\text{sen}^2(\omega t)$  com magnitude  $i_p = I_{os\text{pico}} \cdot \lambda$  onde  $\lambda$  é o ganho de tensão. A equação 3.5 mostra a forma de se encontrar a

Figura 27 – Corrente do barramento CC ( $I_{in}$ ).

Fonte: Próprio autor (2021).

corrente eficaz no barramento CC.

$$I_{inef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\pi} (i_p \cdot \text{sen}^2 \omega t)^2 \cdot d\omega t} \quad (3.5)$$

$$I_{inef} = \frac{i_p}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}$$

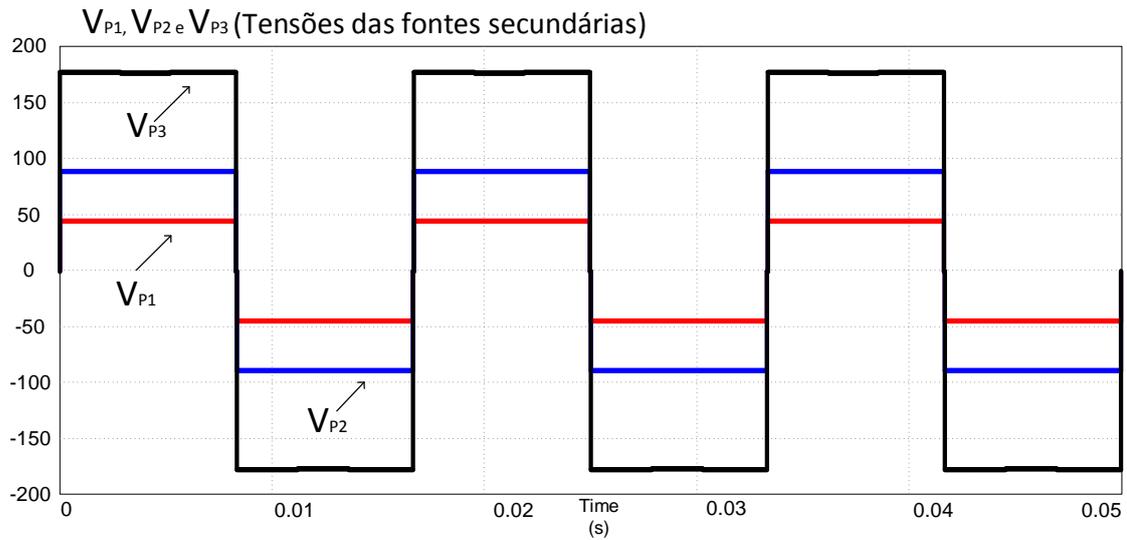
A Figura 28 mostra as tensões do secundário com pesos 1,2 e 4, a tensão  $V_{P1}$  com 44,5 V de pico, aproximadamente,  $V_{P2}$  com o dobro de  $V_{P1}$  e  $V_{P3}$  o quádruplo. A combinação dessas fontes garante a saída de tensão em 220 Vrms.

A tensão  $V_{oh1}$ , apresentada na Figura 29, é a união das células 1 e 2 (células superiores do conversor), estas fontes são as de menor potência e são responsáveis, inicialmente sozinhas pela formação dos três primeiros níveis da tensão de saída  $V_{os}$ , a sua forma de onda é composta por 7 níveis com a tensão eficaz de aproximadamente 96 V e a tensão de pico 133,4 V.

Agora pode-se observar na Figura 30 a tensão  $V_{oh2}$  da célula de maior potência, esta fonte é formada por 3 níveis e participa da formação dos níveis 4, 5, 6 e 7, respectivamente (no semiciclo negativo e no positivo, nesta ordem). Seu valor eficaz é próximo de 145,6 V e seu valor de pico é cerca de 177,83 V.

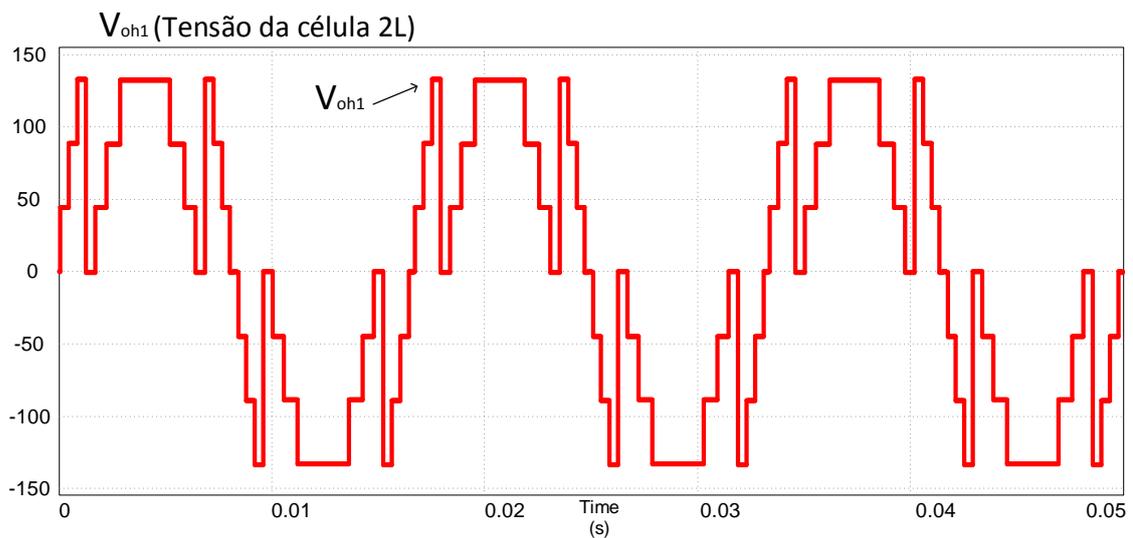
A tensão da saída do inversor,  $V_{os}$ , mostrada na Figura 31, como já mencionado está em um arranjo de 15 níveis. Seu valor eficaz está em torno de 220 V eficazes e 311 V de pico, sua taxa de distorção harmônica está no valor de aproximadamente 5,37% considerando todo espectro harmônico fornecido pelo software utilizado e 1,17% para 50 harmônicas.

Figura 28 – Tensões das fontes secundárias do inversor proposto.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 29 – Tensão da composição das células 1 e 2 apresentando 7 níveis.



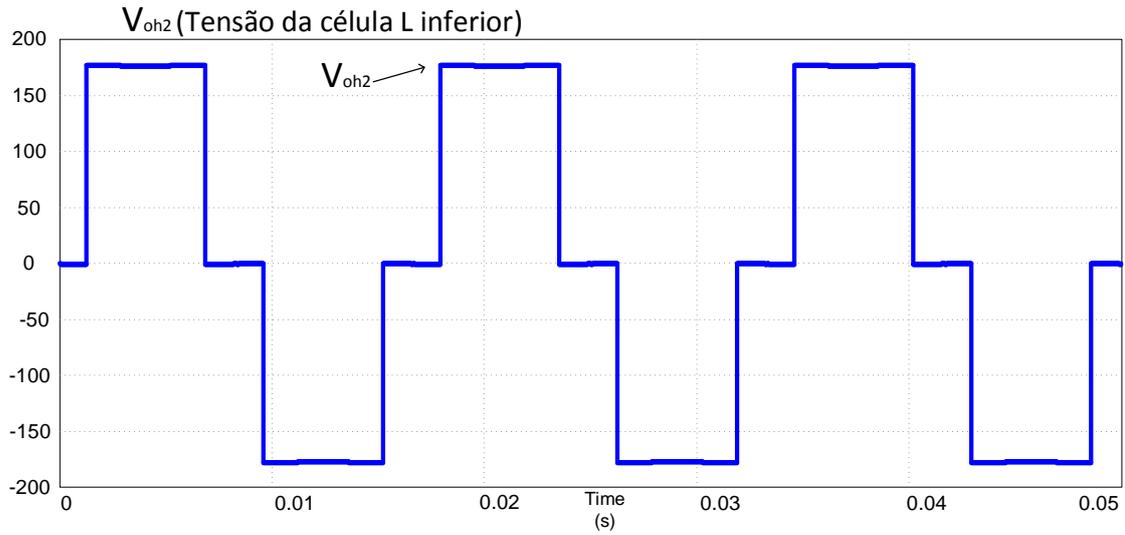
Fonte: Próprio autor (2021).

Na Figura 32 é mostrada a contribuição das saídas das células 2L e L na formação da tensão de saída do inversor com 15 níveis em  $V_{os}$ . Pode-se verificar que a célula de menor potência ( $V_{oh1}$ ), também chamada de 2L, opera em maior frequência e é composta por 7 níveis. Já a célula de maior potência trabalha em menor frequência gerando uma onda de 3 níveis ( $V_{oh2}$ ).

A tensão de saída  $V_{os}(\omega t)$  pode ser equacionada em termos da serie de Fourier dada por 3.6:

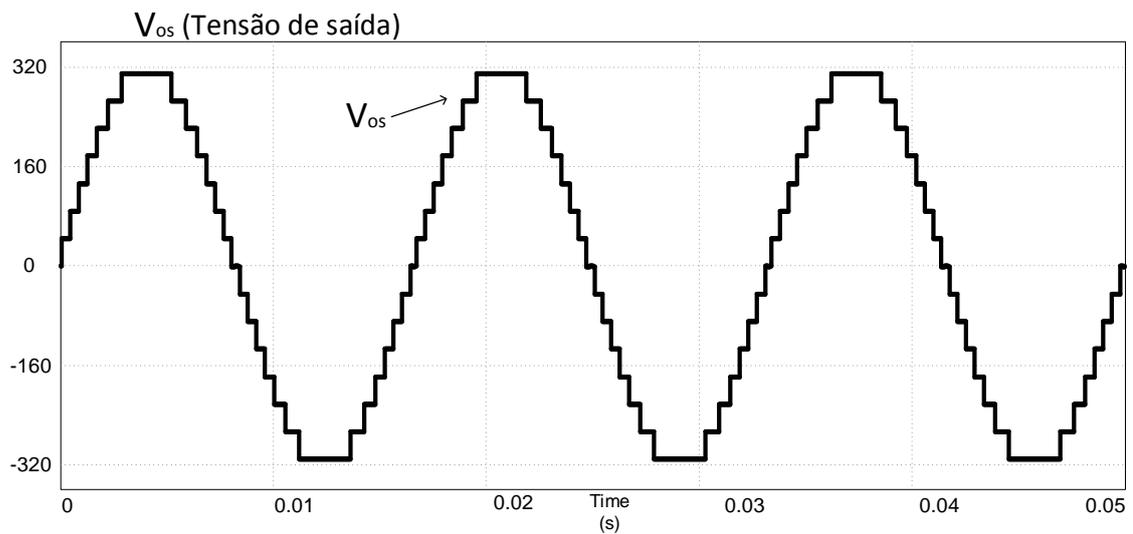
$$V_{os}(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3.6)$$

Figura 30 – Tensão da célula  $V_{oh2}$  contando com 3 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 31 – Tensão de saída  $V_{os}$ .



Fonte: Próprio autor (2021).

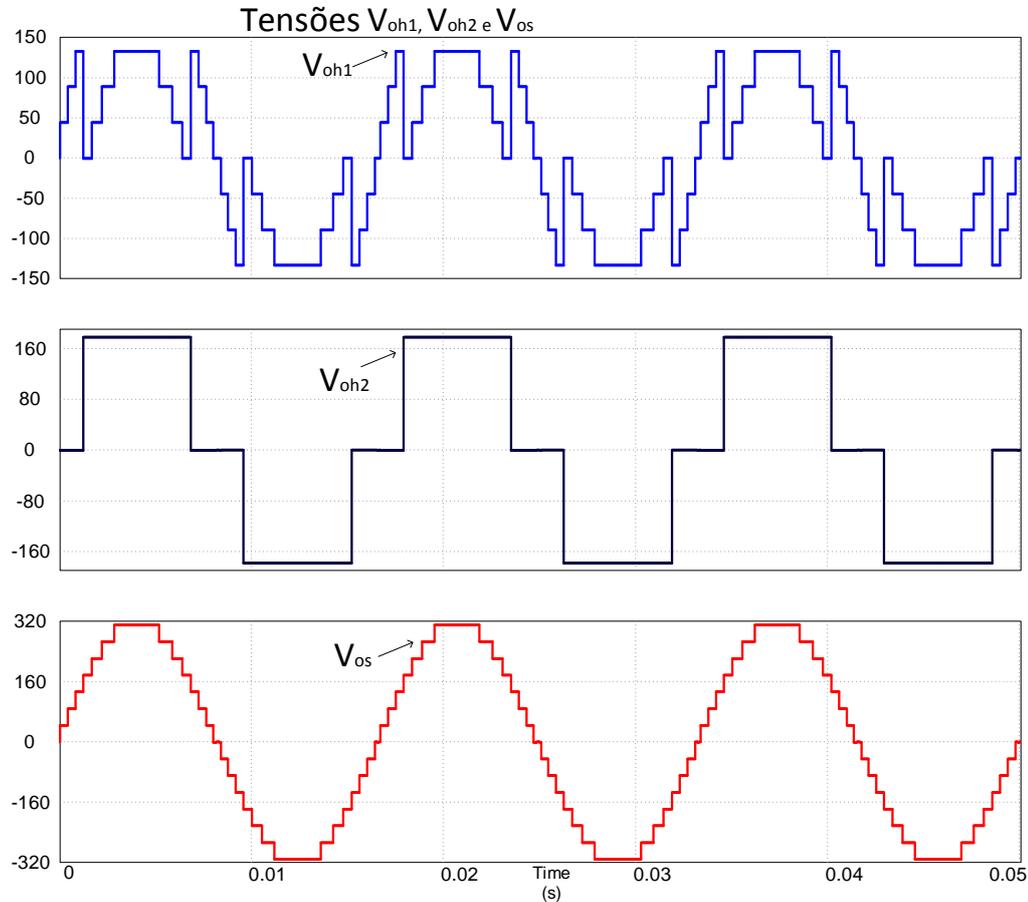
$$V_{os}(\omega t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [C_n e^{-jn\omega t}]$$

As expressões  $a_0$ ,  $a_n$ , e  $b_n$  são os coeficientes de Fourier e  $C_n$  sendo a amplitude da  $n^{th}$  harmônica mostrada na equação 3.7

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} V_{os}(\omega t) e^{-jn\omega t} d\omega t \quad (3.7)$$

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \left[ \sum_{i=1}^N \int_{-(\pi-\theta_i)}^{-\theta_i} -V_{cc} e^{-jn\omega t} d\omega + \int_{\theta_i}^{\pi-\theta_i} V_{cc} e^{-jn\omega t} d\omega \right]$$

Figura 32 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão  $V_{os}$  com 15 níveis, em que  $V_{oh1}$  e  $V_{oh2}$  são as tensões da junção das dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente .



Fonte: Próprio autor (2021).

$$C_n = \frac{V_{cc}}{2\pi} \sum_{i=1}^N j \left[ -(e^{jn\theta_i} + e^{-jn\theta_i}) + (e^{jn(\pi-\theta_i)} + e^{-jn(\pi-\theta_i)}) \right]$$

$$C_n = \frac{V_{cc}}{2\pi} \sum_{i=1}^N j [\cos(n(\pi - \theta_i)) - \cos(n\theta_i)]$$

Tendo em vista que a tensão  $V_{os}(\omega t)$  possui simetria central, a componente CC, que corresponde ao termo  $a_0$  e os harmônicos pares são iguais a zero.

Logo, a tensão de saída expressa na serie de Fourier é representada em 3.8:

$$V_{os}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V_{cc}}{n\pi} [\cos(n\theta_i) - \cos(n(\pi - \theta_i))] \text{sen}(n\omega t) \quad (3.8)$$

A tensão fundamental de saída,  $V_{osf}$  de um inversor trabalhando com N níveis em 1/4 de ciclo sendo aplicada a ele a modulação staircase vista em 3.9.

$$V_{osf} = \frac{4V_{cc}}{\pi} \sum_{i=1}^N \cos(\theta_i) \quad (3.9)$$

Já os enésimos harmônicos de tensão  $(2y - 1)^{th}$ , na saída do inversor são equacionados em 3.10.

$$V_{osh(2y-1)} = \frac{4V_{cc}}{(2y-1)\pi} \sum_{i=1}^N \cos((2y-1)\theta_i) \quad (3.10)$$

$paray = 2, 3, 4, \dots$

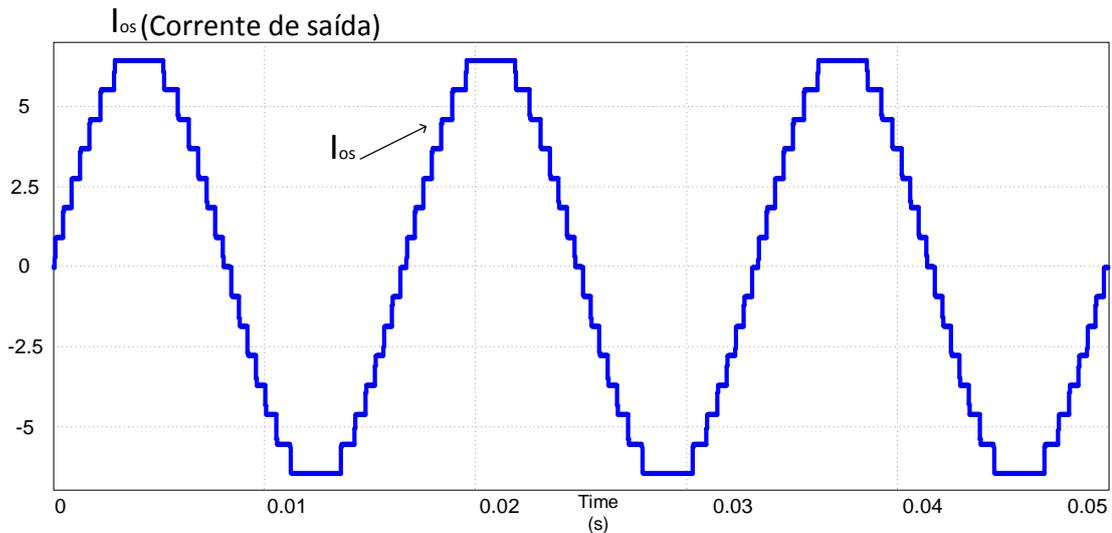
Para controlar o valor de pico da tensão de saída pode-se fazer uso do índice de modulação im. E considerando N a quantidade de degraus em 1/4 de ciclo tem-se 3.11.

$$im = \frac{V_{osf}\pi}{4V_{cc}N} \quad (3.11)$$

A DHT é utilizada com o intuito e analisar o aspecto de qualidade da forma de onda, e deve ser mantida em valores menores que 5%. Em 3.12 temos a equação para o cálculo da distorção harmônica total.

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{y=2}^{\infty} \left[ \frac{4V_{cc}}{(2y-1)\pi} \sum_{i=1}^N \cos(2n-1)\theta_i \right]^2}}{\frac{4V_{cc}}{\pi} \sum_{i=1}^N \cos(\theta_i)} \quad (3.12)$$

Na Figura 33 é mostrada a corrente da saída do inversor, pode-se notar uma forma de onda com aparência bastante senoidal, pois foi utilizado um filtro indutivo de 2 mH. O valor eficaz de  $I_{os}$  está próximo de 4,7 A e sua amplitude em 6,48 A. Devido aos 15 níveis na corrente e também ao filtro indutivo a taxa de distorção harmônica ficou dentro dos padrões exigidos em normas como IEEE 519, IEC 61000-2-2, EM 50160, Módulo 8 do PRODIST, como já citado neste trabalho e outras que regulam a distorção harmônica total de tensões e correntes. Seu percentual foi de 4,31% aproximadamente. Salienta-se que foi utilizado um indutor de 2 mH na simulação, mas com uma indutância de 0,6 mH a corrente já alcança os 5 % de DHT desejado.

Figura 33 – Corrente de saída  $I_{os}$ .

Fonte: Próprio autor (2021).

As Equações 3.13 e 3.14 mostram como calcular a indutância aproximada necessária para o conversor proposto funcionando desde 7 até 15 níveis. Em 3.13, 311 é a tensão de pico na saída,  $n_7$  é o termo para a saída com 7 níveis, 360 é a angulação em graus e  $r$  é um valor variável que se altera a medida que é o valor de frequência da saída muda. Por exemplo, para 60 Hz, frequência de saída adotada neste trabalho,  $r=1$ , para 50 Hz  $r=0,85$ , para 70 Hz  $r=1,15$ . Quando a frequência é diminuída em uma década o valor de  $r$  cai 0,15, pois o filtro de saída terá valor maior para frequências mais baixas e para o aumento da frequência de saída, a cada década  $r$  é incrementado em 0,15. A equação 3.14 mostra como calcular o filtro indutivo aproximado desde 9 até 15 níveis. Assim como na equação 3.13, 311 é a tensão de pico na saída, mas  $n_{9a15}$  é o termo para a saída de 9 a 15 níveis, 360 continua sendo a angulação em graus e  $m$  é a expressão variável que para 9 níveis com 60 Hz é  $m=8$ , para 50 Hz  $m=7$  e para 70 Hz  $m=10$ , ou seja, para uma década a menos, considerando como padrão 60 Hz, tem-se que  $m$  é diminuído em uma unidade e para uma década acima  $m$  é aumentado em duas unidades. Para a explicação dos demais níveis será relatada a aplicação de  $m$  para 60 Hz, mas se aplica para as demais frequências. Para 11 níveis  $m$  que era 8 com 9 níveis vai assumir o dobro deste valor, para 13 níveis  $m$  que com 11 níveis é igual 16 aumenta três vezes, logo  $m=48$  e para funcionamento com 15 níveis  $m=192$ , isto é,  $m$  é variado para 4 vezes seu valor em comparação com 13 níveis. Este processo pode ser aplicado para 50 e 70 Hz, assim como para frequências maiores, mas, como exemplo, na indústria geralmente só se aplicam frequências variando até uma década acima,

foram explicadas as equações somente nessa faixa de frequência.

$$L_{60(7n)} = \frac{311 \cdot n_7}{360 \cdot r} \quad (3.13)$$

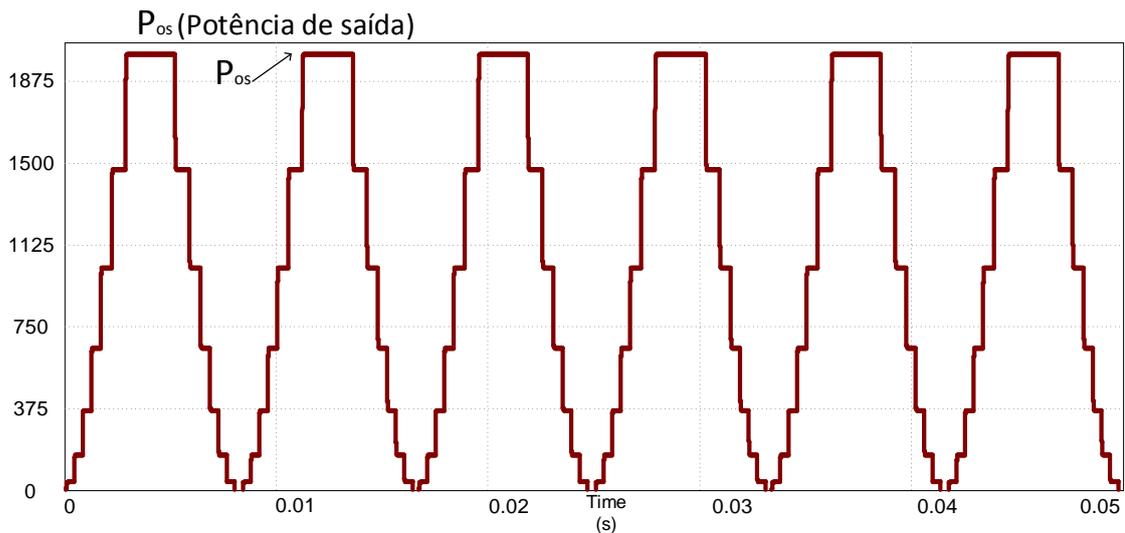
$$L_{60(9a15n)} = \frac{311 \cdot n_{9a15}}{360 \cdot m} \quad (3.14)$$

Os 15 níveis na tensão de saída proporcionaram que o inversor necessite apenas de um filtro indutivo de valor bem pequeno, a si mulação foi feita com 2 mH, mas necessitando de apenas 0,6 mH para que a corrente ficasse dentro dos padrões exigidos em norma, isto é uma vantagem a ser observada.

A potência ativa de saída  $P_{os}$ , vista na Figura 34, pode ser caculada através da equação 3.15. Os termos  $V_{oshxn(rmsf)}$  e  $I_{oshxn(rmsf)}$  são os valores eficazes da componente fundamental da tensão e da corrente de saída que se espera obter das células 2L e L (célula xn), nesta mesma ordem, e  $\psi$  é o ângulo do fator de deslocamento.

$$P_{os} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{os}(t) i_{os}(t) dt = \sum_{xn} V_{oshxn(rmsf)} \cdot I_{oshxn(rmsf)} \cdot \cos \psi \quad (3.15)$$

Figura 34 – Potência de saída  $P_{os}$ .



Fonte: Próprio autor (2021).

Como vemos na Tabela 2 a potência de saída  $P_{os}$  é um somatório das potencias processadas nas células 2L (com duas fontes de pesos 1 e 2 respectivamente) e L (com uma fonte de peso 4).

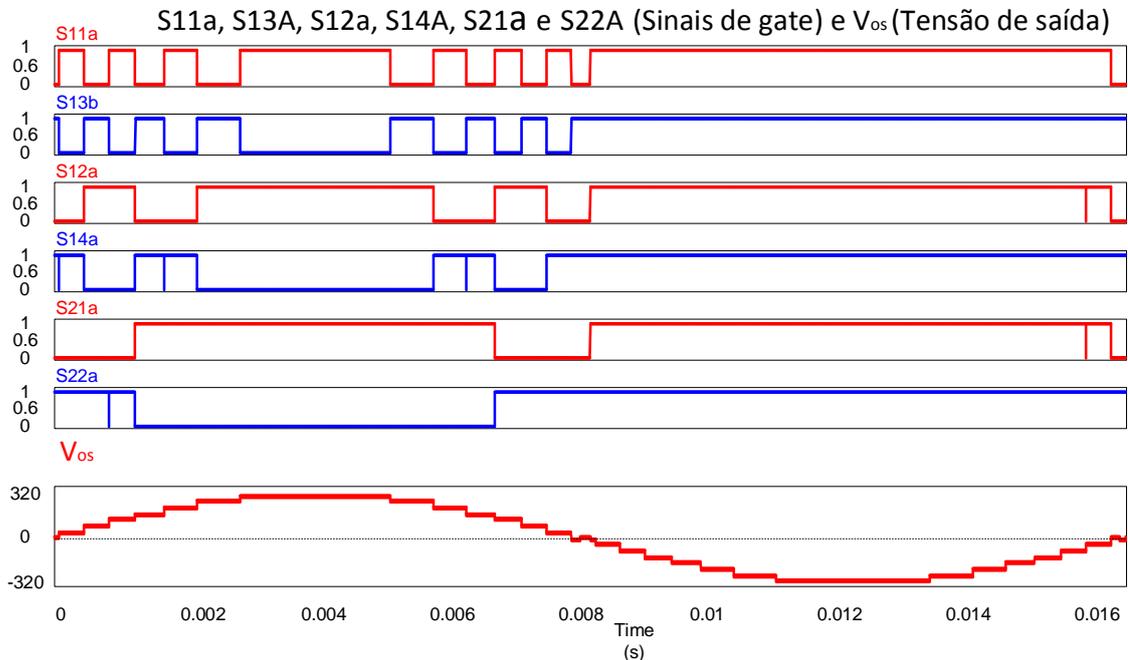
Tabela 2 – Contribuição de cada célula em relação a potência  $P_{os}$  e seu somatório para a saída total.

Potência processada pelo inversor		
Módulos	Percentual de processamento de potência	Saída do inversor composição (2L + L)
Célula 2L	Aproximadamente 40 %	100 % da potência processada
Célula L	Aproximadamente 60%	

Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 35 mostra pulsos necessários ao acionamento do inversor multinível, as chaves S11a a S14b são das células superiores em formato de L, também mencionada no trabalho como célula (2L) e as chaves S21a a S22b são da célula inferior (L). As chaves são acionadas e desligadas com arranjo de estados para se obter 15 níveis na tensão de saída. Os tempos de transição de níveis foram implementados com  $T_n=2\mu s$ . Nota-se que não são mostradas todas as chaves, os interruptores eletrônicos que compõem a Figura são somente, os complementares S11a e S13b, S12a e S14b e S21a e S22b, estes não podem estar acionados juntos, em cada braço, no semiciclo positivo, já para o semiciclo negativo as outras chaves do par de mosfets que não podem estar em nível alto conjuntamente, por exemplo S11b e S13a.

Figura 35 – Sinais de gate e tensão de saída  $V_{os}$  para 15 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

A equação 3.16 mostra a relação entre a frequência de operação do transformador, 60 Hz, com frequência de operação de cada chave de S11 a S22 para a estrutura trabalhando

com 15 níveis. Tem-se que  $X_t$  é o número total de células, que neste caso está considerando-se duas,  $2L$  e  $L$ ,  $f_1$  é a frequência de operação do transformador, que coincide com a fundamental da rede elétrica, no entanto, o inversor está funcionando em malha aberta e não conectado à rede de energia elétrica.

$$F_{(S11)} = (2^{(X_t-1)} + 6) \cdot f_1 \quad (3.16)$$

$$F_{(S12)} = (2^{(X_t-1)} + 2) \cdot f_1$$

$$F_{(S13)} = (2^{(X_t-1)} + 5) \cdot f_1$$

$$F_{(S14)} = (2^{(X_t-1)} + 1) \cdot f_1$$

$$F_{(S21)} = (2^{(X_t-1)}) \cdot f_1$$

$$F_{(S22)} = f_1$$

A Figura 36 mostra as tensões que as chaves das células do conversor estão submetidas. As chaves S11a, S11b e suas complementares S13a e S13b estão sujeitas a tensão de pico de aproximadamente 44,5 V, as chaves S12a, S12b e suas complementares S14a e S14b estão sujeitas a aproximadamente 89 V de pico e as chaves S21a, S21b e suas complementares S22a e S22b estão sujeitas a aproximadamente 178 V de pico.

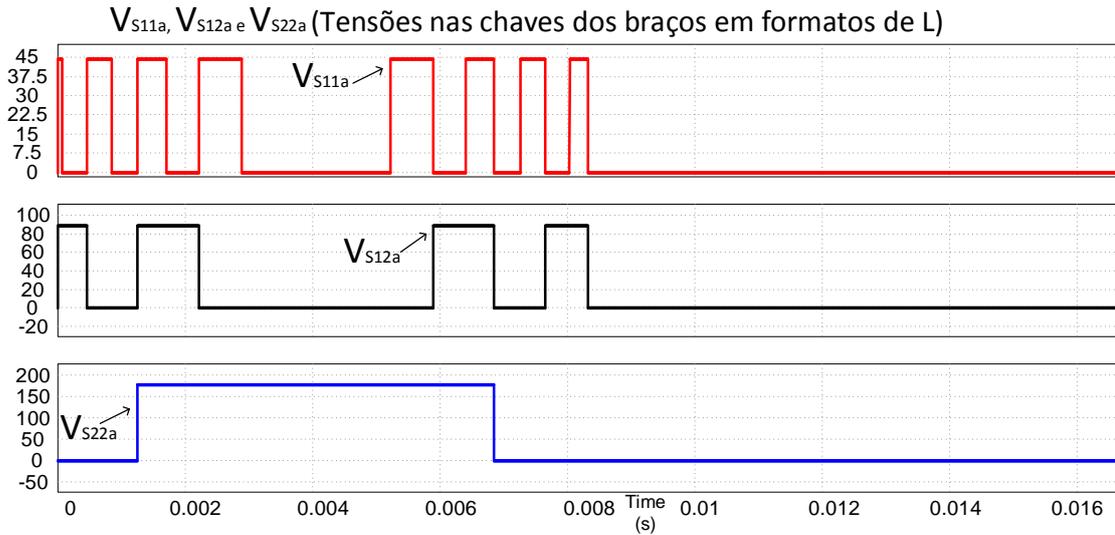
A equação 3.17 apresenta a associação da tensão do enrolamento primário com as tensões das bobinas das células secundárias. Em que  $\partial_{1(15)}$ ,  $\partial_{2(15)}$  e  $\partial_{3(15)}$  correspondem às relações de transformação de  $V_{P1(15)}$ ,  $V_{P2(15)}$  e  $V_{P3(15)}$ , respectivamente, em conexão com a tensão  $V_{Pri(15)}$ . Sendo  $\partial_{1(15)}=1,091$ ,  $\partial_{2(15)}=0,5454$  e  $\partial_{3(15)}=0,2727$ .

$$V_{Pri(15)} \cdot \partial_{1(15)} = V_{P1(15)} \quad (3.17)$$

$$V_{Pri(15)} \cdot \partial_{2(15)} = V_{P2(15)}$$

$$V_{Pri(15)} \cdot \partial_{3(15)} = V_{P3(15)}$$

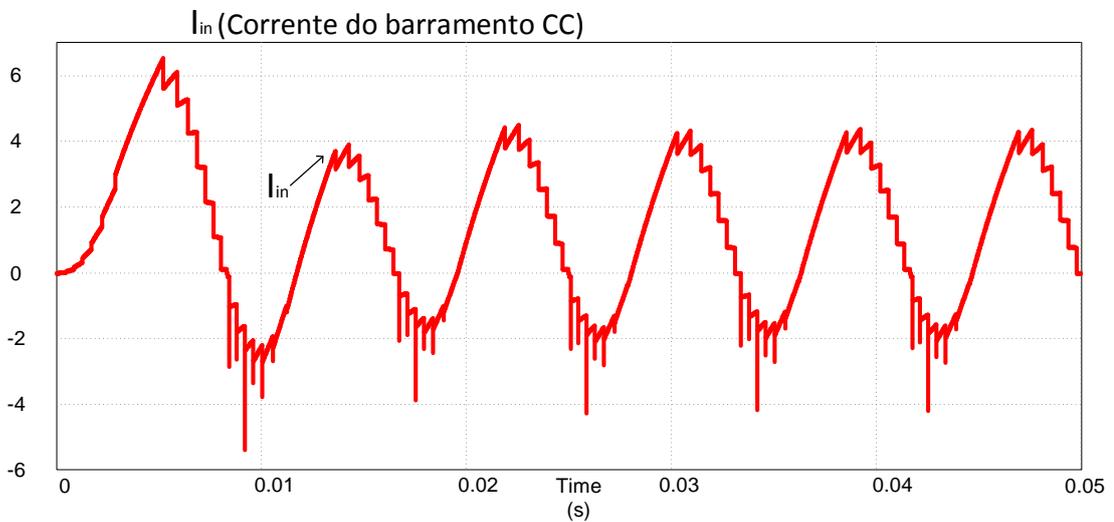
Figura 36 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a.



Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 37 mostra a corrente do barramento CC para uma carga indutiva com 300 mH e 48  $\Omega$ . Na figura pode-se ver claramente o retorno de energia, confirmando, assim, que o inversor é bidirecional em corrente.

Figura 37 – Corrente do barramento CC ( $I_{in}$ ) para 300 mH.



Fonte: Próprio autor (2021).

### 3.3 Topologia proposta operando com 7 níveis na saída

A topologia proposta mostrada na Figura 22 pode ser utilizada operando de 7 até 15 níveis na tensão de saída, isto pode ser obtido de acordo com o peso das bobinas secundárias, 3 por vez, com um transformador de múltiplos secundários podendo-se conseguir diferentes

combinações de tensões e através do arranjo de estados, ou seja com a alteração de chaveamento do conversor.

### 3.3.1 Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 7 níveis na saída

O inversor funcionando com 7 níveis na saída trabalha como um inversor simétrico, ou seja, suas fontes têm valores iguais e com peso 1.

A Tabela 3 mostra os estados fixos e em transição para o funcionamento do inversor com 7 níveis na tensão de saída.

Tabela 3 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 7 níveis na tensão de saída.

Níveis	Níveis fixos e em transição para saída com 7 níveis											
	S13a	S13b	S11a	S11b	S12a	S12b	S14a	S14b	S21a	S21b	S22a	S22b
0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0 transição	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1 transição	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
2	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
2 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
3	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
3 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1

Fonte: Próprio autor (2021).

Percebe-se que as chaves estão alternando de ligadas para desligadas e vice-versa em uma frequência bem baixa, isto é, apresentam mais perdas por condução do que por chaveamento.

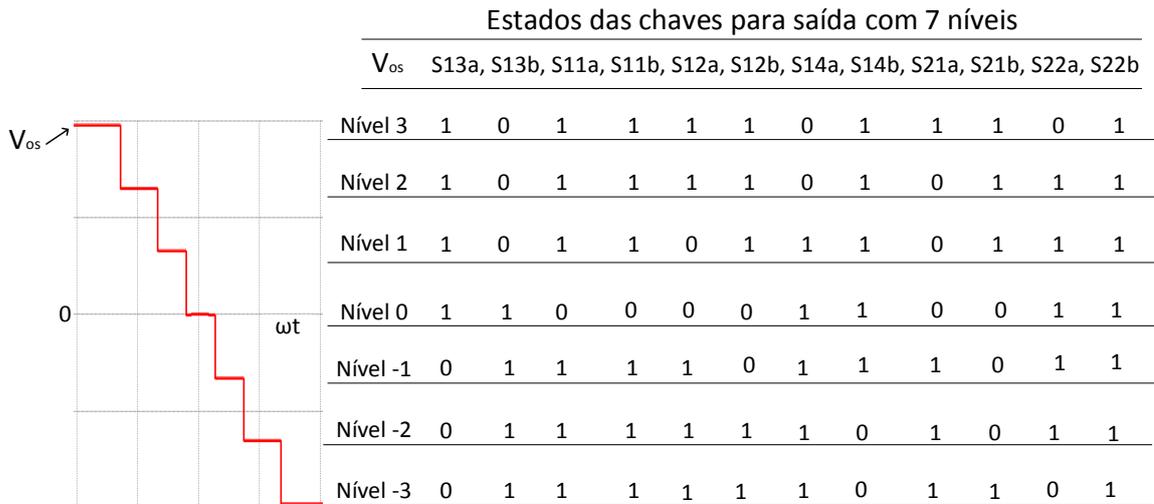
A Figura 38 mostra os níveis sintetizados da tensão  $V_{os}$  com 7 níveis e os estados para esta configuração. Nesta Figura não se encontram os estados de transição de nível, mas são apresentados todos os estados das chaves de ambos os semicilos, positivo e negativo.

A Figura 39 apresenta as tensões das células 2L em vermelho e L em azul.

No conversor operando com 15 níveis tínhamos que a célula L era a que estava recebendo a maior tensão, pois tinha peso 4, enquanto as células superiores ( $L + L = 2L$ ), tinham pesos 1 e 2, nesta ordem. Agora com bobinas de mesma tensão temos a célula L com metade da tensão de 2L, obviamente porque as fontes são de mesmo valor. A tensão de pico aplicada em cada braço em formato de L é aproximadamente 103,7 V de pico.

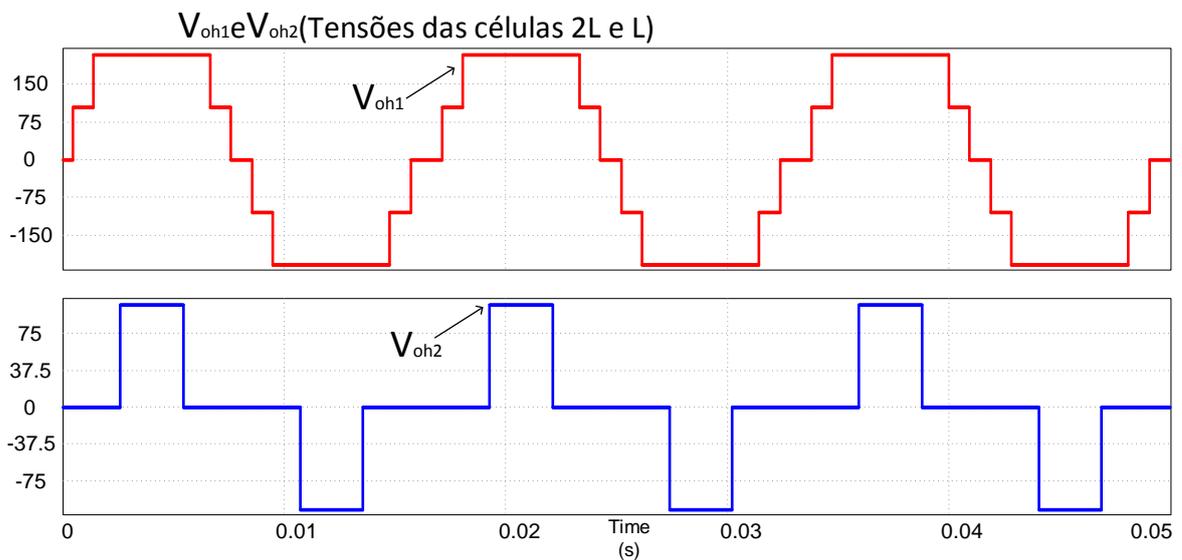
A Figura 40 traz a tensão de saída do conversor em funcionamento com fontes simétricas. Com os 7 níveis a forma de onda apresentou uma taxa de distorção harmônica de 14,55%, bem maior comparada com a DHT de  $V_{os}$  com 15 níveis considerando todo espectro

Figura 38 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 7 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 39 – Tensões das células  $V_{oh1}$  (2L) e  $V_{oh2}$  (L).



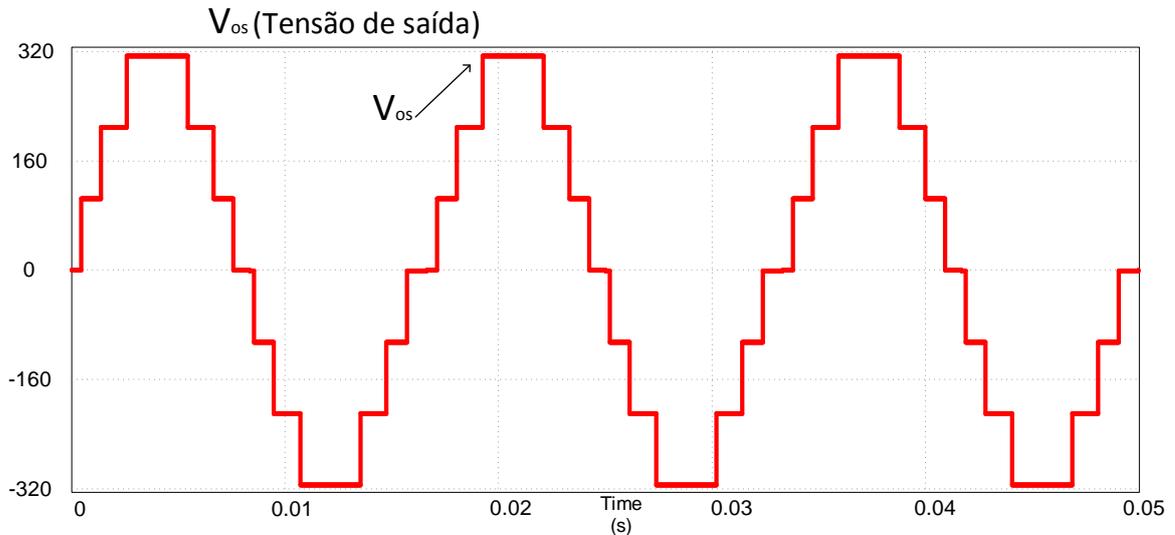
Fonte: Próprio autor (2021).

harmônico que o software usado nas simulações proporciona e 4,5% para 50 harmônicas.

Na Figura 41 é mostrada a contribuição das saídas das células 2L e L na formação da tensão de saída do inversor com 15 níveis em  $V_{os}$ . Pode-se verificar que a célula ( $V_{oh1}$ ), também chamada de 2L, opera em maior frequência e é composta por 5 níveis. Já a célula L trabalha em menor frequência gerando uma onda de 3 níveis ( $V_{oh2}$ ).

A Figura 42 mostra a corrente de saída  $I_{os}$  com 7 níveis. A carga utilizada na simulação para esta configuração foi resistiva a fim de ver a DHT da corrente sem filtro indutivo, a DHT da corrente foi logicamente a mesma da tensão com 14,55%. Para a corrente se manter com DHT= 5% necessita-se de uma indutância por volta de 65 mH.

Figura 40 – Tensão de saída  $V_{os}$  para 7 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 43 mostra pulsos gerados para o acionamento do inversor multinível com 7 níveis, como já mencionado neste arranjo as chaves permutam em baixa frequência e apresentam mais perdas em condução do que por chaveamento no caso de operação real das chaves.

A equação 3.18 mostra a relação entre a frequência de operação do transformador, 60 Hz, com frequência de operação de cada chave de S11 a S22 para a estrutura trabalhando com 7 níveis. Tem-se que  $X_t$  é o número total de células, que neste caso está considerando-se duas, 2L e L e  $f_1$  é a frequência de operação do transformador, que coincide com a fundamental da rede elétrica.

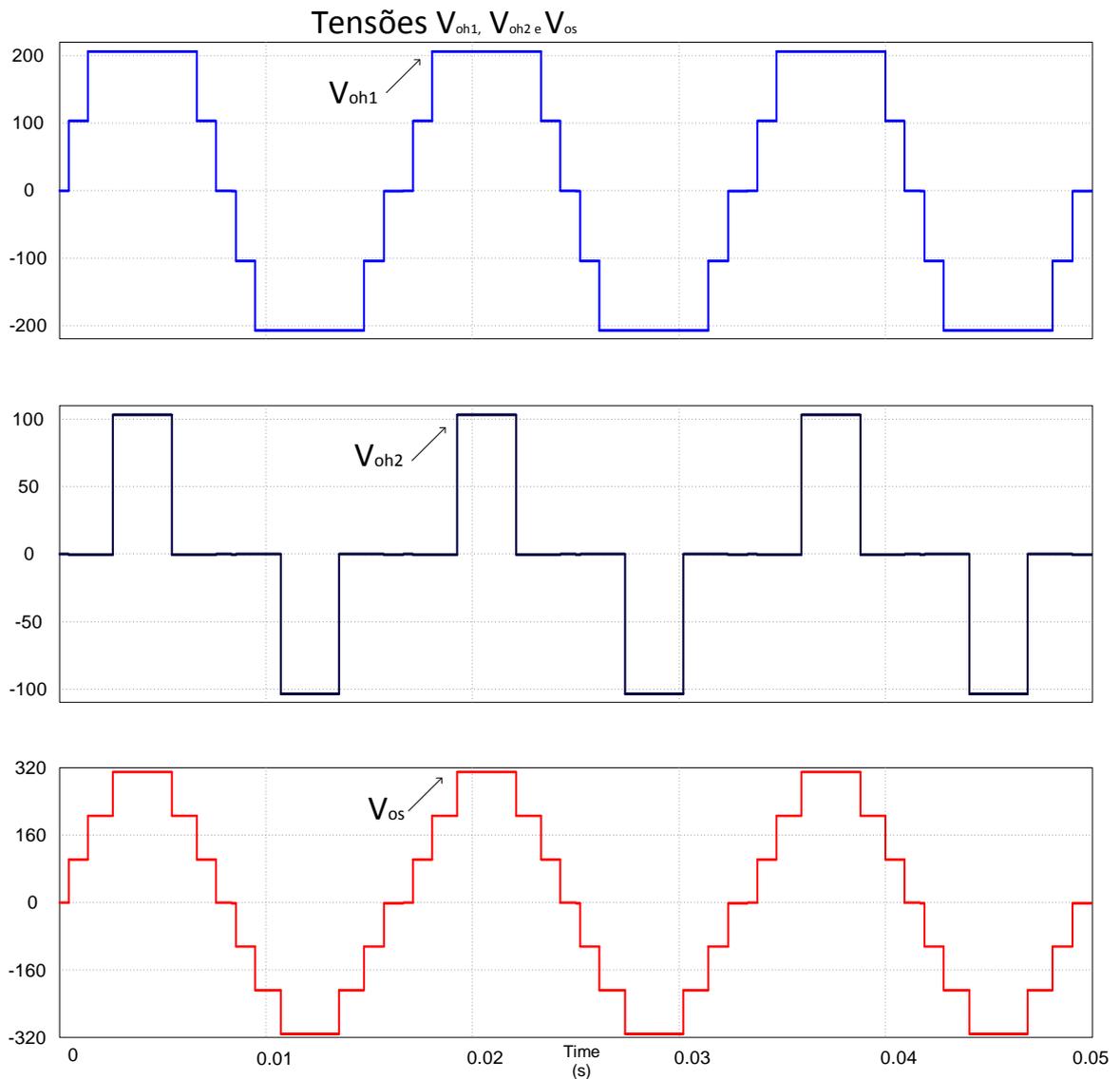
$$F_{(S11,S12,S21)} = (2^{X_t-1}) \cdot f_1 \quad (3.18)$$

$$F_{(S13,S14,S22)} = f_1$$

A Figura 44 mostra as tensões que as chaves das células do conversor estão submetidas para o caso com 7 níveis. As chaves S11a a S22b estão sujeitas a aproximadamente 103,7 V de pico. Todas as chaves estão suportando a mesma tensão pois as fontes têm pesos iguais a 1 como já visto.

A equação 3.19 apresenta a associação da tensão do enrolamento primário com as tensões das bobinas das células secundárias. Em que  $\partial_{1(7)} = \partial_{2(7)} = \partial_{3(7)}$  e correspondem às

Figura 41 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão  $V_{os}$  com 7 níveis, em que  $V_{oh1}$  e  $V_{oh2}$  são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente.

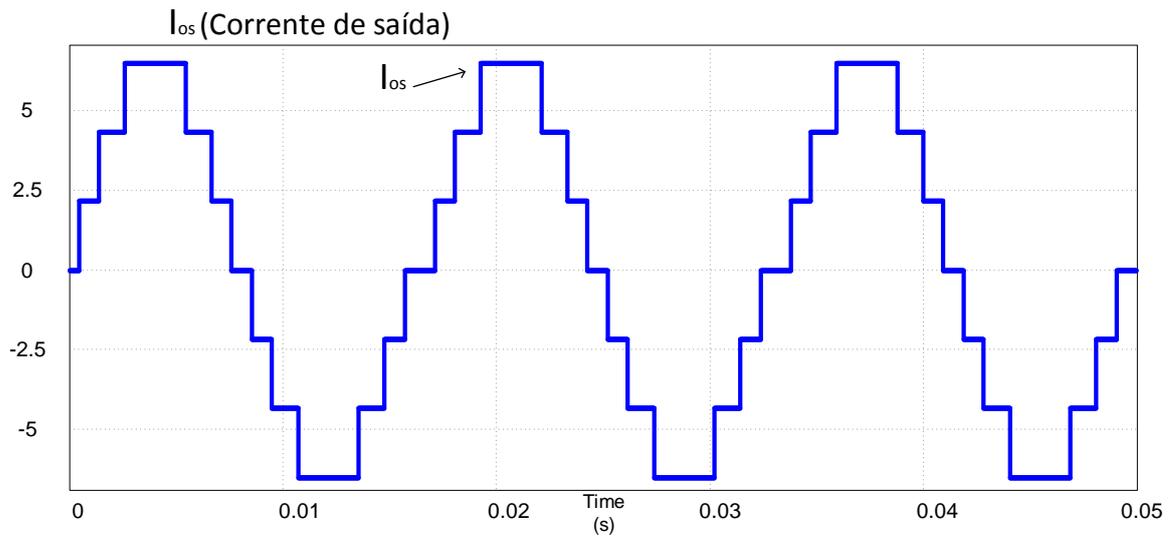


Fonte: Próprio autor (2021).

relações de transformação de  $V_{P1(7)}$ ,  $V_{P2(7)}$  e  $V_{P3(7)}$ , respectivamente, em conexão com a tensão  $V_{Pri(7)}$ . Sendo  $\partial_{1(7)}=0,5454$ .

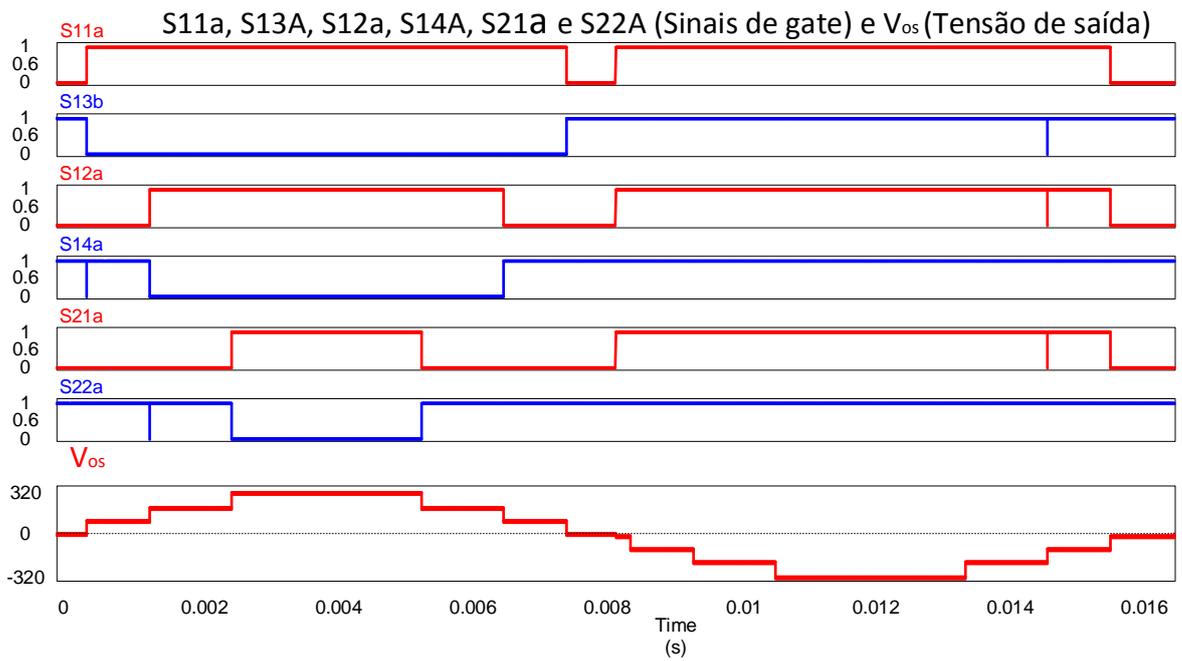
$$V_{Pri(7)} \cdot \partial_{1(7)} = V_{P1(7)} = V_{P2(7)} = V_{P3(7)} \quad (3.19)$$

Figura 42 – Corrente de saída  $I_{os}$  para 7 níveis.



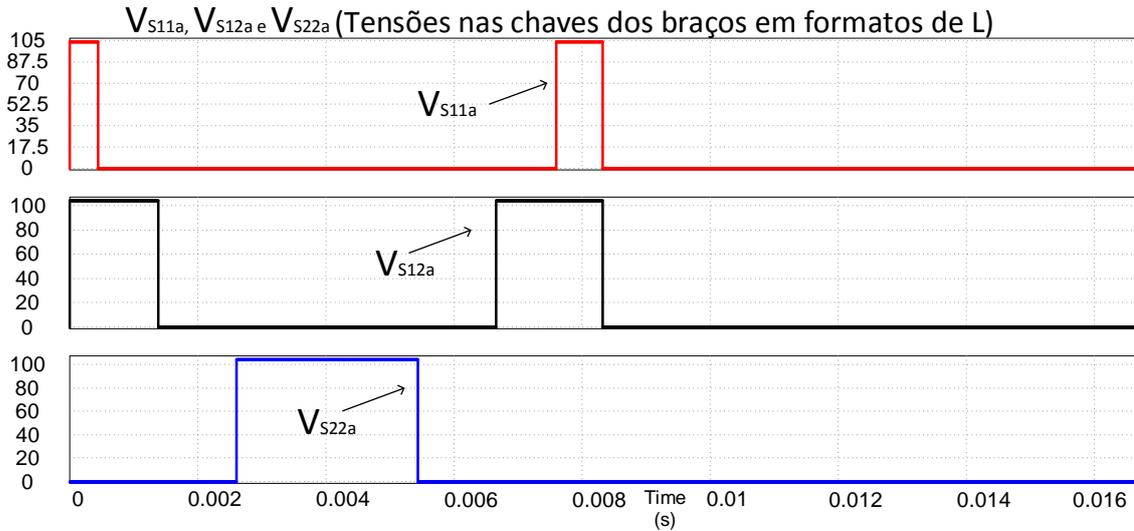
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 43 – Sinais de gate e tensão de saída  $V_{os}$  para 7 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 44 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 7 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

### 3.4 Topologia proposta operando com 9 níveis na saída

#### 3.4.1 Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 9 níveis na saída

O inversor funcionando com 9 níveis na saída trabalha com fontes superiores de peso 1 e fonte inferior de peso 2.

A Tabela 4 mostra os estados de chaveamento para o conversor em configuração de 9 níveis na saída. Nesta combinação de estados a corrente faz um caminho diferente na formação dos níveis em comparação por exemplo com a forma de onda contendo 7 níveis, enquanto que para esta o nível 2 é feito utilizando as células superiores e o nível 3 todas as células, para 9 degraus na tensão temos a circulação da corrente para formar o nível 2 pela célula inferior e o nível 3 feito pela união das células L do meio e inferior.

A Figura 45 mostra os níveis sintetizados da tensão  $V_{os}$  com 9 níveis e os estados para esta configuração. Nesta Figura não se encontram os estados de transição de nível, mas são apresentados todos os estados das chaves de ambos os semicilos, positivo e negativo.

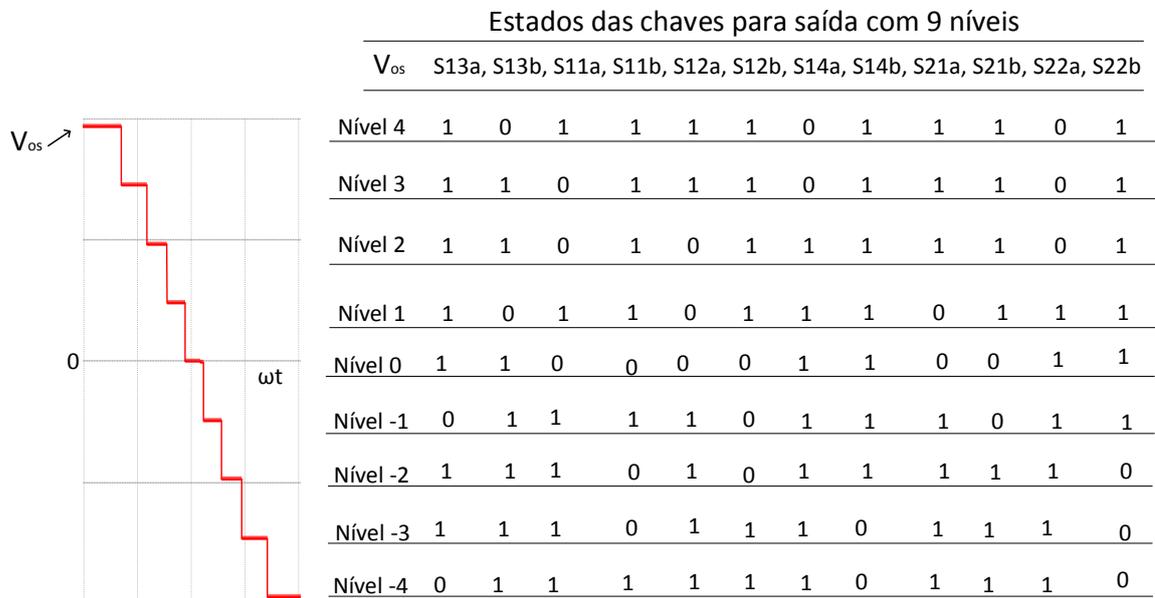
A Figura 46 apresenta as tensões das células 2L em vermelho e L em azul. As células superior e a do meio, ambas com o mesmo valor, em torno de 77,74 V de pico, formam a tensão  $V_{h01}$  com 155,5 V de magnitude. A tensão de pico aplicada no braço inferior é aproximadamente 155,5 V de pico, igual valor obtido com a formação de 2L.

Tabela 4 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 9 níveis na tensão de saída.

Níveis	Níveis fixos e em transição para saída com 9 níveis											
	S13a	S13b	S11a	S11b	S12a	S12b	S14a	S14b	S21a	S21b	S22a	S22b
0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0 transição	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1 transição	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
2	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
2 transição	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1
3	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
3 transição	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
4	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
4 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1

Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 45 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 9 níveis.

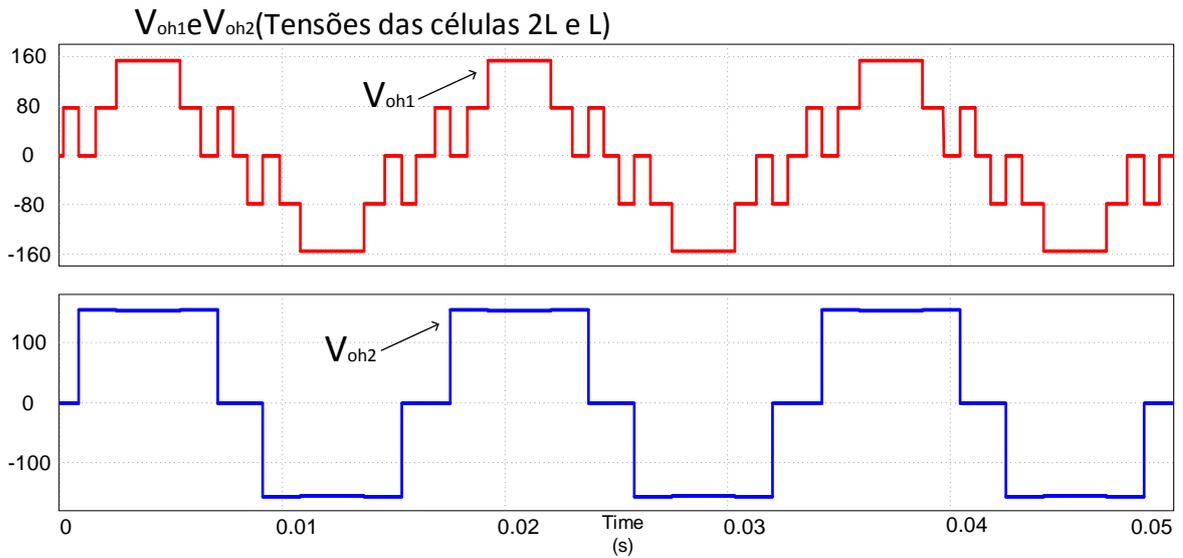


Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 47 mostra a tensão de saída do conversor em funcionamento com fontes de pesos 1, 1 e 2, melhor dizendo, células superiores e inferior. Com os 9 níveis a forma de onda apresentou uma taxa de distorção harmônica de 9,5% considerando todo espectro harmônico oferecido pela ferramenta computacional usada neste trabalho e 2,84% para 50 harmônicas, isto mostra uma melhora em comparação aos 7 níveis em relação à DHT.

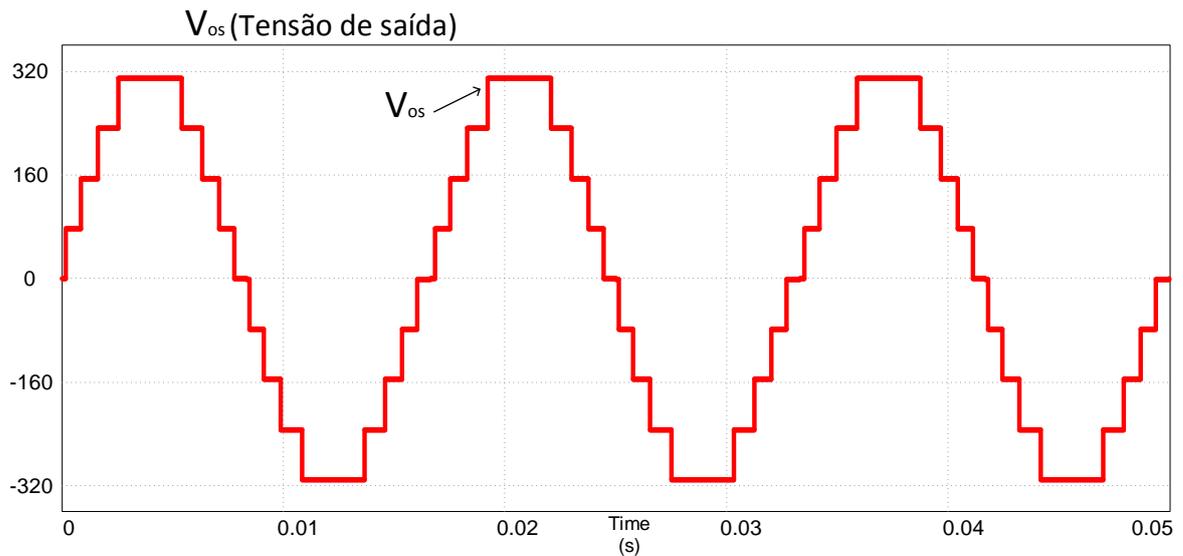
Na Figura 48 é mostrada a contribuição das saídas das células 2L e L na formação da tensão de saída do inversor com 9 níveis em  $V_{os}$ . Pode-se verificar que a célula ( $V_{oh1}$ ), também chamada de 2L, opera em maior frequência e é composta por 5 níveis. Já a célula L trabalha em menor frequência gerando uma onda de 3 níveis ( $V_{oh2}$ ). As células 2L e L possuem o mesmo

Figura 46 – Tensões das células  $V_{oh1}$  (2L) e  $V_{oh2}$  (L) para 9 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 47 – Tensão de saída  $V_{os}$  para 9 níveis.



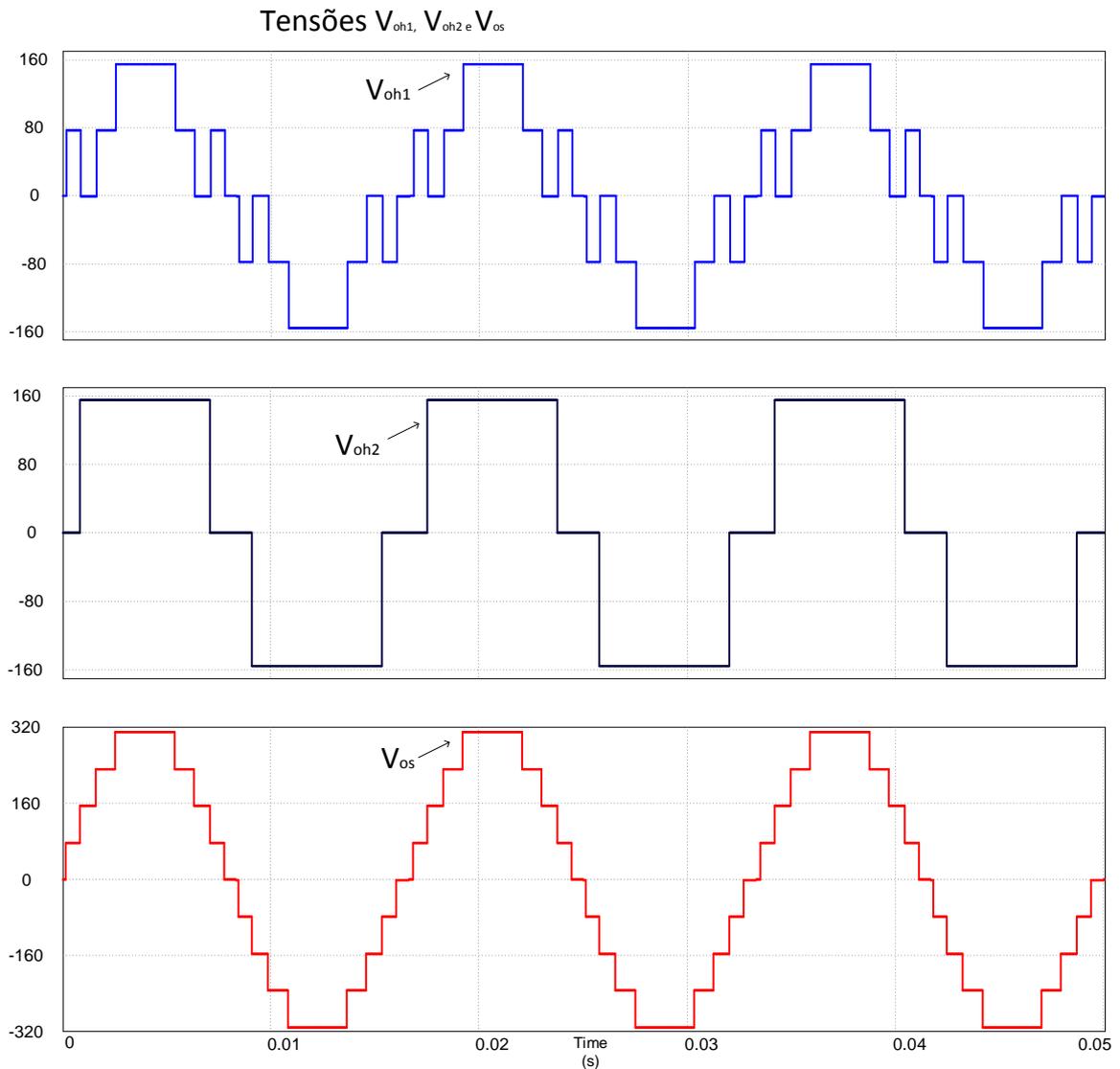
Fonte: Próprio autor (2021).

valor de tensão, em torno de 155,5 V.

A Figura 49 mostra a corrente de saída  $I_{os}$  com 9 níveis na saída. A DHT da corrente foi a mesma da tensão, pois a simulação foi executada com carga resistiva, ou seja, DHT= 9,5%. Para a corrente se manter com DHT= 5% necessita-se de uma indutância de aproximadamente 10,2 mH.

A Figura 50 mostra pulsos requeridos para o trabalho do inversor multinível com 9 níveis na saída.

Figura 48 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão  $V_{os}$  com 9 níveis, em que  $V_{oh1}$  e  $V_{oh2}$  são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente.



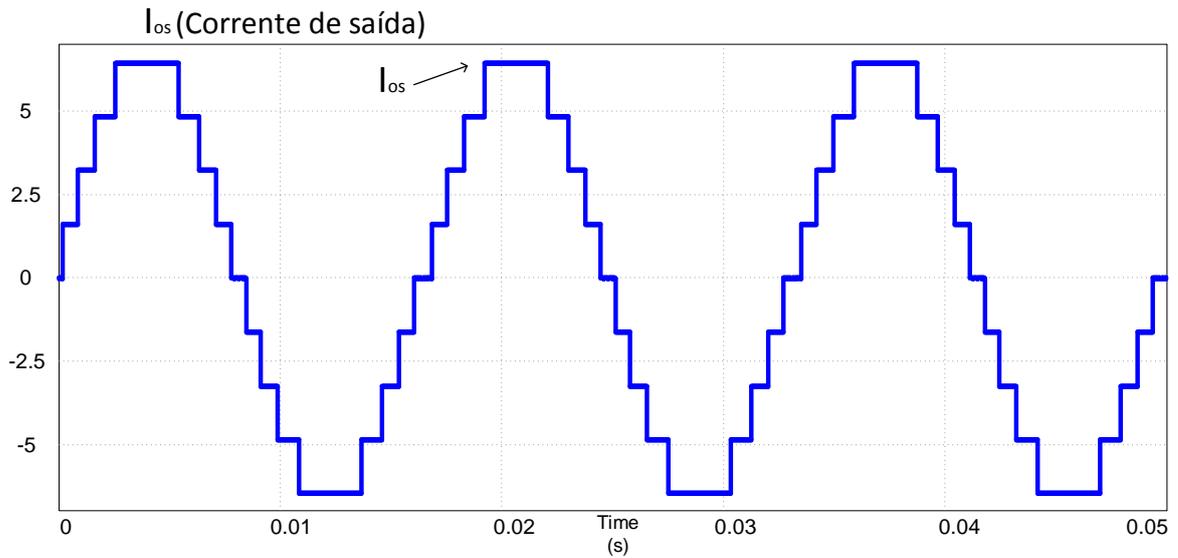
Fonte: Próprio autor (2021).

A equação 3.20 mostra a relação entre a frequência de operação do transformador, 60 Hz, com frequência de operação de cada chave de S11 a S22 com a estrutura trabalhando com 9 níveis. Tem-se que  $X_t$  é o número total de células, que neste caso está considerando-se duas, 2L e L e  $f_1$  é a frequência de operação do transformador, que coincide com a fundamental da rede elétrica.

$$F_{(S11)} = (2^{(X_t-1)} + 2) \cdot f_1 \quad (3.20)$$

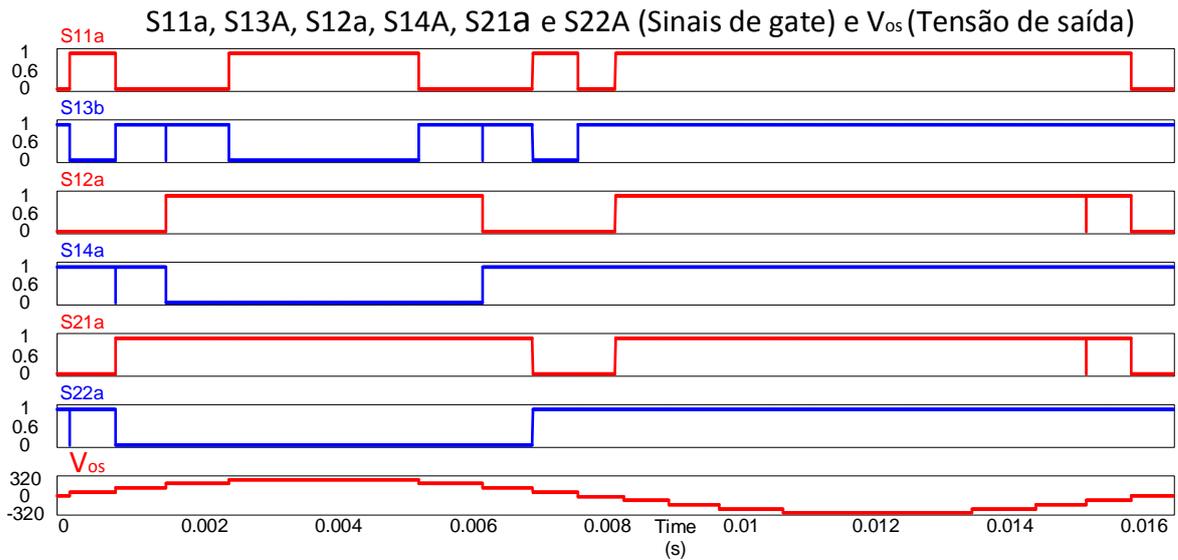
$$F_{(S13)} = (2^{(X_t-1)} + 1) \cdot f_1$$

Figura 49 – Corrente de saída  $I_{os}$  para 9 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 50 – Sinais de gate e tensão de saída  $V_{os}$  para 9 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

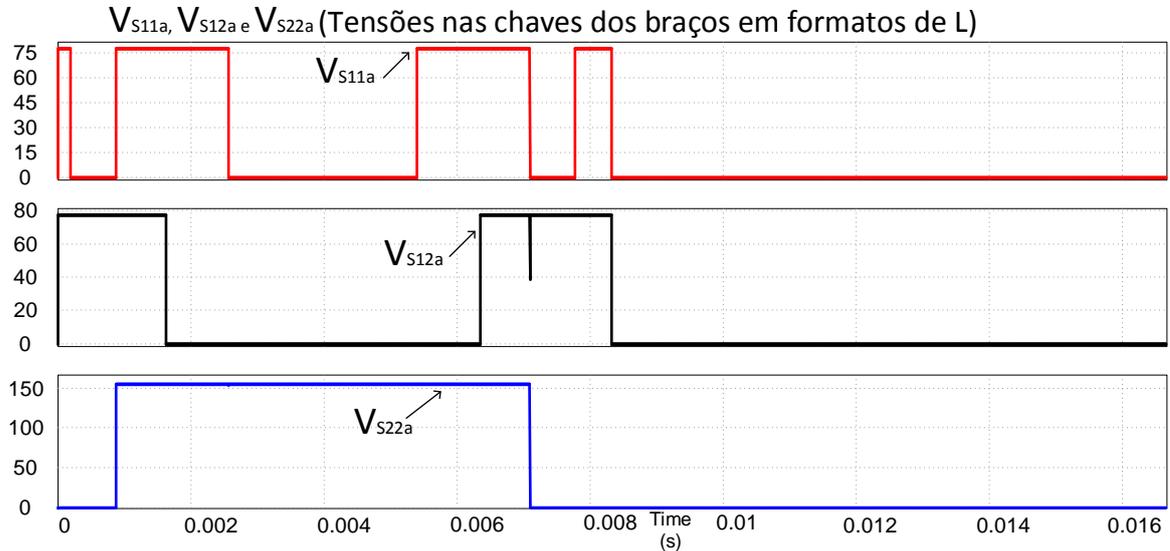
$$F_{(S12,S21)} = (2^{(X_t-1)}) \cdot f_1$$

$$F_{(S14,S22)} = f_1$$

A Figura 51 mostra as tensões que as chaves das células do conversor têm que suportar para o caso com 9 níveis. As chaves S11a a S14b estão sujeitas a aproximadamente 77,74 V de pico, já as chaves de S21a a S22b recebem uma diferença de potencial de 155,5 V de magnitude. Enquanto que as tensões das células superiores (2L) diminuíram em 26 V, ou seja, as

chaves S11a a S14b estão recebendo a aplicação de menor tensão, por volta de 25%, as chaves S21a a S22b estão submetidas a uma tensão aproximadamente 50% maior que para 7 níveis.

Figura 51 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 9 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

A equação 3.21 apresenta a associação da tensão do enrolamento primário com as tensões das bobinas das células secundárias. Em que  $\partial_{1(9)} = \partial_{2(9)}$  e  $\partial_{3(9)}$  correspondem às relações de transformação de  $V_{P1(9)}$ ,  $V_{P2(9)}$  e  $V_{P3(9)}$ , respectivamente, em conexão com a tensão  $V_{Pri(9)}$ . Sendo  $\partial_{1(9)} = 0,5454 = \partial_{2(9)}$  e  $\partial_{3(9)} = 0,2727$ .

$$V_{Pri(9)} \cdot \partial_{1(9)} = V_{P1(9)} = V_{P2(9)} \quad (3.21)$$

$$V_{Pri(9)} \cdot \partial_{3(9)} = V_{P3(9)}$$

### 3.5 Topologia proposta operando com 11 níveis na saída

#### 3.5.1 Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 11 níveis na saída

O inversor funcionando com 11 níveis na saída trabalha com fontes superior, do meio e inferior com pesos 1, 2 e 2, nesta ordem.

A Tabela 5 mostra os estados para o conversor em configuração de 11 níveis na saída. Nesta combinação de estados temos os níveis de 1 a 3 feitos com as fontes superiores de (2L)

que formam a tensão  $V_{h01}$ , o nível 4 com a junção das fontes de peso 2 e o degrau 5 utilizando as 3 fontes secundárias.

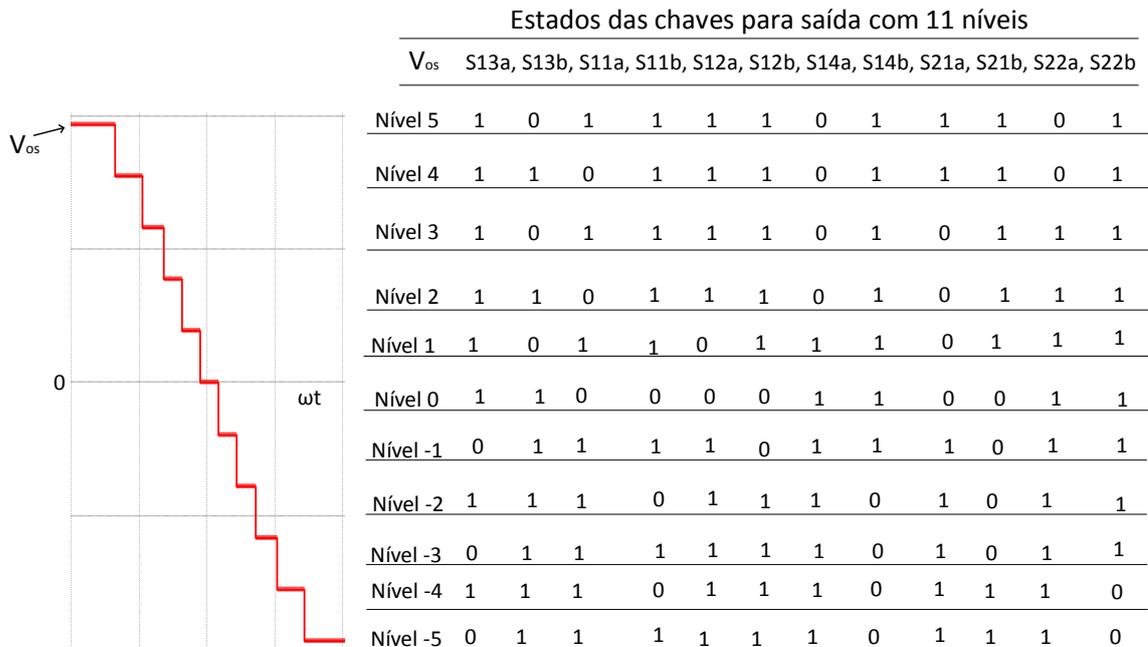
Tabela 5 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 11 níveis na tensão de saída.

Níveis	Níveis fixos e em transição para saída com 11 níveis											
	S13a	S13b	S11a	S11b	S12a	S12b	S14a	S14b	S21a	S21b	S22a	S22b
0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0 transição	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1 transição	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
2	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
2 transição	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
3	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
3 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
4	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
4 transição	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
5	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
5 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1

Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 52 mostra os níveis sintetizados da tensão  $V_{os}$  com 11 níveis e os estados para esta configuração. Nesta Figura não se encontram os estados de transição de nível, mas são apresentados todos os estados das chaves de ambos os semicilos, positivo e negativo.

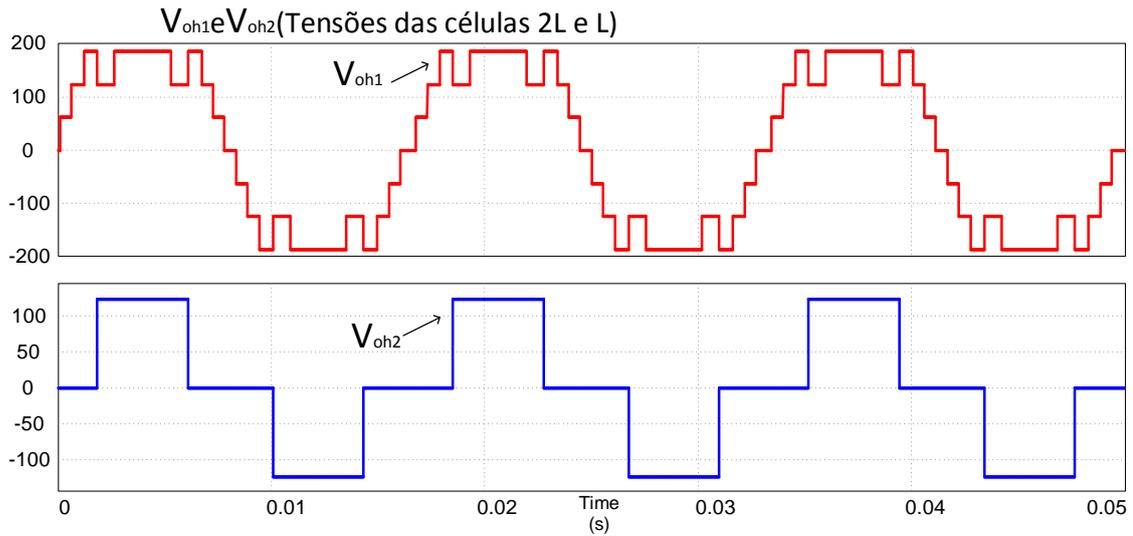
Figura 52 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 11 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 53 apresenta as tensões das células 2L em vermelho e L em azul. Cada nível possui um valor de tensão referente a 62,2 V de pico, portanto a célula de cima com peso 1 recebe o equivalente a 1 degrau de tensão tratando-se dos 11 níveis na saída de  $V_{os}$ . As fontes do meio e inferior são submetidas a tensão de pico de 124,4 V aproximadamente. Lembrando que a célula 2L é a formação das células superior e do meio, a junção destas fornece a tensão  $V_{oh1}$ .

Figura 53 – Tensões das células  $V_{oh1}$  (2L) e  $V_{oh2}$  (L) para 11 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

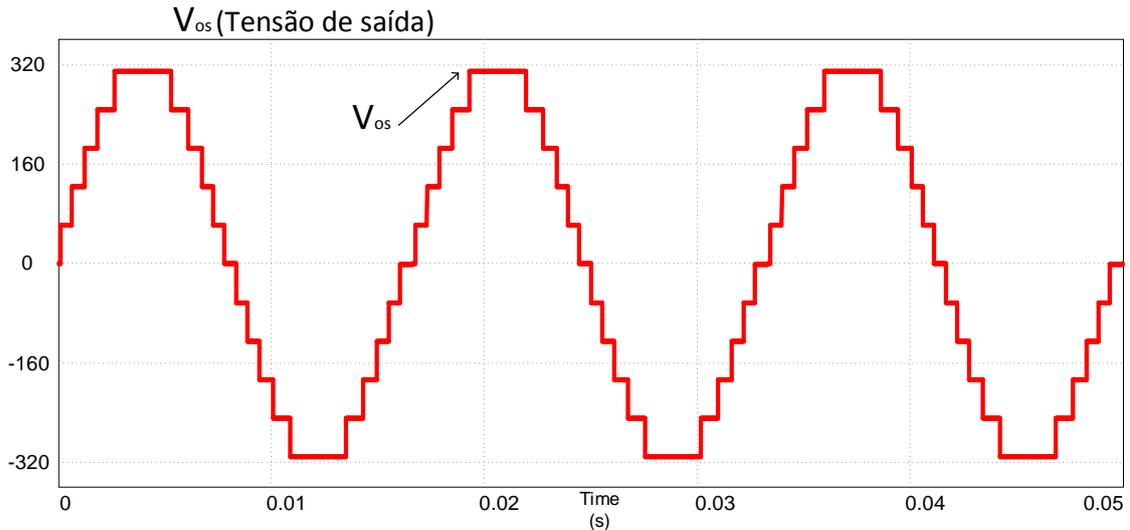
A Figura 54 mostra a tensão de saída do conversor com 11 níveis. A forma de onda apresentou uma taxa de distorção harmônica de 7,83%, isto mostra uma melhora de 1,67% em comparação aos 9 níveis em relação à DHT considerando todo espectro harmônico que a ferramenta computacional empregada nas simulações possibilita mostrar. A DHT para para 50 harmônicas foi de 2,07%.

Na Figura 55 é mostrada a contribuição das saídas das células 2L e L na formação da tensão de saída do inversor com 11 níveis em  $V_{os}$ . Pode-se verificar que a célula ( $V_{oh1}$ ), também chamada de 2L, opera em maior frequência e é composta por 7 níveis. Já a célula L trabalha em menor frequência gerando uma onda de 3 níveis ( $V_{oh2}$ ). As células 2L e L possuem valor de tensão por volta de 186,6 e 124,4 V, respectivamente.

A Figura 56 traz a corrente de saída  $I_{os}$  com 11 níveis na saída. A DHT da corrente foi a mesma da tensão, pois a simulação foi executada com carga resistiva, ou seja, DHT= 7,83%. Para a corrente se manter com DHT= 5% necessita-se de uma indutância de aproximadamente 6 mH.

A Figura 57 mostra pulsos gerados para operação do inversor multinível com 11

Figura 54 – Tensão de saída  $V_{os}$  para 11 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

níveis na saída. Nota-se a complementariedade entre as chaves S11 e S13, S12 e S14 e S21 e S22. No semiciclo positivo S11a não pode estar ativa ao mesmo tempo que S13b e no semiciclo negativo S11b não pode estar acionada quanto S13a estiver em nível alto, para S12a não pode estar ativa quando S14a estiver, no semiciclo positivo e S12b e S14b não podem funcionar juntas no semiciclo negativo, isto acontece de forma semelhante para S21 e S22.

A equação 3.22 mostra a relação entre a frequência de operação do transformador, 60 Hz, com frequência de operação de cada chave de S11 a S22 para a estrutura trabalhando com 11 níveis. Tem-se que  $X_t$  é o número total de células, que neste caso está considerando-e duas,  $2L$  e  $L$ ,  $X_d$  é a célula desejada,  $f_1$  é a frequência de operação do transformador, que coincide com a fundamental da rede elétrica.

$$F_{(S11)} = (2^{(X_t-1)} + 4) \cdot f_1 \quad (3.22)$$

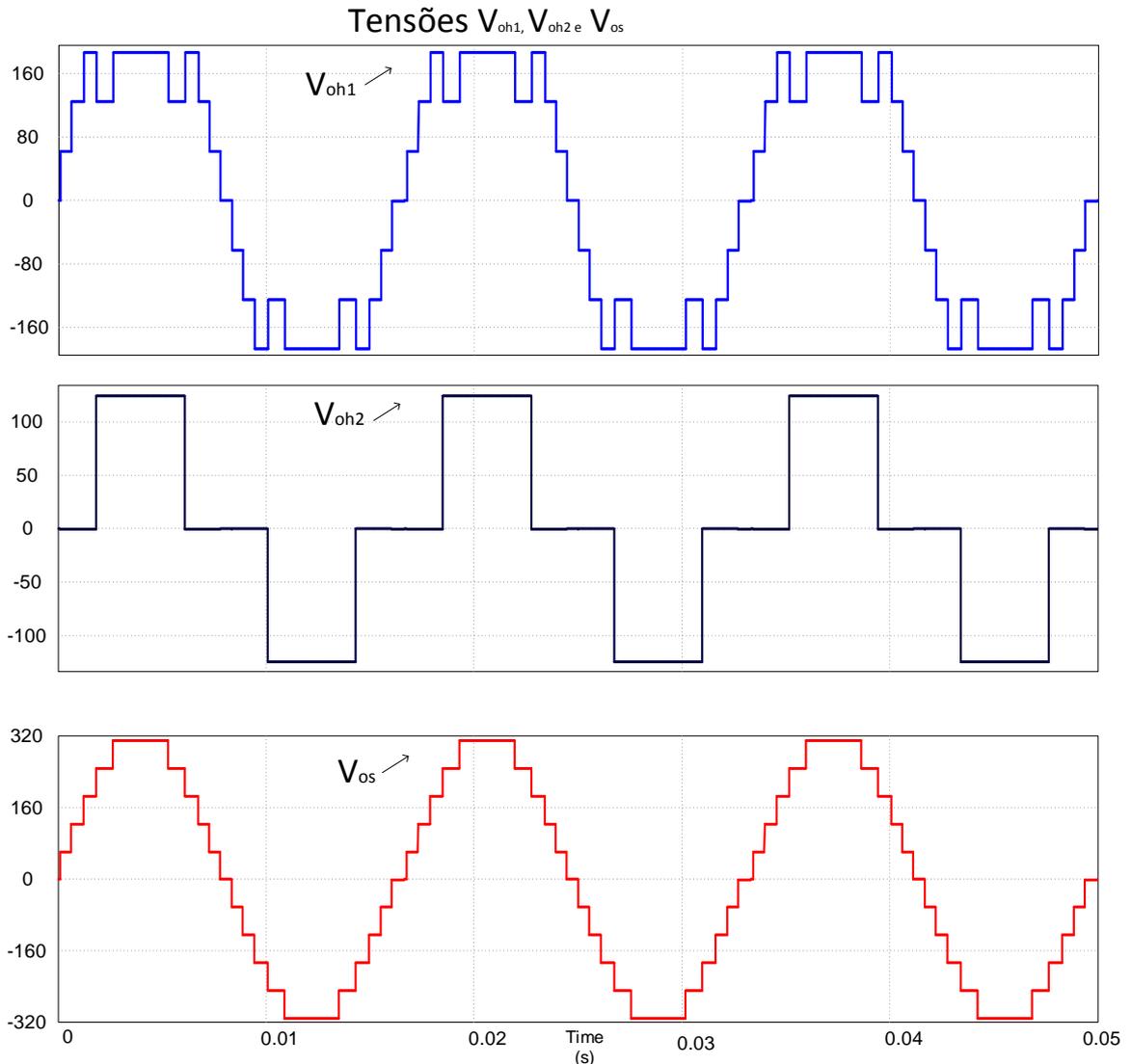
$$F_{(S13)} = (2^{(X_t-1)} + 3) \cdot f_1$$

$$F_{(S12,S21)} = (2^{(X_t-1)}) \cdot f_1$$

$$F_{(S14,S22)} = f_1$$

A Figura 58 mostra as tensões que as chaves das células do conversor têm que suportar para o caso com 11 níveis. As chaves S11a a S13b estão sujeitas a aproximadamente

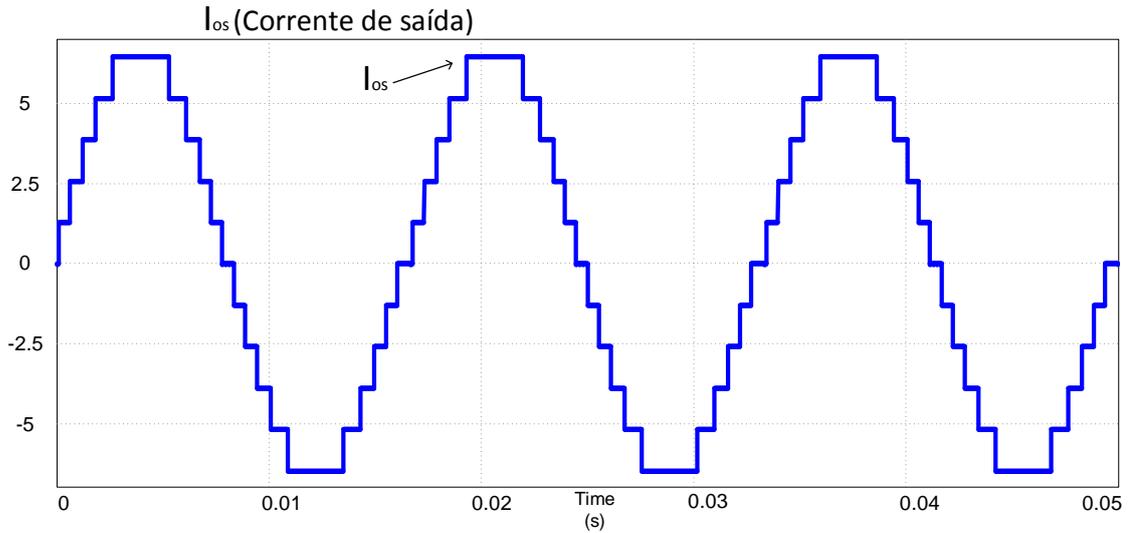
Figura 55 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão  $V_{os}$  com 11 níveis, em que  $V_{oh1}$  e  $V_{oh2}$  são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente.



Fonte: Próprio autor (2021).

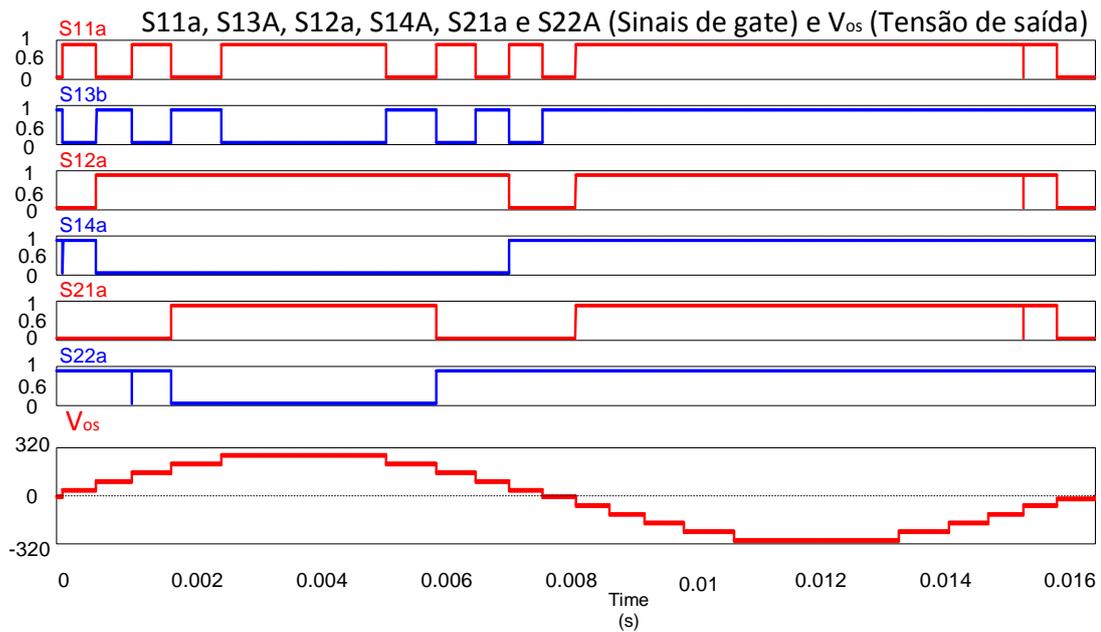
62,2 V de pico, já as chaves de S12a a S22b recebem uma diferença de potencial de 124,4 V de magnitude. A tensão na célula superior diminui em cerca de 20% em relação ao arranjo para 9 níveis. As duas outras células, do meio e superior, com mesmo peso, também receberam uma aplicação de tensão em suas chaves de valores distintos, a fonte do meio agora tem uma tensão 60% maior e a célula inferior em torno de 20% a menos do que com 9 níveis. Estes dados indicam que as tensões se distribuíram de forma igual entre as duas últimas fontes, dando um equilíbrio entre as chaves de S12a a S22b, possibilitando uma redução de potencial elétrico em S21a a S22b.

Figura 56 – Corrente de saída  $I_{os}$  para 11 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 57 – Sinais de gate e tensão de saída  $V_{os}$  para 11 níveis.



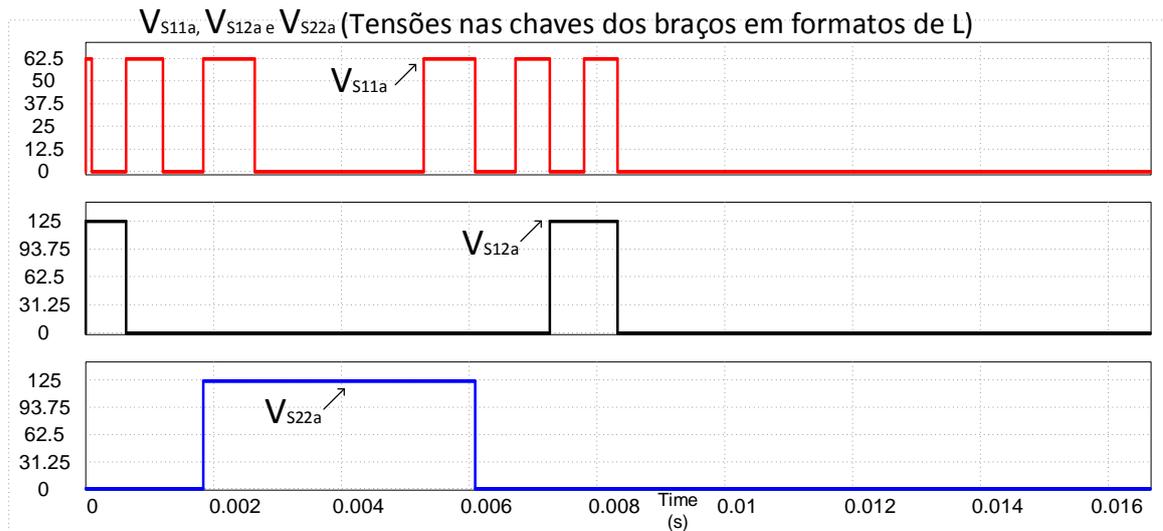
Fonte: Próprio autor (2021).

A equação 3.23 apresenta a associação da tensão do enrolamento primário com as tensões das bobinas das células secundárias. Em que  $\partial_{1(11)}$ ,  $\partial_{2(11)}=\partial_{3(11)}$  correspondem às relações de transformação de  $V_{P1(11)}$ ,  $V_{P2(11)}$  e  $V_{P3(11)}$ , respectivamente, em conexão com a tensão  $V_{Pri(11)}$ . Sendo  $\partial_{1(11)}=0,5454$ ,  $\partial_{2(11)}=0,2727=\partial_{3(11)}$ .

$$V_{Pri(11)} \cdot \partial_{1(11)} = V_{P1(11)} \quad (3.23)$$

$$V_{Pri(11)} \cdot \partial_{2(11)} = V_{P2(11)} = V_{P3(11)}$$

Figura 58 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 11 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

### 3.6 Topologia proposta operando com 13 níveis na saída

#### 3.6.1 Grandezas elétricas coletadas em simulação para o inversor operando com 13 níveis na saída

O inversor trabalhando com 13 níveis na saída têm fontes com pesos 1, 2 e 3, por essa ordem.

A Tabela 6 mostra os estados fixos e em transição para o funcionamento do inversor com 13 níveis na tensão de saída. A fonte superior participa na formação dos níveis 1, 3, 4 e 6, observação que pode ser feita consultando a Tabela e constatando que as suas chaves principais S11a e S11b estão ligadas. A fonte do meio está inserida na criação dos degraus 2, 3, 5, e 6, pois S12a e S12b estão ativas nestes níveis. Na elaboração do níveis 4 a 6 contamos com a participação da fonte inferior porque S21a e S21b estão acionadas.

A Figura 59 mostra os níveis sintetizados da tensão  $V_{os}$  com 13 níveis e os estados para esta configuração. Nesta Figura não se encontram os estados de transição de nível, mas são apresentados todos os estados das chaves de ambos os semiciclos, positivo e negativo.

A Figura 60 mostra as tensões das células 2L em vermelho e L em azul.  $V_{oh1}$  possui o mesmo valor de pico que  $V_{oh2}$  pois é composta pelas tensões das duas fontes superiores, então, tanto  $V_{oh1}$  como  $V_{oh2}$  têm a tensão de pico em volta de 155,5 V.

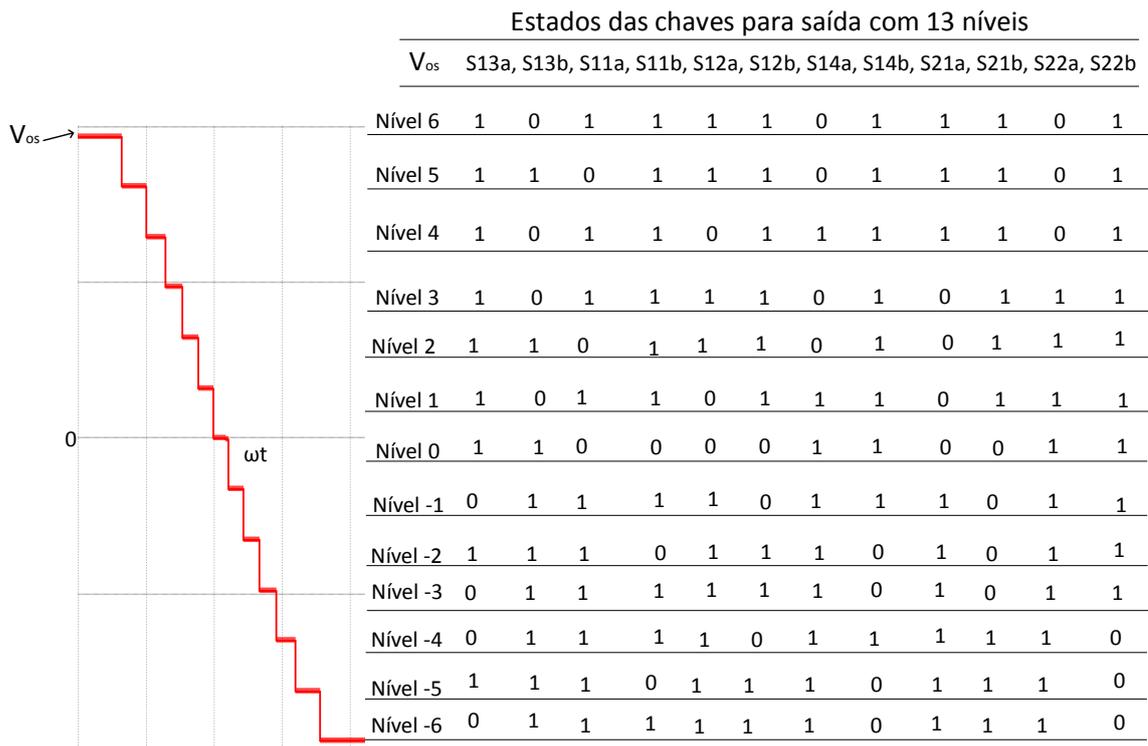
A Figura 61 mostra a tensão de saída do conversor com 13 níveis. A forma de onda tem uma taxa de distorção harmônica de 6,19%, A distorção harmônica total caiu em

Tabela 6 – Estados fixos e em transição aplicados ao conversor no primeiro 1/4 de ciclo para 13 níveis na tensão de saída.

Níveis	Níveis fixos e em transição para saída com 13 níveis											
	S13a	S13b	S11a	S11b	S12a	S12b	S14a	S14b	S21a	S21b	S22a	S22b
0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0 transição	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1 transição	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
2	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
2 transição	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
3	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
3 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
4	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
4 transição	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1
5	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
5 transição	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
6	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
6 transição	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1

Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 59 – Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 13 níveis.

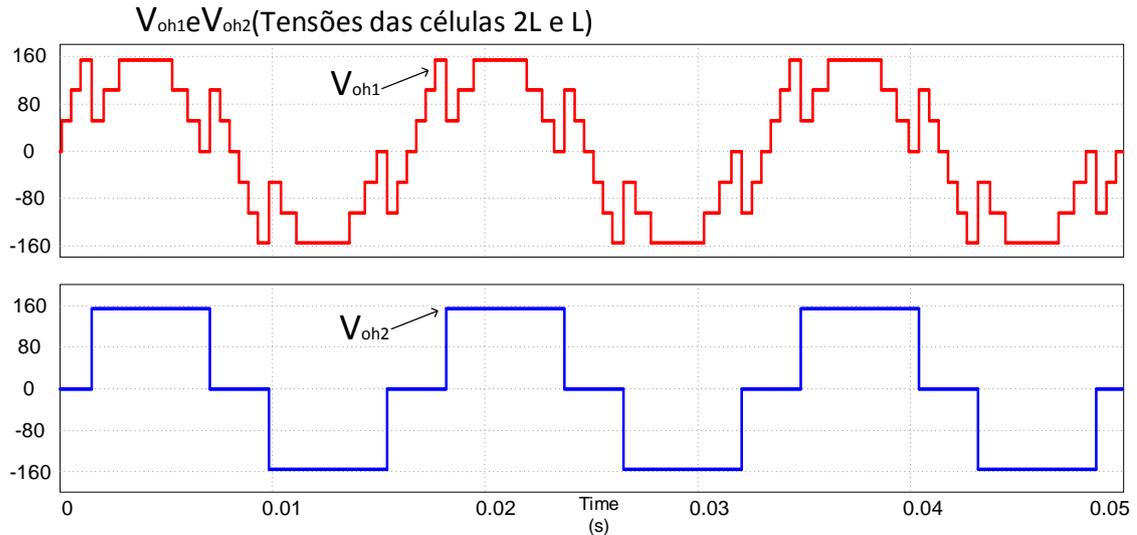


Fonte: Próprio autor (2021).

1,64% com referência à configuração com 11 níveis considerando todo espectro harmônico disponibilizado pelo software utilizado, pois este tem uma limitação, e apresenta DHT de 1,46% para 50 harmônicas.

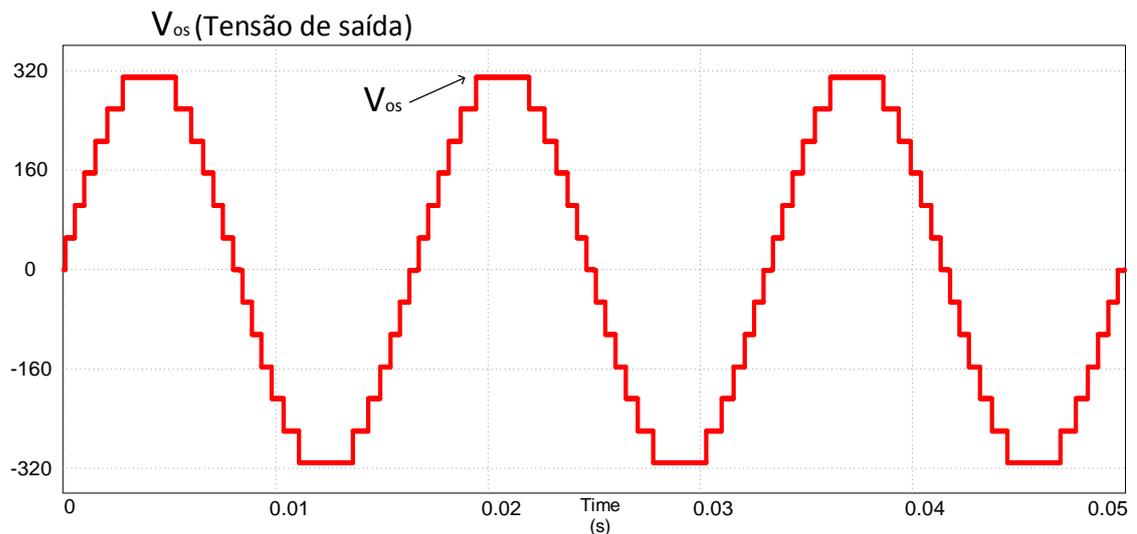
Na Figura 62 é mostrada a contribuição das saídas das células 2L e L na formação da

Figura 60 – Tensões das células  $V_{oh1}$  (2L) e  $V_{oh2}$  (L) para 13 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 61 – Tensão de saída  $V_{os}$  para 13 níveis.

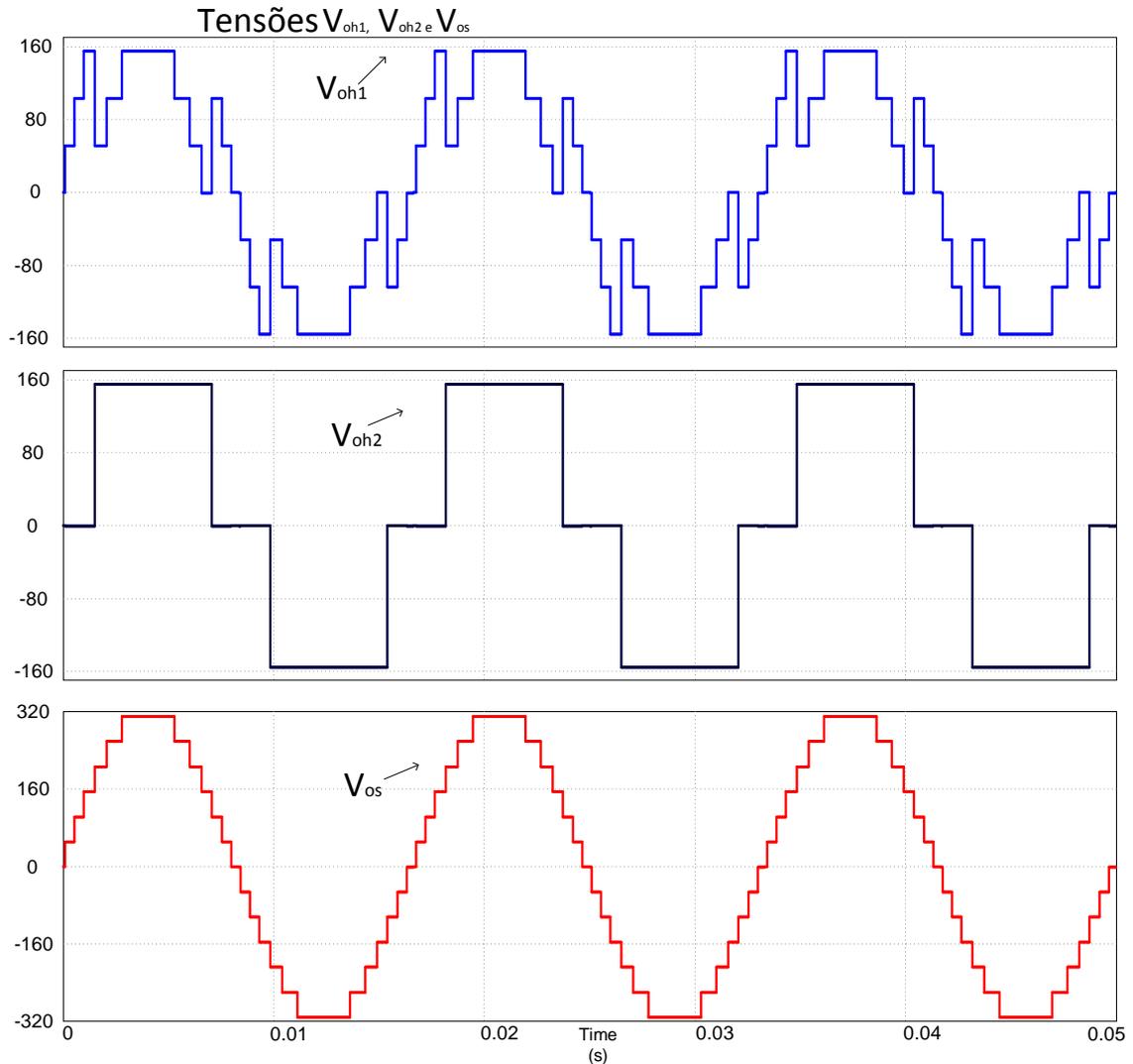


Fonte: Próprio autor (2021).

tensão de saída do inversor com 13 níveis em  $V_{os}$ . Pode-se verificar que a célula ( $V_{oh1}$ ), também chamada de 2L, opera em maior frequência e é composta por 7 níveis. Já a célula L trabalha em menor frequência gerando uma onda de 3 níveis ( $V_{oh2}$ ). As células 2L e L possuem valor de tensão por volta de 155,5 V de pico. Percebe-se uma assimetria de níveis entre os quadrantes de todos os arranjos apresentados, com 15, 7, 9 e 11 níveis, entretanto com 13 níveis não há esta assimetria, pois devido à configuração de estados adotada nesta quantidade de níveis, para evitar mais perdas por comutação, na segunda parte dos semiciclos, tanto o positivo quanto o negativo, utilizou-se a fonte inferior, células L para formação a partir o nível 3 da tensão de saída.

A Figura 63 mostra a corrente de saída  $I_{os}$  com 13 níveis na saída. A DHT da corrente para o teste com carga resistiva foi 6,19%. Para a corrente se manter com DHT= 5%

Figura 62 – Contribuição das células 2L e L na formação da tensão  $V_{os}$  com 13 níveis, em que  $V_{oh1}$  e  $V_{oh2}$  são as tensões da junção dos dois primeiros módulos e do módulo inferior em L, respectivamente.

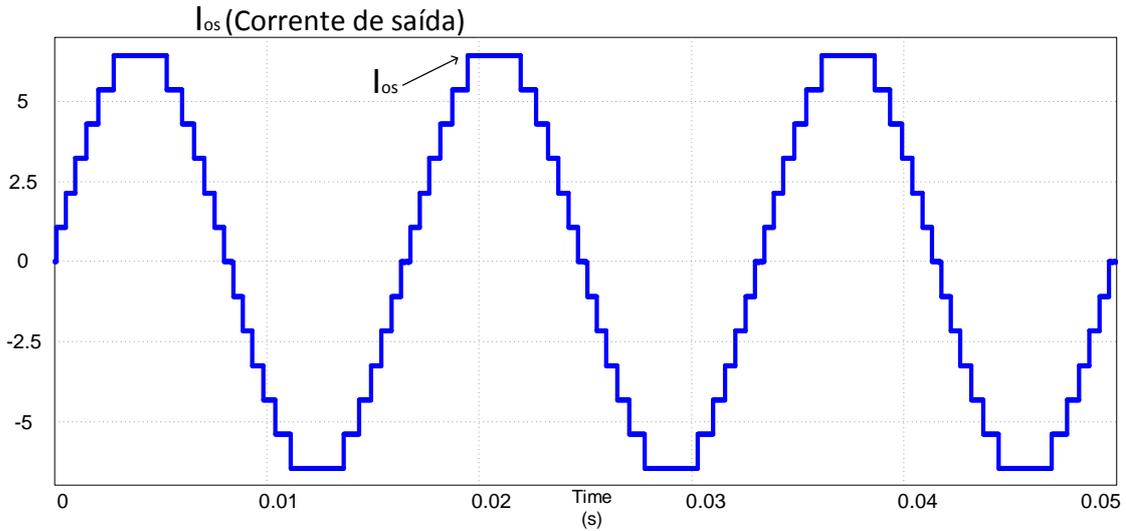


Fonte: Próprio autor (2021).

necessita-se de uma indutância de 2 mH.

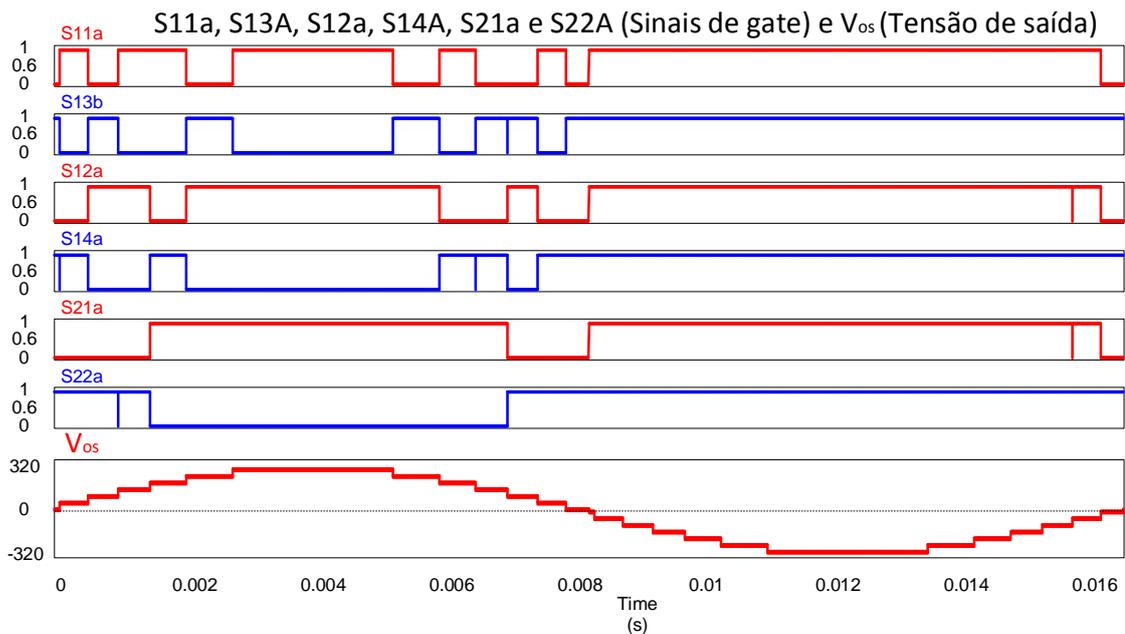
A Figura 64 mostra pulsos necessários ao acionamento do inversor multinível com 13 níveis na saída. Pode-se confirmar o que vimos na Tabela 6 que as chaves S11a e S11b estão participando da formação dos níveis 1, 3, 4 e 6, já nos níveis 2 e 5 S11a está desligada. S12a e S12b estão ativas em 2, 3, 5 e 6, e em 1 e 4 S12a está desacionada. Para os degraus 4 e 6 temos S21a e S21b ligadas, tratando-se dos outros níveis S21a é colocada em 0. Ressalta-se que os estados vistos na Tabela 6 são apenas do primeiro 1/4 de ciclo da frequência fundamental, e na Figura 64 é visto o ciclo completo, mas para o semiciclo negativo pode-se observar que para esta análise as chaves S11b, S12b e S21b é que vão estar desacionadas.

Figura 63 – Corrente de saída  $I_{os}$  para 13 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 64 – Sinais de gate e tensão de saída  $V_{os}$  para 13 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

A equação 3.24 mostra a relação entre a frequência de operação do transformador, 60 Hz, com frequência de operação de cada chave de S11 a S22 com a estrutura trabalhando com 13 níveis. Tem-se que  $X_t$  é o número total de células, que neste caso está considerando-se duas,  $2L$  e  $L$ ,  $X_d$  é a célula desejada,  $f_1$  é a frequência de operação do transformador, que coincide com a fundamental da rede elétrica.

$$F_{(S11)} = (2^{(X_t-1)} + 4) \cdot f_1 \quad (3.24)$$

$$F_{(S13)} = (2^{(X_t-1)} + 3) \cdot f_1$$

$$F_{(S12)} = (2^{(X_t-1)} + 2) \cdot f_1$$

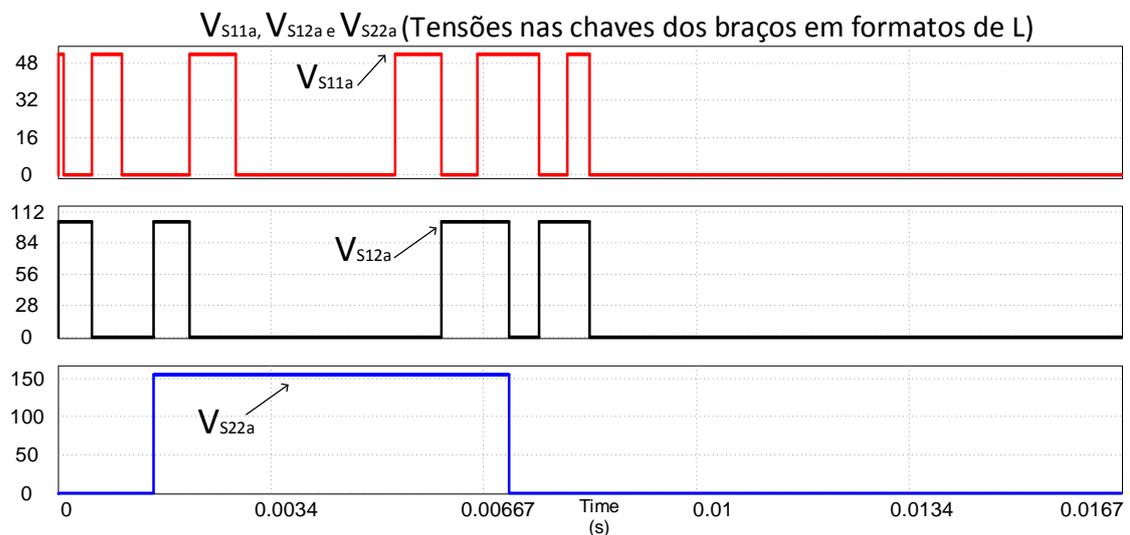
$$F_{(S14)} = (2^{(X_t-1)} + 1) \cdot f_1$$

$$F_{(S21)} = (2^{(X_t-1)}) \cdot f_1$$

$$F_{(S22)} = f_1$$

A Figura 88 mostra as tensões que as chaves das células do conversor estão sujeitas no caso com 13 níveis. As chaves S11a a S13b estão sujeitas a aproximadamente 51,8 V de pico, como nesta estrutura das células precisamos do nível 1 sem subtrair uma fonte da outra para o fornecimento da tensão deste degrau e quem está recebendo este nível é a célula superior, quanto mais níveis temos na tensão de saída, menor a tensão da célula 1. As chaves de S12a a S14b recebem uma diferença de potencial de 103,7 V de magnitude. A tensão nas chaves S21a a S22b tem 155,5 V de pico pois tem peso 3.

Figura 65 – Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a para 13 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

A equação 3.25 apresenta a associação da tensão do enrolamento primário com as tensões das bobinas das células secundárias. Em que  $\partial_{1(13)}$ ,  $\partial_{2(13)}$  e  $\partial_{3(13)}$  correspondem às

relações de transformação de  $V_{P1(13)}$ ,  $V_{P2(13)}$  e  $V_{P3(13)}$ , respectivamente, em conexão com a tensão  $V_{Pri(15)}$ . Sendo  $\partial_{1(13)}=1,091$ ,  $\partial_{2(13)}=0,5454$  e  $\partial_{3(13)}=0,3636$ .

$$V_{Pri(13)} \cdot \partial_{1(13)} = V_{P1(13)} \quad (3.25)$$

$$V_{Pri(13)} \cdot \partial_{2(13)} = V_{P2(13)}$$

$$V_{Pri(13)} \cdot \partial_{3(13)} = V_{P3(13)}$$

### 3.7 Considerações finais

A Tabela 7 mostra o percentual de DHT e os pesos das fontes do conversor proposto em seu funcionamento desde 7 até 15 níveis na saída.

..

Tabela 7 – Distorção harmônica total e pesos das fontes para as configuração de 7 até 15 níveis.

<b>Distorção harmônica total para o conversor funcionando de 7 a 15 níveis</b>		
<b>Estrutura operando em diferentes arranjos de estados</b>	<b>Pesos das fontes</b>	<b>DHT % (<math>V_{os}</math>)</b>
Configuração com 7 níveis	1; 1; 1.	14,55.
Configuração com 9 níveis	1; 1; 2.	9,5.
Configuração com 11 níveis	1; 2; 2	7,83.
Configuração com 13 níveis	1; 2; 3.	6,19.
Configuração com 15 níveis	1; 2; 4.	5,37.

Fonte: Próprio autor (2021).

A Tabela 8 mostra o valor de pico de tensão a que as chaves S11a até S22b estão sujeitas e a indutância que proporciona a DHT dentro dos padrões exigidos em norma para a corrente de saída em todos os arranjos de funcionamento do conversor mostrado neste capítulo.

Tabela 8 – Tensões de pico aplicadas nas chaves e filtro indutivo demandado para DHT=5% em  $I_{os}$ .

<b>Tensões de pico que as chaves estão submetidas e filtro indutivo necessário para DHT=5% em <math>I_{os}</math></b>		
<b>Células 2L e L</b>	<b>Tensões de pico</b>	<b>Indutância</b>
Configuração com 7 níveis chaves S11a S22b	103,7; 103,7; 103,7.	65 mH.
Configuração com 9 níveis chaves S11a S22b	77,74; 77,74; 155,5.	10,2 mH.
Configuração com 11 níveis chaves S11a S22b	62,2; 124,4; 124,4.	6 mH.
Configuração com 13 níveis chaves S11a S22b	51,8; 103,7; 155,5.	2 mH.
Configuração com 15 níveis chaves S11a S22b	44,5; 89; 178.	0,6 mH.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 9 mostra a relação de frequência entre as chaves das células do inversor com relação à frequência fundamental do transformador, que no caso funcionou com 60 Hz. Na

tabela encontra-se o quão maior é o valor da frequência de cada chave em comparação com a frequência do transformador, que também coincide com a fundamental da rede, mas ressalta-se que neste trabalho o inversor não foi conectado à rede elétrica.

Tabela 9 – Relação de frequência das chaves das células 2L e L em comparação com a frequência fundamental para as configurações de 7 a 15 níveis.

Frequência do transformador e configurações de níveis	Relação de frequência $f_{xyz}/f_1$					
	S11	S12	S13	S14	S21	S22
$f_{trafo} = 60 \text{ Hz}$	a/b	a/b	a/b	a/b	a/b	a/b
Operação com 7 níveis	2	2	1	1	2	1
Operação com 9 níveis	4	2	3	1	2	1
Operação com 11 níveis	6	2	5	1	2	1
Operação com 13 níveis	6	4	5	3	2	1
Operação com 15 níveis	8	4	7	3	2	1

Fonte: Próprio autor.

Este capítulo apresentou a topologia proposta deste trabalho. Foram vistas as características do conversor multinível e sua operação desde 7 até 15 níveis na tensão de saída  $V_{os}$ , utilizando apenas uma fonte CC e fontes secundárias de diferentes relações de transformação utilizando 3 fontes distintas ou iguais nas células dependendo da combinação das bobinas e do peso adotado para cada fonte secundária. Foi mostrado que o conversor opera com chaves bidirecionais, 6 chaves no total, o que faz essa estrutura ser bem atraente em comparação com conversores multiníveis convencionais mostradas no capítulo 2. A estrutura conta com a vantagem de não utilizar diodos para produzir as tensões das células, pode operar como elevador ou abaixador de tensão, não apresenta grandes perdas por chaveamento, pois funciona com a modulação staircase, isto é, opera em baixa frequência e não faz uso de capacitores eletrolíticos nos módulos 2L e L. Vimos que na configuração de 15 níveis a célula L superior é a que menos recebe aplicação de tensão com 44,5 V de pico, enquanto que para a célula inferior temos 178 V de pico aplicados às chaves, esta análise foi feita para todas combinações de saídas do conversor. Após vistas as configurações de funcionamento de 7 a 15 níveis e observação da DHT, das tensões aplicadas em cada célula e da indutância necessária para distorção harmônica total de 5% em  $I_{os}$ , concluímos que a melhor configuração para se operar a topologia é com 15 níveis, pois na prática o custo seria de valor semelhante na escolha das chaves, também seria despendido um indutor de maior valor nas outras combinações.

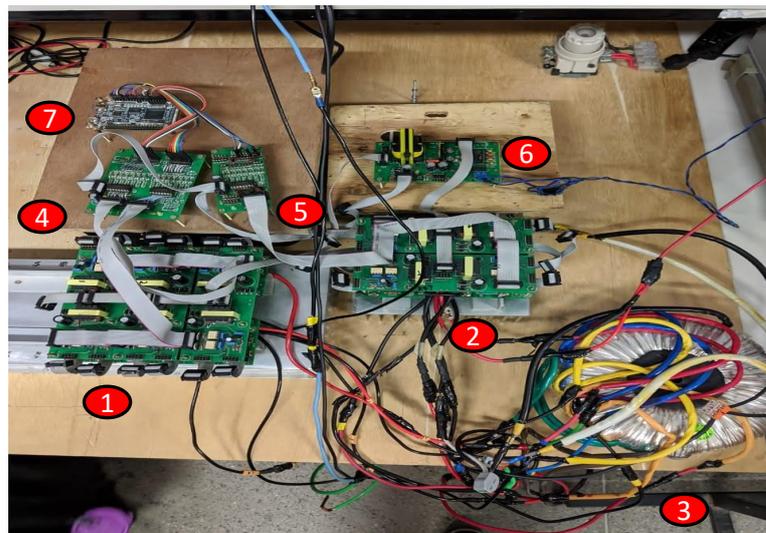
O fato do inversor assimétrico de até 15 níveis ser bidirecional faz com que ele possa ser posto em funcionamento na interligação entre sistemas CC-CA, em sistemas fotovoltaicos e em microrredes.

#### 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 66 mostra o protótipo de inversor multinível proposto. A célula CHB-2cb usada em Mesquita (2016) foi rearranjada para a montagem da estrutura vista na Figura 22, dando origem às células L deste trabalho, 2L que forma a tensão  $V_{h01}$  e L inferior a qual produz a tensão  $V_{h02}$ . O converor de Mesquita (2016) possuía 49 níveis na saída, a estrutura foi alterada, feitas as devidas ligações e desconexões, até a reorganização e funcionamento com 15 até níveis em  $V_{os}$ .

Na Figura 66 pode-se ver as células L, a ponte H-bridge de entrada, o transformador toroidal de vários secundários (6 enrolamentos secundários), os buffers que recebem os sinais do FPGA e enviam para os drivers, a fonte de alimentação dos drivers e buffers e o FPGA modelo Cyclone 4 EP4CE22F17C6N, responsável por produzir os sinais de gate da ponte H e das células L.

Figura 66 – Protótipo montado em laboratório.



- |  |  |
|--|--|
| ① Células 2L e L                               | ⑥ Fonte de alimentação para os drivers e buffers |
| ② Ponte <i>H-bridge</i> de entrada             | ⑦ FPGA modelo Cyclone 4 EP4CE22F17C6N            |
| ③ Transformador toroidal de vários secundários |  |
| ④ ⑤ Buffer ULN2003                             |  |

Fonte: Próprio autor (2021).

A Tabela 10 mostra as peculiaridades essenciais das chaves empregadas na topologia de até 15 níveis na saída.

Tabela 10 – Chaves utilizadas na montagem da topologia.

Chaves semicondutoras utilizadas no protótipo			
Células	Mosfets	Rdson Typ.[mΩ]	Rdson max [mΩ]
Ponte H de entrada	IRFP 4368PbF: V <sub>n</sub> = 75V; I <sub>d</sub> =195A; R <sub>θ</sub> Jc= 0.29°C/W tdon= 43ns; tr= 220ns; tdoff= 170ns; tf= 260ns; Ciss=19230pF Diodo VF=1,3V; trr->typ130ns, max 200ns; Qrr->450 – 680 nC (typ-max 25°)	1,46	1,85
Módulos	STW88N65M5: V <sub>n</sub> = 650V; I <sub>d</sub> = 84A; R <sub>θ</sub> Jc= 0,28 °C/W tdon=141 ns; tr= 16ns; tdoff= 56ns; tf= 29ns; Ciss= 8825pF Diodo VF=1,5V; trr->typ544ns Qrr->14uC (typ-max 25°)	24	29

Fonte: Próprio autor (2021).

#### 4.1 Resultados para operação do transformador em 60 Hz e com 7, 11 e 15 níveis na saída, respectivamente

##### 4.1.1 Teste realizado para 7 níveis

A Figura 67 apresenta a tensão e a corrente de saída para 7 níveis no teste feito com carga resistiva, sendo a potência de saída de 209 W, 220 V eficazes em  $V_{os}$ , corrente  $I_{os}$  com valor cerca de 950 mA e resistência R de aproximadamente 19,33 Ω.

A Figura 68 traz as grandezas tensão  $V_{os}$  e corrente  $I_{os}$  operando com carga resistiva e indutiva, sendo o indutor de L=19,7 mH e a resistência R=90 Ω. O fator de potência foi de 0,997 e  $P_{os}$ =206 W, tensão de aproximadamente 220 V eficazes e corrente eficaz de 940 mA.

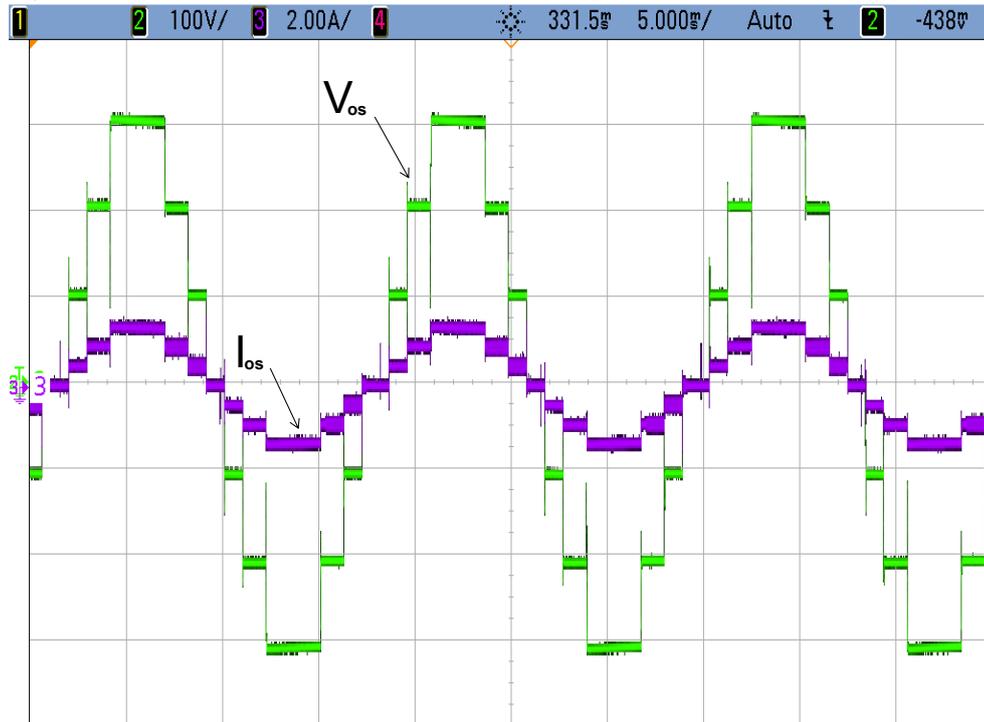
A Figura 69 mostra a tensão primária do inversor, pra 7 precisou-se aplicar no enrolamento primario cerca de aproximadamente 58 V e rendimento, tratando-se da potência ativa  $\eta$ =0,94%.

##### 4.1.2 Teste realizado para 11 níveis

A Figura 70 mostra a tensão  $V_{os}$  e a corrente  $I_{os}$  para 11 níveis com filtro indutivo empregado de 0,8 mH, resistência de 19,3 Ω, fator de potência de 0,999 e  $P_{os}$  de aproximadamente 208,6 W, corrente e tensão eficazes de 940 mA e 220 V, respectivamente.

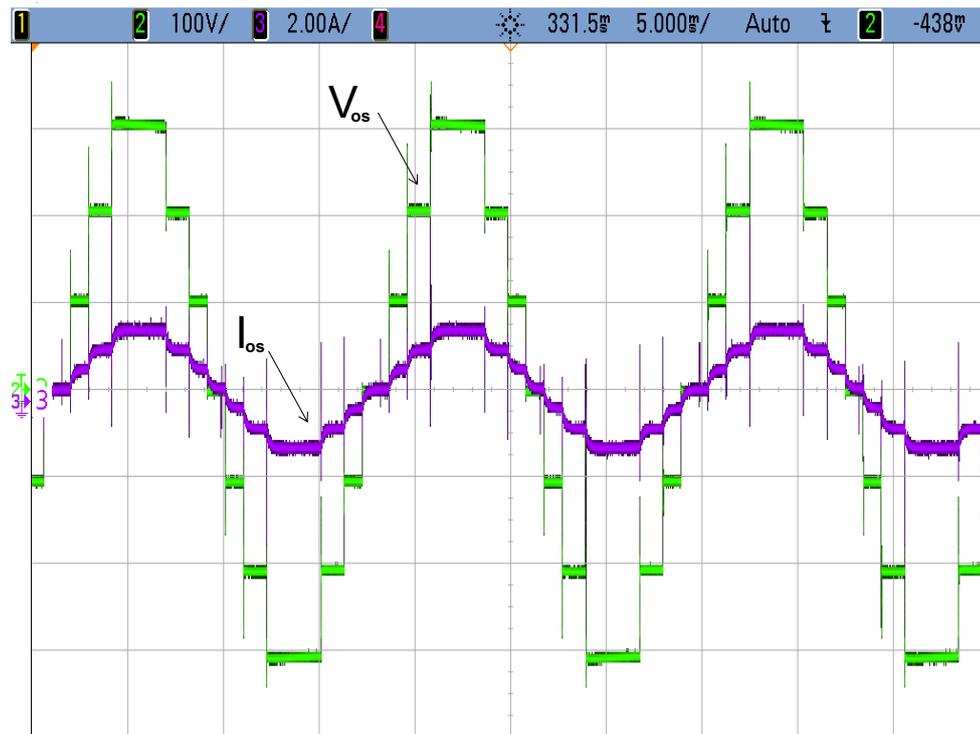
A Figura 71 apresenta a tensão e a corrente de saída com 11 níveis. O inversor está trabalhando com potência ativa em torno de 205,4 W, fator de potência de 0,997 e rendimento

Figura 67 – Tensão  $V_{os}$  e corrente  $I_{os}$  com com 7 níveis e carga R.



Fonte: Próprio autor (2021).

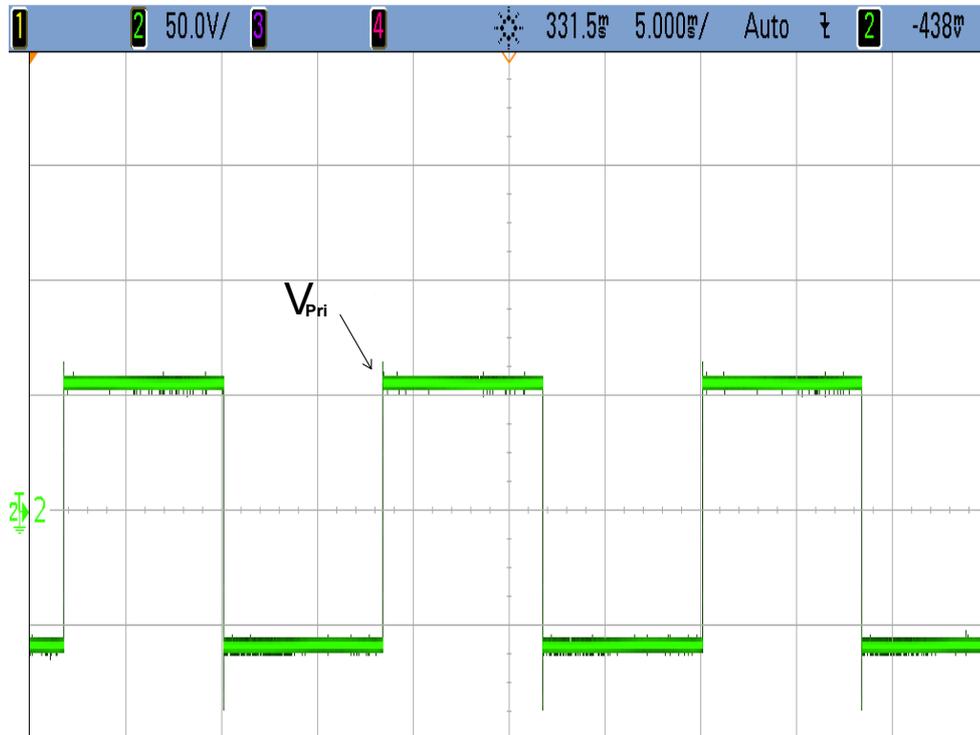
Figura 68 – Tensão  $V_{os}$  e corrente  $I_{os}$  com 7 níveis e carga RL.



Fonte: Próprio autor (2021).

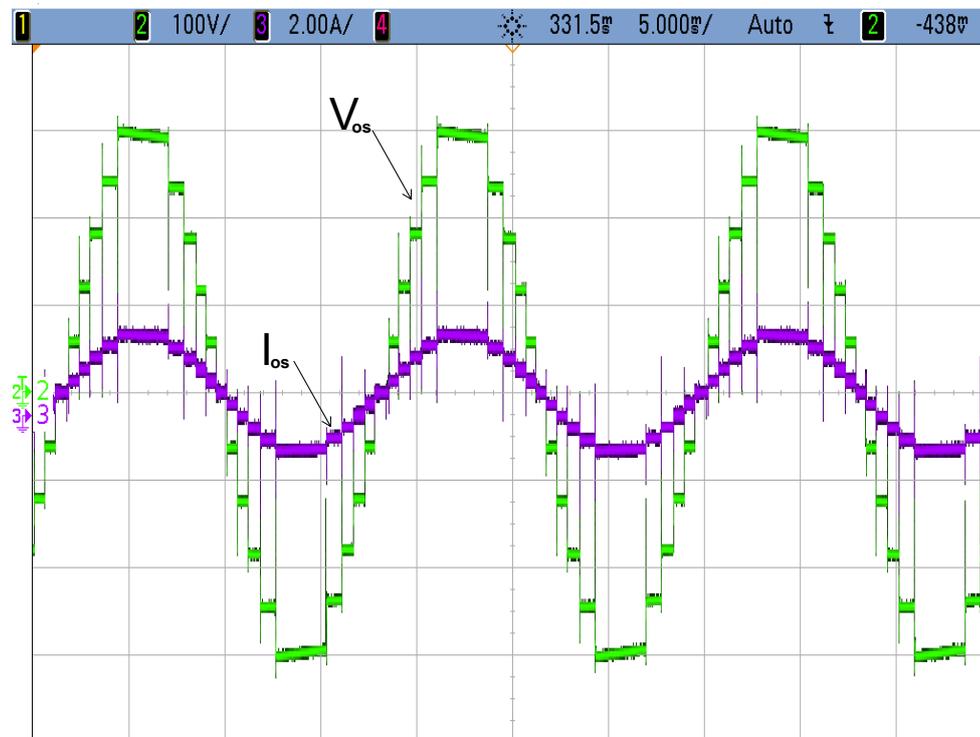
com valor  $\eta=0,92$ . A tensão e a corrente com seus valores médios quadráticos de 220 V e 940 mA. O indutor utilizado foi de valor  $L=19,7$  mH e  $R=90$   $\Omega$ .

Figura 69 – Tensão  $V_{Pri}$  com inversor operando com 7 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

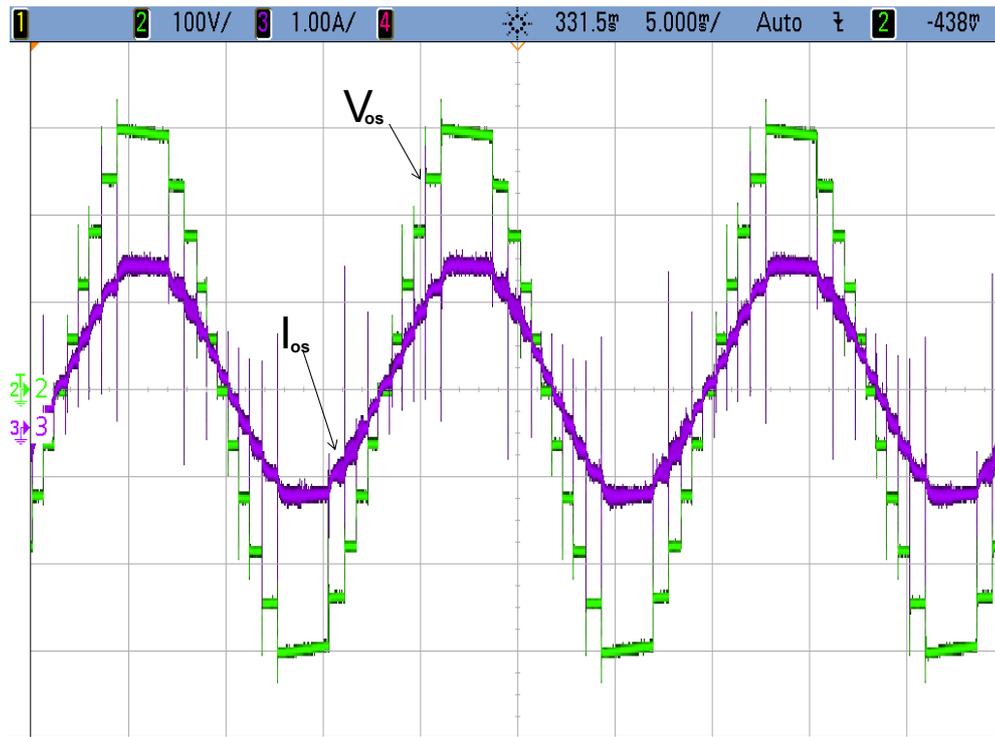
Figura 70 – Tensão  $V_{os}$  e corrente  $I_{os}$  com 11 níveis para  $L=0,8$  mH e  $R=19,3$   $\Omega$ .



Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 72 mostra a tensão  $V_{Pri}$ . A tensão CC na entrada da ponte H foi por volta de 34,7 V. Para a operação com 11 níveis colocou-se os primários em paralelo, diminuindo assim

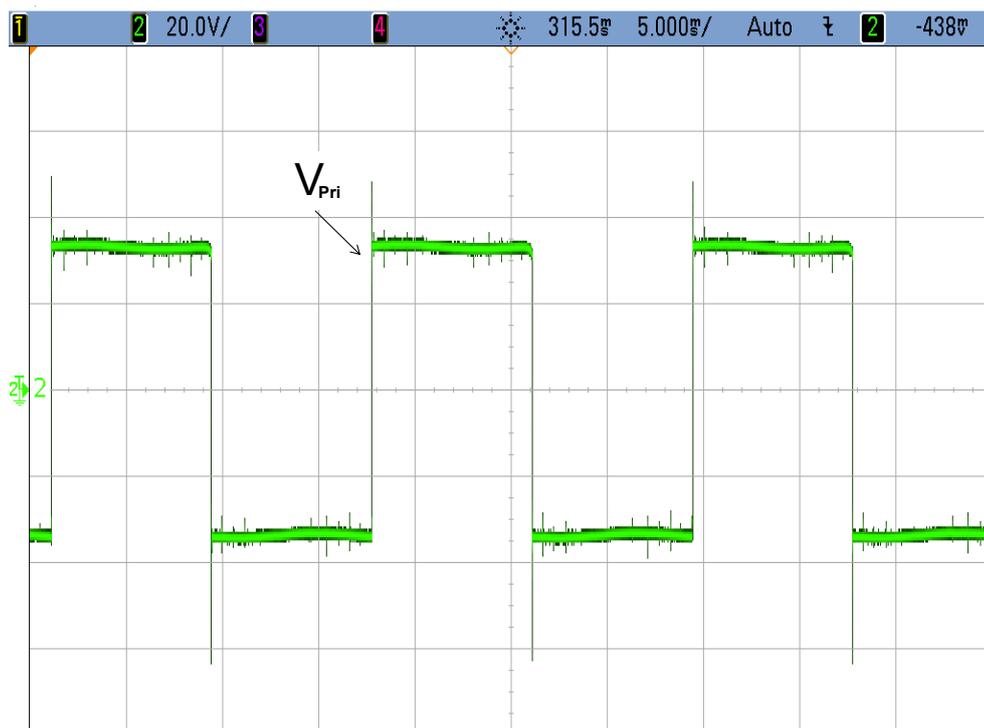
Figura 71 – Tensão  $V_{os}$  e corrente  $I_{os}$  com 11 níveis para  $L=19,7$  mH e  $R=90$   $\Omega$ .



Fonte: Próprio autor (2021).

a tensão de entrada e aumentando a corrente, respeitando o nível máximo de tensão suportada pelas chaves da ponte H.

Figura 72 – Tensão  $V_{Pri}$  para funcionamento do inversor com 11 níveis.

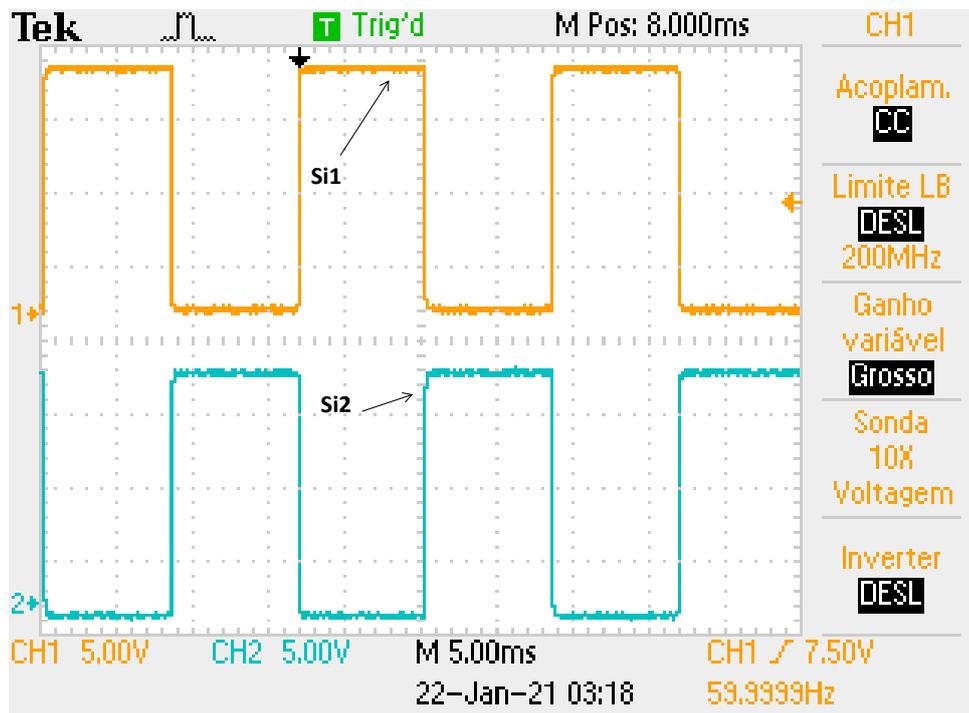


Fonte: Próprio autor (2021).

### 4.1.3 Teste realizado para 15 níveis

As Figuras 73 e 74 mostram os sinais enviados à ponte de entrada para gerar a onda de tensão aplicada no primário do transformador do conversor. Pode-se ver que em 73 o sinal da chave Si2 é complementar de Si1 que opera no semiciclo positivo, na Figura 74 pode ser observado o tempo de transição da ponte H, isto é, desliga-se Si1 e após 2 s Si2 é ativada.

Figura 73 – Sinais aplicados nas chaves Si1 e Si2.

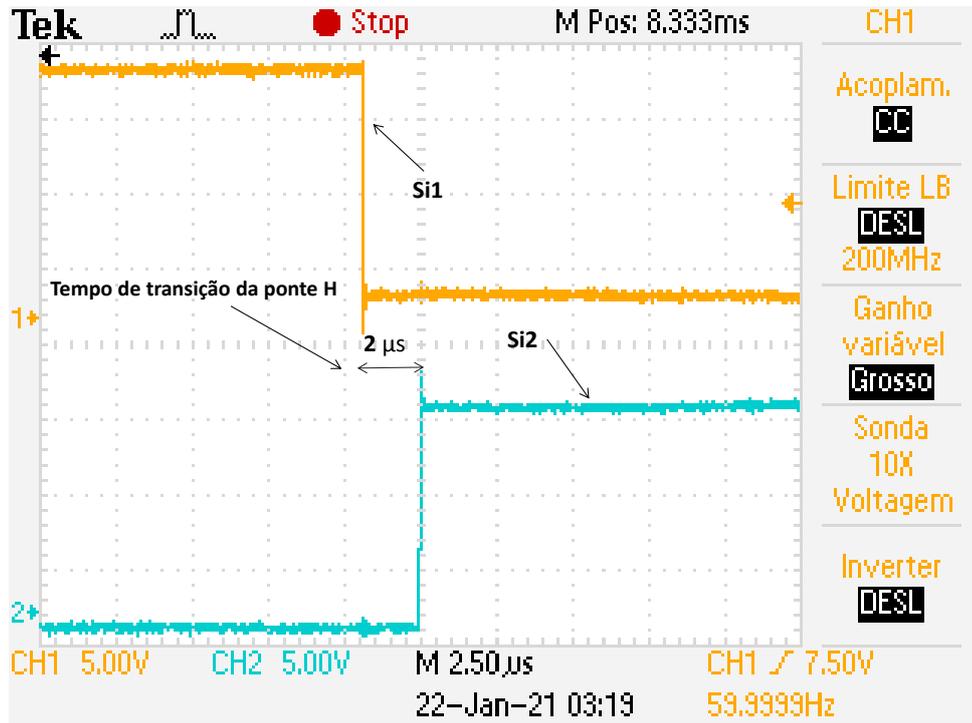


Fonte: Próprio autor (2021).

O tempo de transição foi estabelecido a fim de evitar curto-circuito entre as chaves dos braços da ponte, Si1 e Si4 funcionando juntas e Si2 e Si3 sendo acionadas ao mesmo tempo, para evitar esse problema.

As Figuras 75 a 77 mostram os sinais de gate nas chaves S11a e S13b em 75, S12a e S14a em 76 e S21a S22a em 77. Pode-se ver que os sinais para essas chaves não podem estar acionadas juntas no semiciclo positivo, mas não há problema em serem postas em nível alto ao mesmo tempo quando na outra metade do ciclo da frequência de 60 Hz. Para o caso do semiciclo complementar temos que S11b e S13a, S12b e S14b e S21b e S22b não podem estar ativas simultaneamente, lembrando que isto é para cada célula, ou seja, no módulo em L os interruptores principais de cada braço, para cada semiciclo, não podem ser acionados juntos e pela forma que estão dispostos a corrente não passará pelo seu diodo interno, o motivo deste

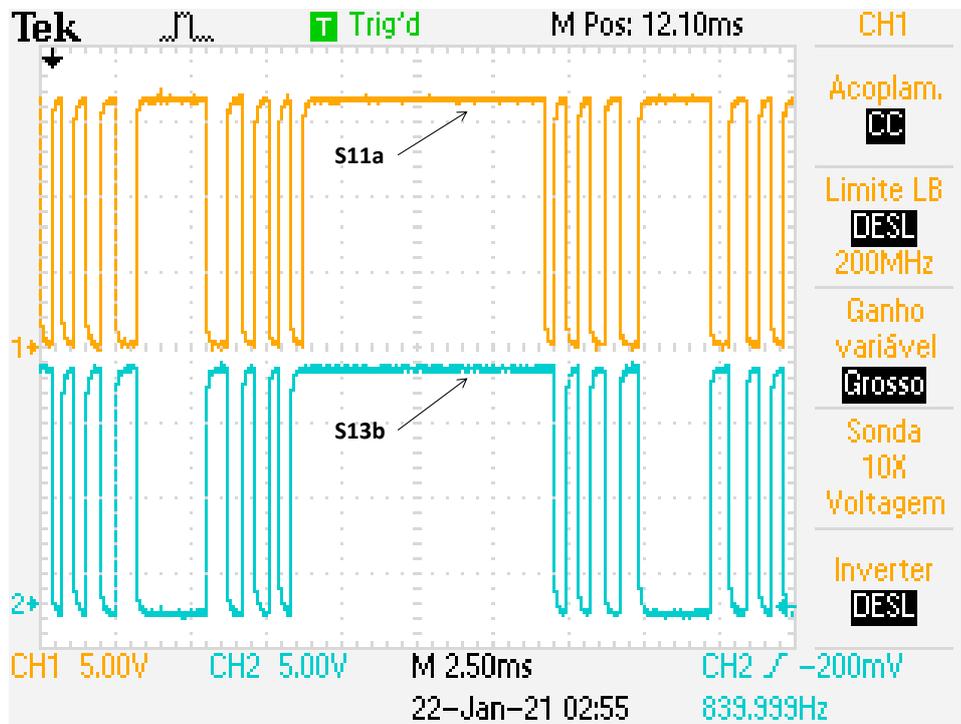
Figura 74 – Tempo de transição para o devido funcionamento da ponte H.



Fonte: Próprio autor (2021).

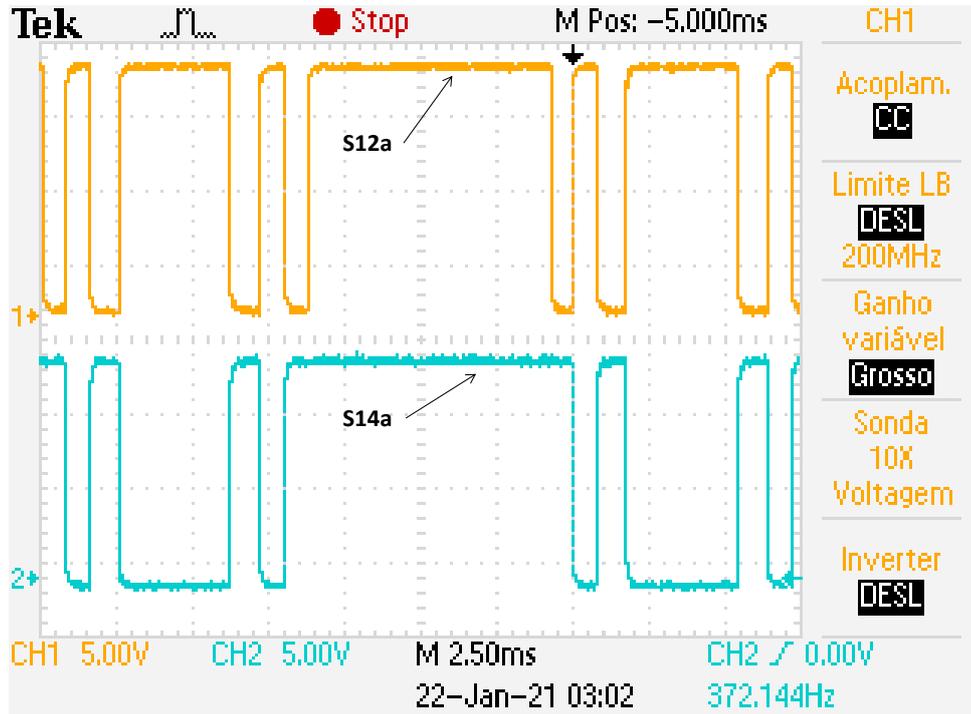
arranjo das chaves é evitar curto-circuito em suas fontes.

Figura 75 – Sinais de gate nas chaves S11a e S13b.



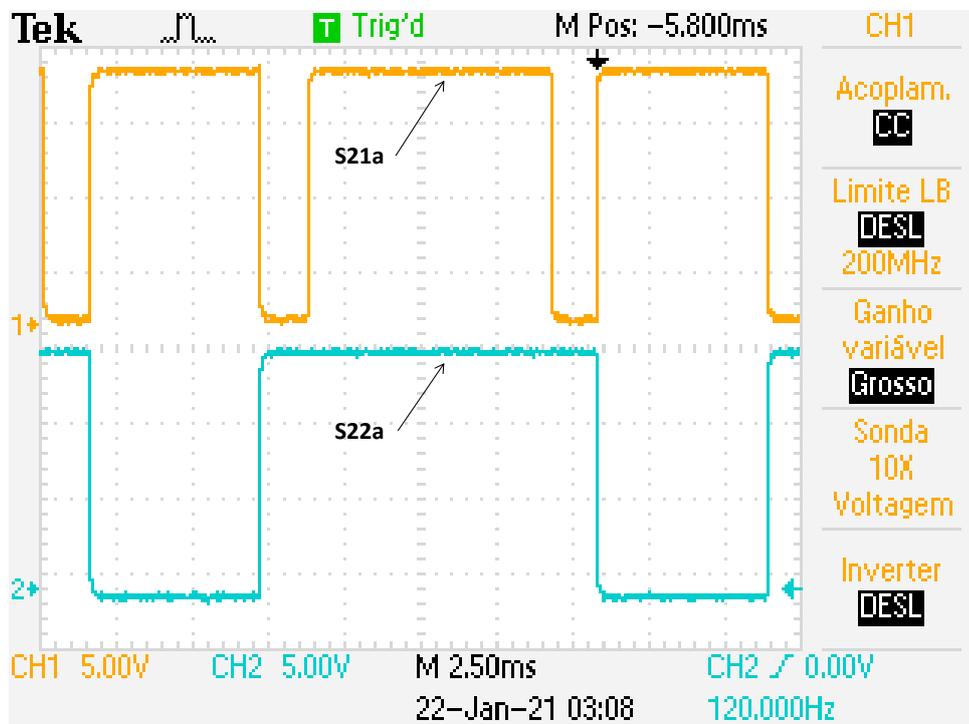
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 76 – Sinais de gate nas chaves S12a e S14a.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 77 – Sinais de gate nas chaves S21a e S22a.

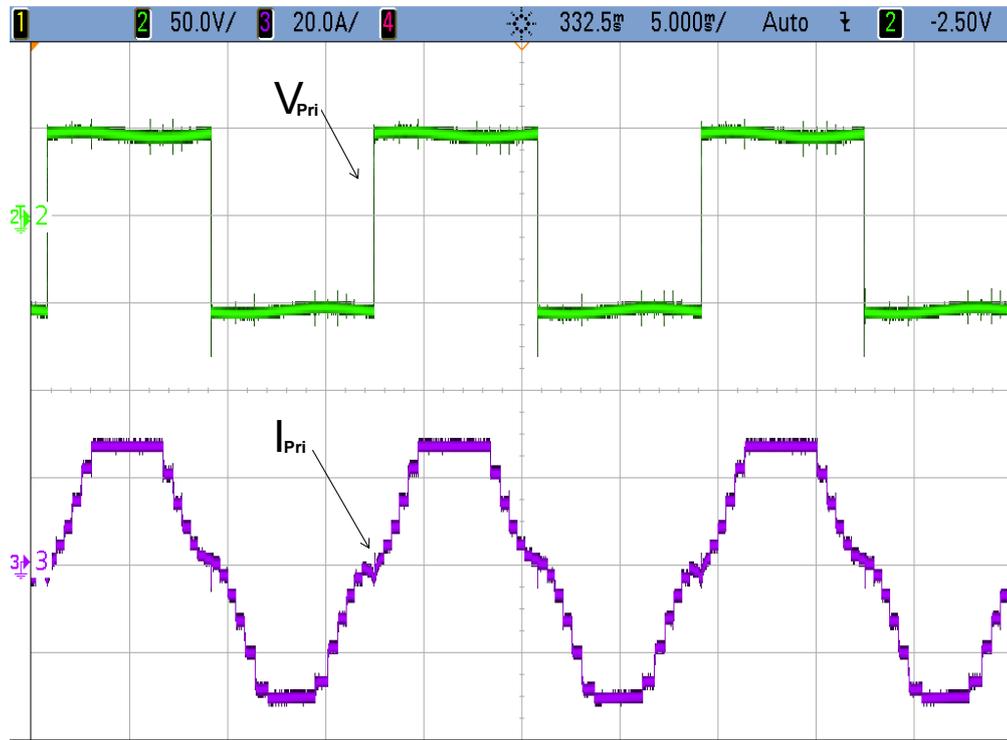


Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 78 mostra a tensão e a corrente do enrolamento primário para teste com carga resistiva. Para a potência utilizada foram necessários cerca de 52,5 V e 20,4 A na entrada

da ponte H.

Figura 78 – Tensão e corrente do enrolamento primário para 15 níveis com carga resistiva.



Fonte: Próprio autor (2021).

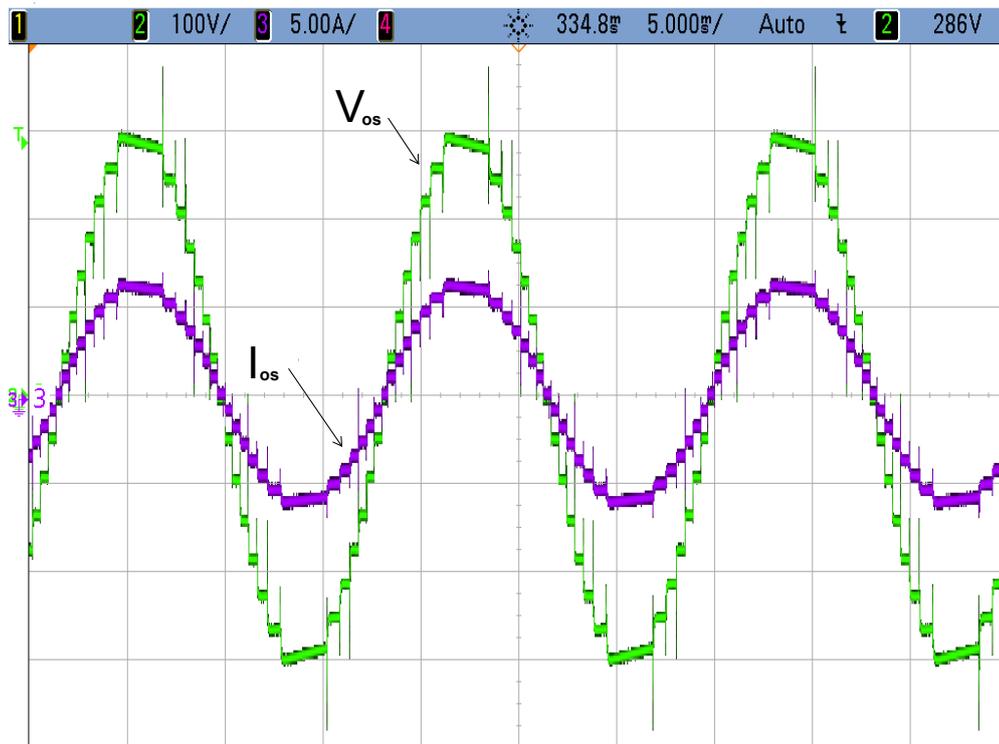
A Figura 79 mostra a tensão e a corrente de saída do ensaio com carga resistiva. A potência  $P_{os}$  aplicada foi cerca de 960 W, tensão de aproximadamente 220 V eficazes, resistência de 98  $\Omega$  e rendimento  $\eta=0,9$ .

A Figura 80 mostra a tensão  $V_{os}$  e a corrente  $I_{os}$  com um filtro indutivo L de aproximadamente igual a 0,8 mH e  $R=97,8 \Omega$ . O fator de potência foi por volta de 0,999, rendimento  $\eta=0,9$  e a potência ativa de 953 W. A tensão e a corrente de saída têm seus valores eficazes de 220 V e 4,32 A, nesta ordem.

A Figura 81 mostra a tensão  $V_{os}$  e a corrente  $I_{os}$  com um filtro indutivo L de valor em torno de 8,95 mH e  $R=74 \Omega$ . O rendimento  $\eta=0,91$  fator de potência cerca de 0,998, e a potência ativa de 802 W na saída. A tensão e a corrente de saída apresentam seus valores eficazes de 220 V e 3,7 A, respectivamente.

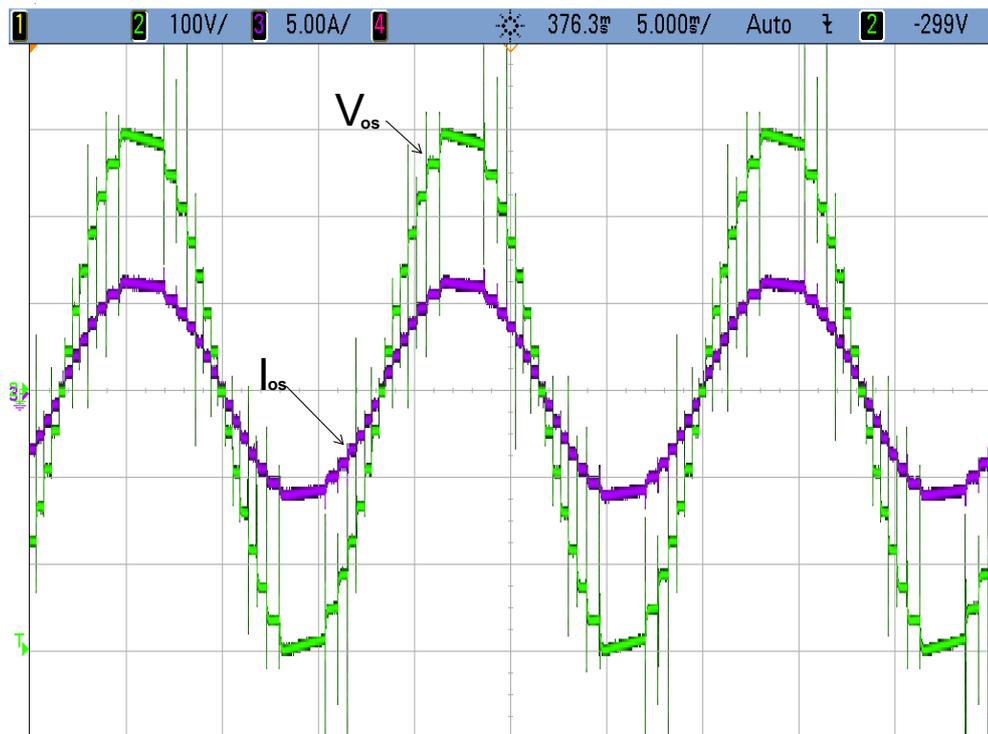
A Figura 82 mostra a tensão  $V_{os}$  e a corrente  $I_{os}$  com um filtro indutivo L de aproximadamente igual a 18,7 mH e R em torno de 35  $\Omega$ , apresentando assim uma corrente com aparência bastante senoidal. O fator de potência foi por volta de 0,98, rendimento  $\eta=0,91$  e a potência ativa de 770 W. A tensão e a corrente de saída têm seus valores eficazes de 220 V e 3,6

Figura 79 – Tensão e corrente de saída para carga resistiva.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 80 – Tensão e corrente de saída com  $L=0,8$  mH e  $R=97,8$   $\Omega$ .

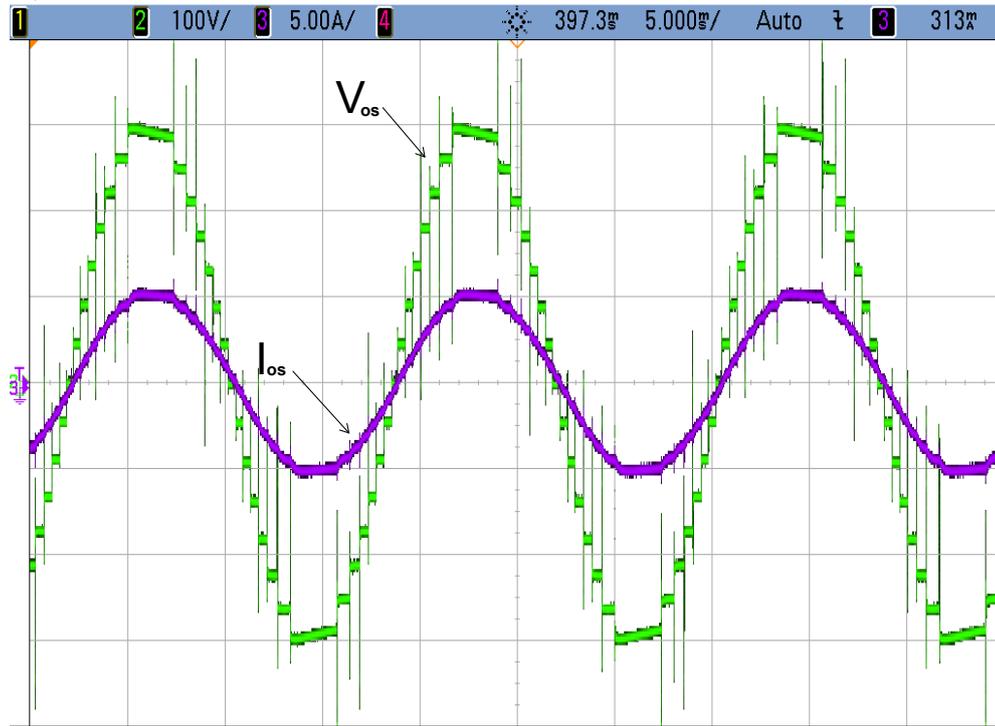


Fonte: Próprio autor (2021).

A, respectivamente.

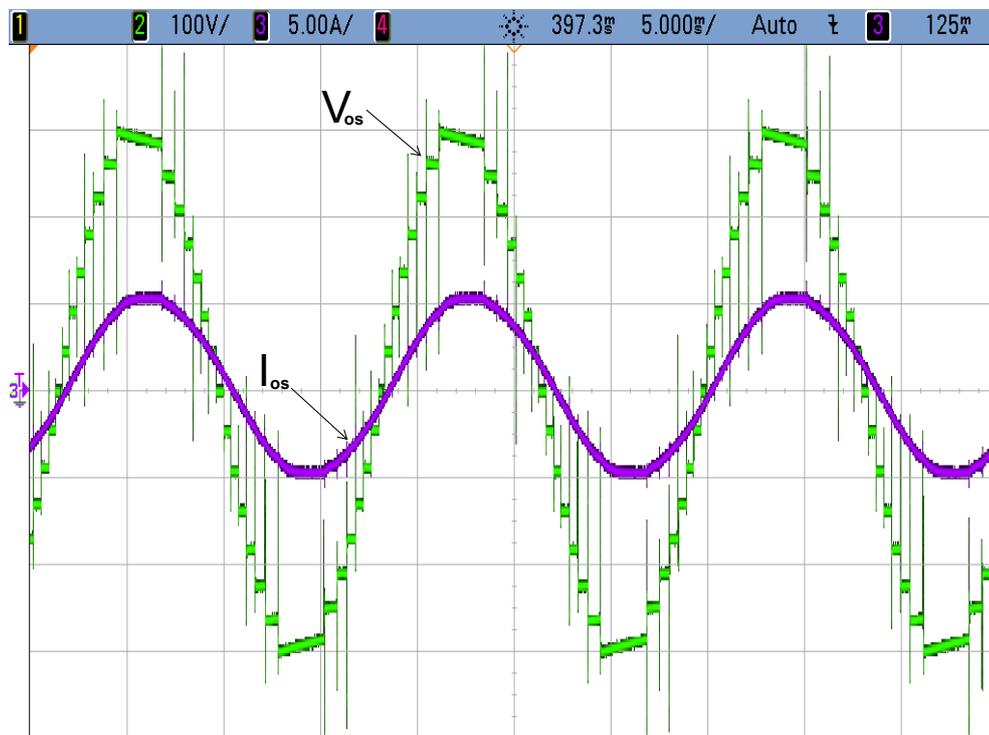
A Figura 83 mostra a tensão  $V_{os}$  e a corrente  $I_{os}$  com um filtro indutivo L de apro-

Figura 81 – Tensão e corrente de saída com  $L=8,95$  mH e  $R=74$   $\Omega$ .



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 82 – Tensão e corrente de saída com  $L=18,7$  mH e  $R=35$   $\Omega$ .

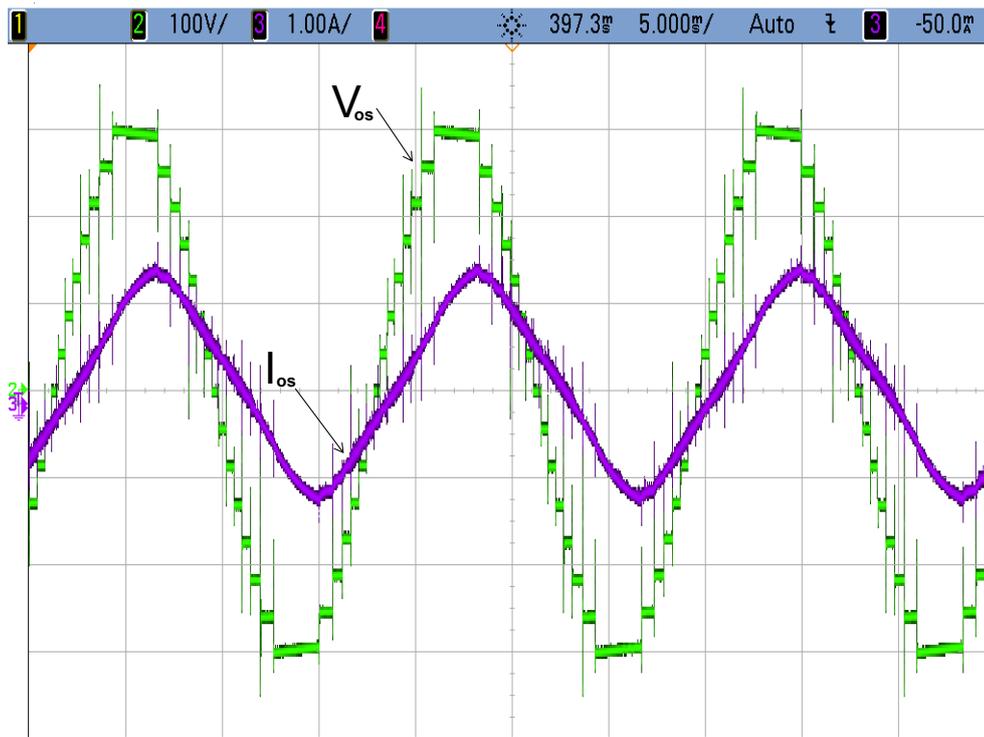


Fonte: Próprio autor (2021).

ximadamente igual a 41,7 mH e R de 18,3  $\Omega$ . A corrente de saída experimenta os efeitos da saturação do transformador, por não estar sendo utilizado controle de aturação, então há um

pouco de saturação no transformador, mas também por conta da saturação no indutor utilizado, deixando a corrente  $I_{os}$  com uma forma triangular. O fator de potencia foi por volta de 0,75,  $\eta=0,83$  e a potencia ativa de 165 W na saída. A tensão  $V_{os}=220$  V eficazes e a corrente de saída têm seu valor médio quadrático 830 mA.

Figura 83 – Tensão e corrente de saída com  $L=41,7$  mH.



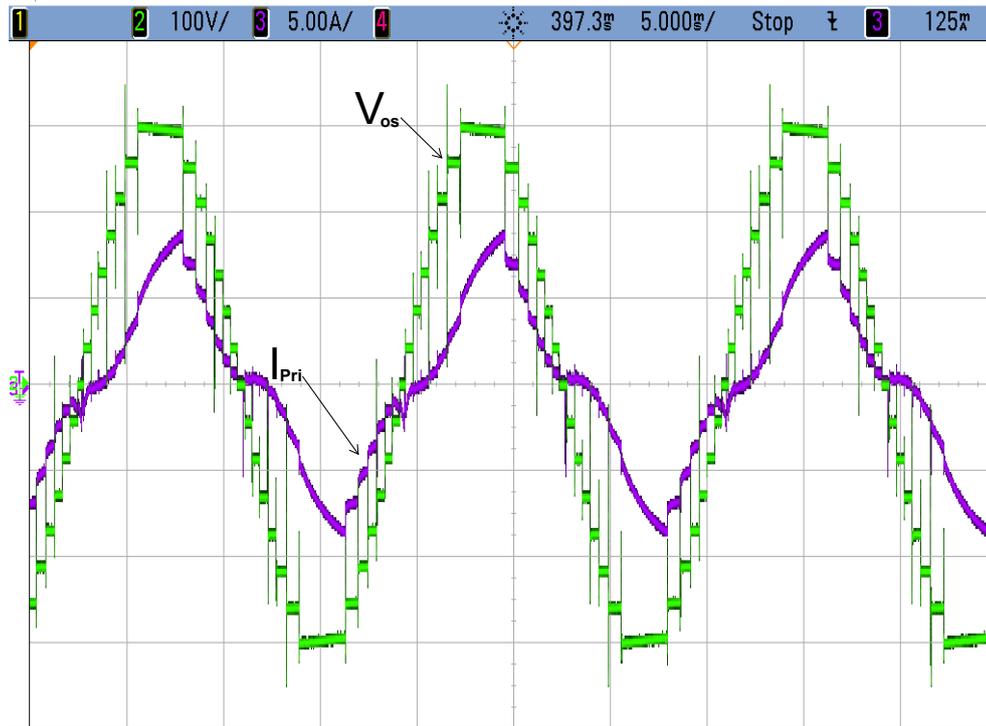
Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 84 mostra a tensão  $V_{os}$  e a corrente  $I_{pri}$  com um filtro indutivo  $L$  de aproximadamente igual a 41,7 mH e  $R=18,3 \Omega$ . Pode-se constatar que a implementação dos estágios de chaveamento do conversor operando com cargas indutivas é apropriado, pois não há spikes ou sobresinais de corrente no primário do transformador como vemos em  $I_{pri}$  abaixo.

A Figura 85 mostra a tensão  $V_{os}$  e a corrente  $I_{os}$  com um filtro indutivo  $L$  em torno de 52,7 mH e  $R= 18 \Omega$ . O fator de potencia foi de aproximadamente 0,67,  $\eta=0,958$  e a potencia ativa de 180 W na saída. A tensão  $V_{os}=220$  V eficazes e a corrente de saída têm seu valor médio quadrático 1.17 A. Percebe-se ainda mais o efeito da saturação, o campo magnético aplicado possivelmente alinhou todos os domínios e não é mais possível aumentar o campo magnético do material do transformador e do indutor. O ângulo entre a corrente e a tensão aumentou e  $I_{os}$  permaneceu com formato triangular.

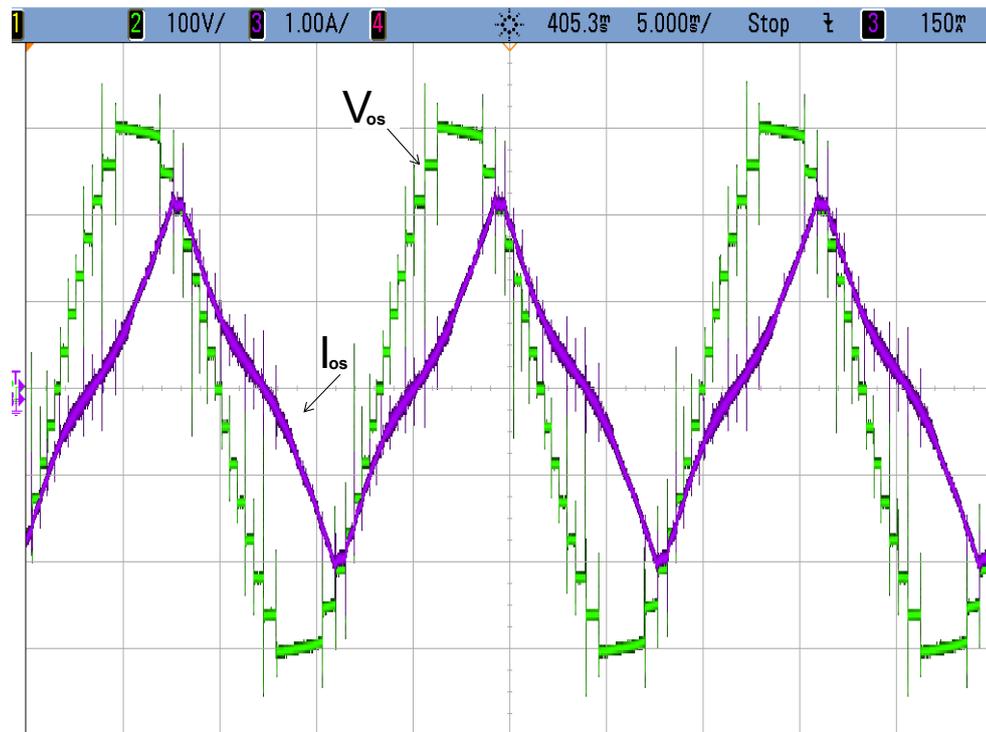
A Figura 86 mostra a tensão do barramento CC. Foi utilizado um barramento de

Figura 84 – Tensão  $V_{os}$  e corrente  $I_{Pri}$  com  $L=41,7$  mH.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 85 – Tensão  $V_{os}$  e corrente  $I_{os}$  com  $L=52,7$  mH.

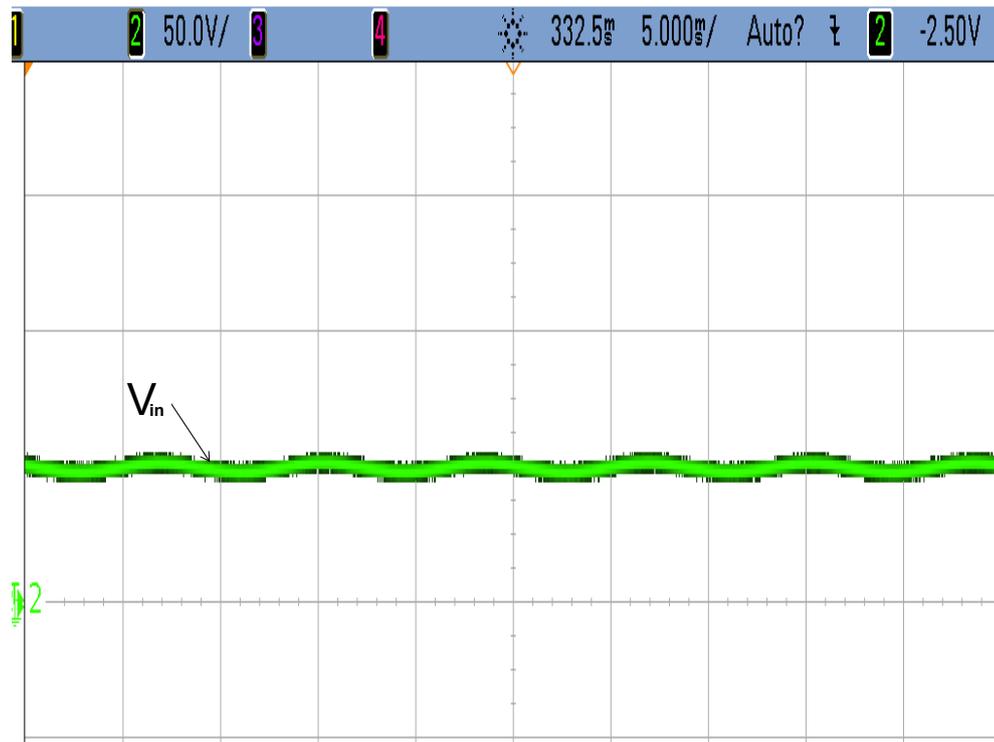


Fonte: Próprio autor (2021).

capacitores de valor  $C=7$  mF a fim de manter a tensão  $V_{in}$  em regime permanente, no entanto, percebe-se que a tensão  $V_{in}$  não está exatamente constante e apresenta uma certa ondulação, isto

reflete-se na tensão de saída que apresenta uma queda em seu pico.

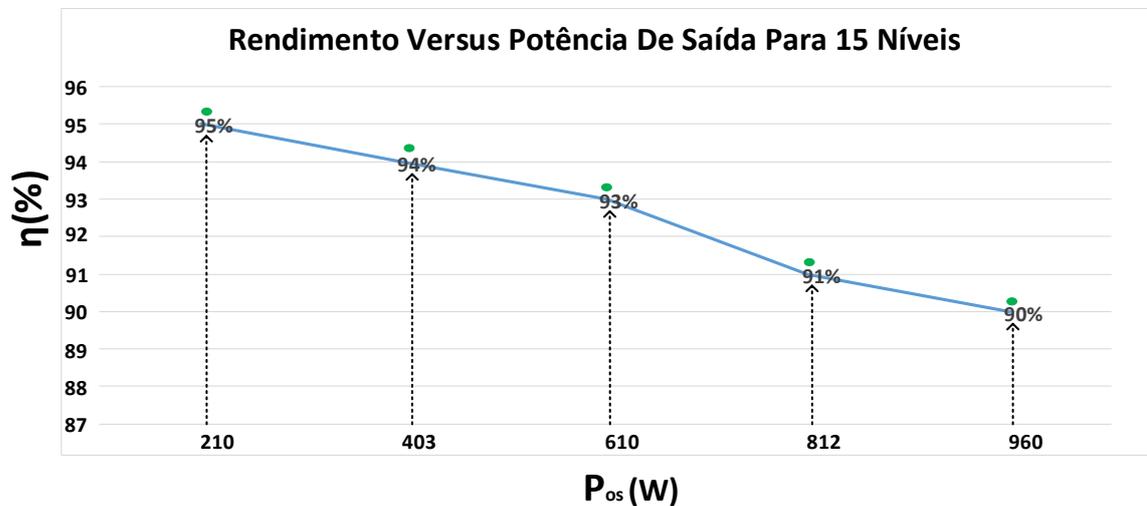
Figura 86 – Tensão no barramento CC.



Fonte: Próprio autor (2021).

A Figura 87 mostra o rendimento prático do inversor funcionando com 15 níveis. A topologia teve  $\eta=95\%$  com 210 W e a medida que a potência foi sendo aumentada, o rendimento foi diminuindo. O teste foi realizado para até 960 W, potência ativa para a qual se registrou um rendimento do inversor de  $\eta=90\%$ .

Figura 87 – Rendimento versus a potência de saída para 15 níveis.



Fonte: Próprio autor (2021).

A Tabela 11 mostra dados apresentados para a configuração com 15 níveis neste capítulo de resultados. As informações mostradas são rendimento, potência ativa, resistência, indutância e fator de potência.

Tabela 11 – Dados de rendimento, resistência, indutância, potência ativa e fator de potência.

<b>Rendimento e Fator de Potência com Carga Resistiva e Indutiva</b>		
Para carga puramente resistiva com 210 W	$\eta=95\%$	FP=1
Para carga puramente resistiva com 403 W	$\eta=94\%$	FP=1
Para carga puramente resistiva com 610 W	$\eta=93\%$	FP=1
Para carga puramente resistiva com 812 W	$\eta=91\%$	FP=1
Para carga puramente resistiva com 960 W	$\eta=90\%$	FP=1
Para carga resistiva e indutiva com 953 W (L=0,8 mH e R=98,7 $\Omega$ )	$\eta=90\%$	FP=0,999
Para carga resistiva e indutiva com 802 W (L=8,95 mH e R=74 $\Omega$ )	$\eta=91\%$	FP=0,998
Para carga resistiva e indutiva com 770 W (L=18,7 mH e R=35 $\Omega$ )	$\eta=91\%$	FP=0,98
Para carga resistiva e indutiva com 165 W (L=41,7 mH e R=18,3 $\Omega$ )	$\eta=83\%$	FP=0,75
Para carga resistiva e indutiva com 180 W (L= 52,7 mH e R=18 $\Omega$ )	$\eta=95,8\%$	FP=0,67

Fonte: Próprio autor (2021).

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as conclusões desta dissertação e sugestões de trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou uma nova topologia de inversor multinível bidirecional. A estrutura contou com um transformador de múltiplos secundários, o que diminuiu o número de fontes de tensão isoladas, dispensou a necessidade de capacitores eletrolíticos, seu estágio CA-CA fez que a presença de pontes de diodo adicionais fossem descartadas e trabalhou com seu primário em 60 Hz.

Os estados de chaveamento foram otimizados de modo que houvesse o mínimo de perdas, além de o conversor poder trabalhar com carga indutiva sem que ocorresse sobressinais ou picos de corrente. A modulação staircase aplicada possibilitou que o inversor funcionasse com baixas perdas por chaveamento, pois a máxima frequência de operação de uma chave foi 480 Hz, além de que as chaves inferiores, chaves da célula de maior potência, funcionaram com frequência máxima de 120 Hz e mínima de 60 Hz. Inferi-se que o inversor implementado é apropriado para operação em sistemas de energia renovável como por exemplo o fotovoltaico, na interligação de sistemas CC-CA e em microrredes, pois apresenta baixas perdas na comutação, e tem a vantagem de ser bidirecional em corrente.

Em relação à distribuição de potência do inversor percebeu-se através de análise que a primeira célula (2L) é responsável por cerca de 40% de  $P_{os}$  e o segundo módulo (L) processa aproximadamente 60% da potência de saída, evidencia-se que isto para a configuração com 15 níveis.

A topologia, que apresenta até 15 níveis na tensão de saída utilizando poucos componentes, quando comparada a conversores multiníveis convencionais, mostra uma baixa taxa de distorção harmônica, isso diminui o tamanho do filtro de saída. A partir dos resultados extraídos nas simulações e em laboratório foi possível concluir que o conversor cumpriu seu papel pretendido de dar uma boa resolução na tensão de saída, operar com perdas reduzidas no chaveamento e trabalhar com uma taxa de distorção harmônica bem pequena, diminuindo assim o filtro de saída. Para 7 a 15 níveis o resultado de DHT foi de 14,55%, 9,5%, 7,83%, 6,19% e 5,37%, considerando todo o espectro harmônico fornecido pelo software utilizado, isto para a

operação do conversor com saída contendo 7, 9, 11, 13 e 15 níveis, respectivamente. Para 50 harmônias tem-se que a DHT para a saída do inversor desde 7 até 15 níveis foi 4,5%, 2,84%, 2,07%, 1,64% e 1,17%, nesta ordem. Foi feita a curva de rendimento prático do inversor para funcionamento com 15 níveis na saída e operação desde 210 W a 960 W. O inversor obteve rendimento  $\eta$  de 95% para 201 W, para 403 W  $\eta$  foi de 94%, e assim foi trabalhada a curva de rendimento para até 960 W, potência esta para a qual o rendimento foi de 90%. Pode-se constatar através da Figura 37 que a corrente do barramento CC  $I_{in}$  para uma carga indutiva composta por um indutor com 300 mH e um resistor com 48  $\Omega$  fez o retorno de energia no sentido carga para a fonte, comprovando, desse modo, que o inversor é bidirecional em corrente. Destaca-se que o teste realizado para comprovação da biirecionalidade do conversor foi feito em simulações e que um dos motivos da não comprovação em laboratório foi a utilização do barramento de capacitores na entrada que impossibilitou a visualização da parte negativa.

Após de terem sido trabalhadas configurações de estados e relações dos pesos das bobinas do transformador desde a saída com 7 até 15 níveis, conclui-se que a melhor configuração para funcionamento do inversor é com 15 níveis, pois as tensões nas chaves nas diversas configurações são bem parecidas, ou seja, o conversor necessitaria de chaves de valores próximos na prática, em algumas configurações e em algumas saídas as chaves da célula L superior, por exemplo seriam submetidas a tensões mais baixas, como no caso das saídas com 13 e 15 níveis, com tensões de 51,8 e 44,5 V de pico, respectivamente. No entanto, as demais chaves, principalmente as da célula de maior potência, teriam valor bem maior, como 155,5 e 178 V de pico para as saídas citadas com 13 e 15 níveis, nesta ordem, o que equivaleria o custo de um arranjo de saída para outro. Operando com 15 níveis também reduz-se significativamente o filtro na saída, para 7 níveis o indutor necessário, considerando o espectro harmônico fornecido pela ferramenta computacional utilizada, seria entre 60 e 65 mH para a corrente ficar em 5 % de DHT, porém para 15 níveis o filtro demandado foi de apenas 0,6 mH.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Com a intenção de possibilitar o seguimento dos estudos relacionados ao trabalho desenvolvido, são sugeridos alguns temas para trabalhos futuros:

1. Estudo e implementação do conversor em malha fechada.
2. Demonstração em laboratório da bidirecionalidade do conversor.
3. Análise das perdas do conversor em comutação e em condução para obtenção do rendi-

mento do conversor.

4. Aplicação de uma modulação híbrida para comparação de desvantagens e benefícios em relação à estratégia de modulação staircase utilizada neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- AKAGI, H. New trends in medium-voltage power converters and motor drives. In: IEEE. **2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. [S. l.], 2011. p. 5–14.
- BROVANOV, S. V.; EGOROV, S. D. Review of ac voltage generation systems based on multilevel converters and photovoltaic cells. In: IEEE. **2013 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices**. [S. l.], 2013. p. 275–278.
- CALAIS, M.; AGELIDIS, V. G. Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview. In: IEEE. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No. 98TH8357)**. [S. l.], 1998. v. 1, p. 224–229.
- DEBNATH, S.; QIN, J.; BAHRANI, B.; SAEEDIFARD, M.; BARBOSA, P. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review. **IEEE transactions on power electronics**, IEEE, v. 30, n. 1, p. 37–53, 2014.
- ENJETI, P. N.; CHOI, S. An approach to realize higher power pwm ac controller. In: IEEE. **Proceedings Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition**. [S. l.], 1993. p. 323–327.
- FRANQUELO, L. G.; RODRIGUEZ, J.; LEON, J. I.; KOURO, S.; PORTILLO, R.; PRATS, M. A. The age of multilevel converters arrives. **IEEE industrial electronics magazine**, IEEE, v. 2, n. 2, p. 28–39, 2008.
- GHAZANFARI, A.; HAMZEH, M.; MOKHTARI, H. A control method for integrating hybrid power source into an islanded microgrid through chb multilevel inverter. In: IEEE. **4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference**. [S. l.], 2013. p. 495–500.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. [S. l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- JANA, P.; CHATTOPADHYAY, S.; BAJPAI, P.; CHAKRABORTY, C. Asymmetrical cascaded multilevel inverter with single dc source using high frequency resonant converter. In: IEEE. **2016 IEEE Students' Technology Symposium (TechSym)**. [S. l.], 2016. p. 73–78.
- KENZELMANN, S.; RUFER, A.; DUJIC, D.; CANALES, F.; NOVAES, Y. R. D. Isolated dc/dc structure based on modular multilevel converter. **IEEE Transactions on power electronics**, IEEE, v. 30, n. 1, p. 89–98, 2014.
- KHOMFOI, S.; TOLBERT, L. M. Multilevel power converters. In: **Power electronics handbook**. [S. l.]: Elsevier, 2011. p. 455–486.
- KHOUCHA, F.; ALES, A.; KHOUDIRI, A.; MAROUANI, K.; BENBOUZID, M.; KHELOUI, A. A 7-level single dc source cascaded h-bridge multilevel inverters control using hybrid modulation. In: IEEE. **The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010**. [S. l.], 2010. p. 1–5.
- KHOUCHA, F.; LAGOUN, S. M.; MAROUANI, K.; KHELOUI, A.; BENBOUZID, M. E. H. Hybrid cascaded h-bridge multilevel-inverter induction-motor-drive direct torque control for

automotive applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 57, n. 3, p. 892–899, 2009.

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**, IEEE, v. 57, n. 8, p. 2553–2580, 2010.

KRISHNA, R. A.; SURESH, L. P. A brief review on multi level inverter topologies. In: IEEE. **2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)**. [S. l.], 2016. p. 1–6.

KRISHNAMOORTHY, H.; ESSAKIAPPAN, S.; ENJETI, P.; BALOG, R.; AHMED, S. A new multilevel converter for megawatt scale solar photovoltaic utility integration. In: IEEE. **2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. [S. l.], 2012. p. 1431–1438.

LI, H.; PENG, F. Z.; LAWLER, J. S. A natural zvs medium-power bidirectional dc-dc converter with minimum number of devices. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 39, n. 2, p. 525–535, 2003.

LIAO, J.; CORZINE, K.; FERDOWSI, M. A new control method for single-dc-source cascaded h-bridge multilevel converters using phase-shift modulation. In: IEEE. **2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition**. [S. l.], 2008. p. 886–890.

LUND, R.; MANJREKAR, M. D.; STEIMER, P.; LIPO, T. A. Control strategies for a hybrid seven-level inverter. In: **Proceedings of the European Power Electronic Conference**. [S. l.: s. n.], 1999.

MANJREKAR, M. D.; LIPO, T. A. A hybrid multilevel inverter topology for drive applications. In: IEEE. **APEC'98 Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition**. [S. l.], 1998. v. 2, p. 523–529.

MANJREKAR, M. D.; STEIMER, P. K.; LIPO, T. A. Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications. **IEEE transactions on industry applications**, IEEE, v. 36, n. 3, p. 834–841, 2000.

MESQUITA, S. J. d. Nova família de inversores multiníveis assimétricos com estágio ca-ca e com reduzido número de componentes em condução. 2016.

OH, J.-s.; JIN, S.-H.; LEE, J.-H. Fast space vector modulation without ntv identification for multilevel inverters. In: IEEE. **2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**. [S. l.], 2007. p. 2415–2420.

PEREZ, M. A.; RODRIGUEZ, J.; FUENTES, E. J.; KAMMERER, F. Predictive control of ac–ac modular multilevel converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 59, n. 7, p. 2832–2839, 2011.

RECH, C.; GRÜNDLING, H. A.; HEY, H. L.; PINHEIRO, H.; PINHEIRO, J. R. Uma metodologia de projeto generalizada para inversores multiníveis híbridos. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 15, n. 2, p. 190–201, 2004.

RODRIGUEZ, J.; LAI, J.-S.; PENG, F. Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. **IEEE Transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 49, n. 4, p. 724–738, 2002.

SALEHAHARI, S.; BABAEI, E. A new hybrid multilevel inverter based on coupled-inductor and cascaded h-bridge. In: IEEE. **2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**. [S. l.], 2016. p. 1–6.

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

SNEINEH, A. A.; WANG, M.-y.; TIAN, K. A hybrid capacitor-clamp cascade multilevel converter. In: IEEE. **IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics**. [S. l.], 2006. p. 2031–2036.

SOLAS, E.; ABAD, G.; BARRENA, J. A.; AURTENETXEA, S.; CARCAR, A.; ZAJĄC, L. Modular multilevel converter with different submodule concepts—part i: Capacitor voltage balancing method. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 60, n. 10, p. 4525–4535, 2012.

SON, G. T.; LEE, H.-J.; NAM, T. S.; CHUNG, Y.-H.; LEE, U.-H.; BAEK, S.-T.; HUR, K.; PARK, J.-W. Design and control of a modular multilevel hvdc converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 27, n. 3, p. 1611–1619, 2012.

SONG, S. G.; KANG, F. S.; PARK, S.-J. Cascaded multilevel inverter employing three-phase transformers and single dc input. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 56, n. 6, p. 2005–2014, 2009.

THITICHAIWORAKORN, N.; HAGIWARA, M.; AKAGI, H. Experimental verification of a modular multilevel cascade inverter based on double-star bridge cells. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 50, n. 1, p. 509–519, 2013.

THORBORG, K.; NYSTROM, A. Staircase pwm: an uncomplicated and efficient modulation technique for ac motor drives. **IEEE transactions on power electronics**, IEEE, v. 3, n. 4, p. 391–398, 1988.

VATANI, M.; BAHRANI, B.; SAEEDIFARD, M.; HOVD, M. Indirect finite control set model predictive control of modular multilevel converters. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 6, n. 3, p. 1520–1529, 2014.

WANG, K.; LEE, F. C.; LAI, J. Bi-directional full-bridge dc/dc converter with unified soft-switching scheme, part i: principles of operation. In: **Proceedings of VPEC Annual Seminar**. [S. l.: s. n.], 1998. p. 143–149.

XUE, Y.; DIVYA, K. C.; GRIEPENTROG, G.; LIVIU, M.; SURESH, S.; MANJREKAR, M. Towards next generation photovoltaic inverters. In: IEEE. **2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. [S. l.], 2011. p. 2467–2474.

YANHONG, Z.; KAZUYA, O.; OI, K. A high efficiency hybrid 7-level inverter with single dc source. In: IEEE. **2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA)**. [S. l.], 2014. p. 452–457.

**APÊNDICE A – CÓDIGO EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO VHDL  
DESENVOLVIDO NO FPGA EP4CE22F17C6N**

```

1
2 -----
3
4
5 library ieee;
6
7 use ieee.std_logic_1164.all;
8 use ieee.std_logic_unsigned.all;
9 use ieee.std_logic_arith.all;
10 entity anderson15pni is port (
11     chave, reset, clk50: in std_logic;
12     s1, s2, s3, s4, s13a, s13b, s11a, s11b, s12a, s12b, s14a, s14b, s21a, s21b, s22a,
13     s22b: out std_logic
14 );
15 end anderson15pni;
16
17 architecture hardware of anderson15pni is
18     signal contador_c15 : integer range 0 to 833333:= 0;
19     begin
20     process_c15 : process (reset, chave, clk50)
21     begin
22     if (reset = '0') then
23     contador_c15 <= 0;
24     s1 <= '0';
25     s2 <= '0';
26     s3 <= '0';
27     s4 <= '0';
28     s13a <= '0';
29     s13b <= '0';
30     s11a <= '0';
31     s11b <= '0';
32     s12a <= '0';
33     s12b <= '0';
34     s14a <= '0';
35     s14b <= '0';
36     s21a <= '0';
37     s21b <= '0';
38     s22a <= '0';
39     s22b <= '0';
40     elsif (clk50'event and clk50 = '1') then
41     if (chave = '1') then
42     contador_c15 <= contador_c15 + 1;
43     if (contador_c15 > 833333) then
44     contador_c15 <= 0;
45     elsif (contador_c15 <= 416566) then
46     s1 <= '1';
47     s3 <= '1';
48     s2 <= '0';
49     s4 <= '0';
50     elsif (contador_c15 <=416666) then
51     s1 <= '0';
52     s3 <= '0';
53     s2 <= '0';
54     s4 <= '0';
55     elsif (contador_c15 <= 833233) then
56     s1 <= '0';
57     s3 <= '0';
58     s2 <= '1';
59     s4 <= '1';
60     else
61     s1 <= '0';
62     s3 <= '0';
63     s2 <= '0';
64     s4 <= '0';

```

```
64 end if;
65 if (contador_c15 > 833333) then
66 contador_c15 <= 0;
67 end if;
68
69 ----- parte secundária
70 --/S13aS13b S11aS11b S12aS12b S14aS164 S21aS21b S22aS22b
71 if (contador_c15 <= 3700) then
72
73 s13a <= '1';
74 s13b <= '1';
75 s11a <= '0';
76 s11b <= '1';
77 s12a <= '0';
78 s12b <= '1';
79 s14a <= '1';
80 s14b <= '1';
81 s21a <= '0';
82 s21b <= '1';
83 s22a <= '1';
84 s22b <= '1';
85
86 elsif (contador_c15 <= 3800) then
87
88 s13a <= '1';
89 s13b <= '1';
90 s11a <= '0';
91 s11b <= '1';
92 s12a <= '0';
93 s12b <= '1';
94 s14a <= '1';
95 s14b <= '1';
96 s21a <= '0';
97 s21b <= '1';
98 s22a <= '1';
99 s22b <= '1';
100
101 elsif (contador_c15 <= 22751) then
102 s13a <= '1';
103 s13b <= '0';
104 s11a <= '1';
105 s11b <= '1';
106 s12a <= '0';
107 s12b <= '1';
108 s14a <= '1';
109 s14b <= '1';
110 s21a <= '0';
111 s21b <= '1';
112 s22a <= '1';
113 s22b <= '1';
114
115 elsif (contador_c15 <= 22851) then
116 s13a <= '1';
117 s13b <= '0';
118 s11a <= '1';
119 s11b <= '1';
120 s12a <= '0';
121 s12b <= '1';
122 s14a <= '0';
123 s14b <= '1';
124 s21a <= '0';
125 s21b <= '1';
126 s22a <= '1';
127 s22b <= '1';
```

```
128 elsif (contador_c15 <= 42302) then--2
129 s13a <= '1';
130 s13b <= '1';
131 s11a <= '0';
132 s11b <= '1';
133 s12a <= '1';
134 s12b <= '1';
135 s14a <= '0';
136 s14b <= '1';
137 s21a <= '0';
138 s21b <= '1';
139 s22a <= '1';
140 s22b <= '1';
141
142 elsif (contador_c15 <= 42402) then--2t
143 s13a <= '1';
144 s13b <= '0';
145 s11a <= '0';
146 s11b <= '1';
147 s12a <= '1';
148 s12b <= '1';
149 s14a <= '0';
150 s14b <= '1';
151 s21a <= '0';
152 s21b <= '1';
153 s22a <= '1';
154 s22b <= '1';
155 elsif (contador_c15 <= 62902) then --3
156 s13a <= '1';
157 s13b <= '0';
158 s11a <= '1';
159 s11b <= '1';
160 s12a <= '1';
161 s12b <= '1';
162 s14a <= '0';
163 s14b <= '1';
164 s21a <= '0';
165 s21b <= '1';
166 s22a <= '1';
167 s22b <= '1';
168
169 elsif (contador_c15 <= 63002) then --3t
170 s13a <= '1';
171 s13b <= '0';
172 s11a <= '1';
173 s11b <= '1';
174 s12a <= '1';
175 s12b <= '1';
176 s14a <= '0';
177 s14b <= '1';
178 s21a <= '0';
179 s21b <= '1';
180 s22a <= '0';
181 s22b <= '1';
182 elsif (contador_c15 <= 85253) then --4
183 s13a <= '1';
184 s13b <= '1';
185 s11a <= '0';
186 s11b <= '1';
187 s12a <= '0';
188 s12b <= '1';
189 s14a <= '1';
190 s14b <= '1';
191 s21a <= '1';
```

```
192 s21b <= '1';
193 s22a <= '0';
194 s22b <= '1';
195 elsif (contador_c15 <= 85353) then --4t
196 s13a <= '1';
197 s13b <= '0';
198 s11a <= '0';
199 s11b <= '1';
200 s12a <= '0';
201 s12b <= '1';
202 s14a <= '1';
203 s14b <= '1';
204 s21a <= '1';
205 s21b <= '1';
206 s22a <= '0';
207 s22b <= '1';
208 elsif (contador_c15 <= 111004) then --5
209 s13a <= '1';
210 s13b <= '0';
211 s11a <= '1';
212 s11b <= '1';
213 s12a <= '0';
214 s12b <= '1';
215 s14a <= '1';
216 s14b <= '1';
217 s21a <= '1';
218 s21b <= '1';
219 s22a <= '0';
220 s22b <= '1';
221 elsif (contador_c15 <= 111104) then --5t
222 s13a <= '1';
223 s13b <= '0';
224 s11a <= '1';
225 s11b <= '1';
226 s12a <= '0';
227 s12b <= '1';
228 s14a <= '0';
229 s14b <= '1';
230 s21a <= '1';
231 s21b <= '1';
232 s22a <= '0';
233 s22b <= '1';
234 elsif (contador_c15 <= 144256) then --6
235 s13a <= '1';
236 s13b <= '1';
237 s11a <= '0';
238 s11b <= '1';
239 s12a <= '1';
240 s12b <= '1';
241 s14a <= '0';
242 s14b <= '1';
243 s21a <= '1';
244 s21b <= '1';
245 s22a <= '0';
246 s22b <= '1';
247 elsif (contador_c15 <= 144356) then --6t
248 s13a <= '1';
249 s13b <= '0';
250 s11a <= '0';
251 s11b <= '1';
252 s12a <= '1';
253 s12b <= '1';
254 s14a <= '0';
255 s14b <= '1';
```

```
256 s21a <= '1';
257 s21b <= '1';
258 s22a <= '0';
259 s22b <= '1';
260
261 elsif (contador_c15 <= 261260) then --7
262 s13a <= '1';
263 s13b <= '0';
264 s11a <= '1';
265 s11b <= '1';
266 s12a <= '1';
267 s12b <= '1';
268 s14a <= '0';
269 s14b <= '1';
270 s21a <= '1';
271 s21b <= '1';
272 s22a <= '0';
273 s22b <= '1';
274 elsif (contador_c15 <= 261360) then --7t
275
276 s13a <= '1';
277 s13b <= '0';
278 s11a <= '1';
279 s11b <= '1';
280 s12a <= '1';
281 s12b <= '1';
282 s14a <= '0';
283 s14b <= '1';
284 s21a <= '1';
285 s21b <= '1';
286 s22a <= '0';
287 s22b <= '1';
288
289 elsif (contador_c15 <= 294512) then --6
290 s13a <= '1';
291 s13b <= '1';
292 s11a <= '0';
293 s11b <= '1';
294 s12a <= '1';
295 s12b <= '1';
296 s14a <= '0';
297 s14b <= '1';
298 s21a <= '1';
299 s21b <= '1';
300 s22a <= '0';
301 s22b <= '1';
302
303 elsif (contador_c15 <= 294612) then --6t
304 s13a <= '1';
305 s13b <= '0';
306 s11a <= '0';
307 s11b <= '1';
308 s12a <= '1';
309 s12b <= '1';
310 s14a <= '0';
311 s14b <= '1';
312 s21a <= '1';
313 s21b <= '1';
314 s22a <= '0';
315 s22b <= '1';
316 elsif (contador_c15 <= 320263) then --5
317 s13a <= '1';
318 s13b <= '0';
319 s11a <= '1';
```

```
320 s11b <= '1';
321 s12a <= '0';
322 s12b <= '1';
323 s14a <= '1';
324 s14b <= '1';
325 s21a <= '1';
326 s21b <= '1';
327 s22a <= '0';
328 s22b <= '1';
329 elsif (contador_c15 <= 320363) then --5t
330 s13a <= '1';
331 s13b <= '0';
332 s11a <= '1';
333 s11b <= '1';
334 s12a <= '0';
335 s12b <= '1';
336 s14a <= '1';
337 s14b <= '1';
338 s21a <= '1';
339 s21b <= '1';
340 s22a <= '0';
341 s22b <= '1';
342
343 elsif (contador_c15 <= 342614) then --4
344 s13a <= '1';
345 s13b <= '1';
346 s11a <= '0';
347 s11b <= '1';
348 s12a <= '0';
349 s12b <= '1';
350 s14a <= '1';
351 s14b <= '1';
352 s21a <= '1';
353 s21b <= '1';
354 s22a <= '0';
355 s22b <= '1';
356 elsif (contador_c15 <= 342714) then --4t
357 s13a <= '1';
358 s13b <= '0';
359 s11a <= '0';
360 s11b <= '1';
361 s12a <= '0';
362 s12b <= '1';
363 s14a <= '0';
364 s14b <= '1';
365 s21a <= '1';
366 s21b <= '1';
367 s22a <= '0';
368 s22b <= '1';
369
370 elsif (contador_c15 <= 363214) then --3
371 s13a <= '1';
372 s13b <= '0';
373 s11a <= '1';
374 s11b <= '1';
375 s12a <= '1';
376 s12b <= '1';
377 s14a <= '0';
378 s14b <= '1';
379 s21a <= '0';
380 s21b <= '1';
381 s22a <= '1';
382 s22b <= '1';
383 elsif (contador_c15 <= 363314) then --3t
```

```
384 s13a <= '1';
385 s13b <= '0';
386 s11a <= '1';
387 s11b <= '1';
388 s12a <= '1';
389 s12b <= '1';
390 s14a <= '0';
391 s14b <= '1';
392 s21a <= '0';
393 s21b <= '1';
394 s22a <= '1';
395 s22b <= '1';
396 elsif (contador_c15 <= 382765) then --2
397 s13a <= '1';
398 s13b <= '1';
399 s11a <= '0';
400 s11b <= '1';
401 s12a <= '1';
402 s12b <= '1';
403 s14a <= '0';
404 s14b <= '1';
405 s21a <= '0';
406 s21b <= '1';
407 s22a <= '1';
408 s22b <= '1';
409
410 elsif (contador_c15 <= 382865) then --2t
411 s13a <= '1';
412 s13b <= '0';
413 s11a <= '0';
414 s11b <= '1';
415 s12a <= '1';
416 s12b <= '1';
417 s14a <= '0';
418 s14b <= '1';
419 s21a <= '0';
420 s21b <= '1';
421 s22a <= '1';
422 s22b <= '1';
423 elsif (contador_c15 <= 401816) then --1
424 s13a <= '1';
425 s13b <= '0';
426 s11a <= '1';
427 s11b <= '1';
428 s12a <= '0';
429 s12b <= '1';
430 s14a <= '1';
431 s14b <= '1';
432 s21a <= '0';
433 s21b <= '1';
434 s22a <= '1';
435 s22b <= '1';
436 elsif (contador_c15 <= 401916) then -- 1t
437 s13a <= '1';
438 s13b <= '0';
439 s11a <= '1';
440 s11b <= '1';
441 s12a <= '0';
442 s12b <= '0';
443 s14a <= '1';
444 s14b <= '1';
445 s21a <= '0';
446 s21b <= '0';
447 s22a <= '1';
```

```
448 s22b <= '1';
449 elsif (contador_c15 <= 420867) then --0
450 s13a <= '1';
451 s13b <= '1';
452 s11a <= '0';
453 s11b <= '0';
454 s12a <= '0';
455 s12b <= '0';
456 s14a <= '1';
457 s14b <= '1';
458 s21a <= '0';
459 s21b <= '0';
460 s22a <= '1';
461 s22b <= '1';
462
463 elsif (contador_c15 <= 420967) then --0t
464 s13a <= '1';
465 s13b <= '1';
466 s11a <= '0';
467 s11b <= '0';
468 s12a <= '0';
469 s12b <= '0';
470 s14a <= '1';
471 s14b <= '1';
472 s21a <= '0';
473 s21b <= '0';
474 s22a <= '1';
475 s22b <= '1';
476 elsif (contador_c15 <= 439917) then --1
477 s13a <= '0';
478 s13b <= '1';
479 s11a <= '1';
480 s11b <= '1';
481 s12a <= '1';
482 s12b <= '0';
483 s14a <= '1';
484 s14b <= '1';
485 s21a <= '1';
486 s21b <= '0';
487 s22a <= '1';
488 s22b <= '1';
489 elsif (contador_c15 <= 440017) then --1t
490 s13a <= '0';
491 s13b <= '1';
492 s11a <= '1';
493 s11b <= '1';
494 s12a <= '1';
495 s12b <= '0';
496 s14a <= '1';
497 s14b <= '0';
498 s21a <= '1';
499 s21b <= '0';
500 s22a <= '1';
501 s22b <= '1';
502
503 elsif (contador_c15 <= 459468) then --2
504 s13a <= '1';
505 s13b <= '1';
506 s11a <= '1';
507 s11b <= '0';
508 s12a <= '1';
509 s12b <= '1';
510 s14a <= '1';
511 s14b <= '0';
```

```
512 s21a <= '1';
513 s21b <= '0';
514 s22a <= '1';
515 s22b <= '1';
516
517 elsif (contador_c15 <= 459568) then --2t
518 s13a <= '0';
519 s13b <= '1';
520 s11a <= '1';
521 s11b <= '0';
522 s12a <= '1';
523 s12b <= '1';
524 s14a <= '1';
525 s14b <= '0';
526 s21a <= '1';
527 s21b <= '0';
528 s22a <= '1';
529 s22b <= '1';
530
531 elsif (contador_c15 <= 480069) then --3
532 s13a <= '0';
533 s13b <= '1';
534 s11a <= '1';
535 s11b <= '1';
536 s12a <= '1';
537 s12b <= '1';
538 s14a <= '1';
539 s14b <= '0';
540 s21a <= '1';
541 s21b <= '0';
542 s22a <= '1';
543 s22b <= '1';
544 elsif (contador_c15 <= 480169) then --3t
545 s13a <= '0';
546 s13b <= '1';
547 s11a <= '1';
548 s11b <= '1';
549 s12a <= '1';
550 s12b <= '1';
551 s14a <= '1';
552 s14b <= '0';
553 s21a <= '1';
554 s21b <= '0';
555 s22a <= '1';
556 s22b <= '0';
557
558 elsif (contador_c15 <= 502420) then --4
559 s13a <= '1';
560 s13b <= '1';
561 s11a <= '1';
562 s11b <= '0';
563 s12a <= '1';
564 s12b <= '0';
565 s14a <= '1';
566 s14b <= '1';
567 s21a <= '1';
568 s21b <= '1';
569 s22a <= '1';
570 s22b <= '0';
571
572 elsif (contador_c15 <= 502520) then --4t
573 s13a <= '0';
574 s13b <= '1';
575 s11a <= '1';
```

```
576 s11b <= '0';
577 s12a <= '1';
578 s12b <= '0';
579 s14a <= '1';
580 s14b <= '1';
581 s21a <= '1';
582 s21b <= '1';
583 s22a <= '1';
584 s22b <= '0';
585
586 elsif (contador_c15 <= 528171) then --5
587 s13a <= '0';
588 s13b <= '1';
589 s11a <= '1';
590 s11b <= '1';
591 s12a <= '1';
592 s12b <= '0';
593 s14a <= '1';
594 s14b <= '1';
595 s21a <= '1';
596 s21b <= '1';
597 s22a <= '1';
598 s22b <= '0';
599
600 elsif (contador_c15 <= 528271) then --5t
601 s13a <= '0';
602 s13b <= '1';
603 s11a <= '1';
604 s11b <= '1';
605 s12a <= '1';
606 s12b <= '0';
607 s14a <= '1';
608 s14b <= '0';
609 s21a <= '1';
610 s21b <= '1';
611 s22a <= '1';
612 s22b <= '0';
613
614 elsif (contador_c15 <= 561422) then --6
615 s13a <= '1';
616 s13b <= '1';
617 s11a <= '1';
618 s11b <= '0';
619 s12a <= '1';
620 s12b <= '1';
621 s14a <= '1';
622 s14b <= '0';
623 s21a <= '1';
624 s21b <= '1';
625 s22a <= '1';
626 s22b <= '0';
627
628 elsif (contador_c15 <= 561522) then --6t
629 s13a <= '0';
630 s13b <= '1';
631 s11a <= '1';
632 s11b <= '0';
633 s12a <= '1';
634 s12b <= '1';
635 s14a <= '1';
636 s14b <= '0';
637 s21a <= '1';
638 s21b <= '1';
639 s22a <= '1';
```

```
640 s22b <= '0';
641
642 elsif (contador_c15 <= 680777) then --7
643 s13a <= '0';
644 s13b <= '1';
645 s11a <= '1';
646 s11b <= '1';
647 s12a <= '1';
648 s12b <= '1';
649 s14a <= '1';
650 s14b <= '0';
651 s21a <= '1';
652 s21b <= '1';
653 s22a <= '1';
654 s22b <= '0';
655
656 elsif (contador_c15 <= 680877) then --7t
657 s13a <= '0';
658 s13b <= '1';
659 s11a <= '1';
660 s11b <= '1';
661 s12a <= '1';
662 s12b <= '1';
663 s14a <= '1';
664 s14b <= '0';
665 s21a <= '1';
666 s21b <= '1';
667 s22a <= '1';
668 s22b <= '0';
669
670 elsif (contador_c15 <= 714028) then --6
671 s13a <= '1';
672 s13b <= '1';
673 s11a <= '1';
674 s11b <= '0';
675 s12a <= '1';
676 s12b <= '1';
677 s14a <= '1';
678 s14b <= '0';
679 s21a <= '1';
680 s21b <= '1';
681 s22a <= '1';
682 s22b <= '0';
683
684
685 elsif (contador_c15 <= 714128) then --6t
686 s13a <= '0';
687 s13b <= '1';
688 s11a <= '1';
689 s11b <= '0';
690 s12a <= '1';
691 s12b <= '1';
692 s14a <= '1';
693 s14b <= '0';
694 s21a <= '1';
695 s21b <= '1';
696 s22a <= '1';
697 s22b <= '0';
698
699 elsif (contador_c15 <= 739779) then --5
700 s13a <= '0';
701 s13b <= '1';
702 s11a <= '1';
703 s11b <= '1';
```

```
704 s12a <= '1';
705 s12b <= '0';
706 s14a <= '1';
707 s14b <= '1';
708 s21a <= '1';
709 s21b <= '1';
710 s22a <= '1';
711 s22b <= '0';
712
713 elsif (contador_c15 <= 739879) then --5t
714 s13a <= '0';
715 s13b <= '1';
716 s11a <= '1';
717 s11b <= '1';
718 s12a <= '1';
719 s12b <= '0';
720 s14a <= '1';
721 s14b <= '1';
722 s21a <= '1';
723 s21b <= '1';
724 s22a <= '1';
725 s22b <= '0';
726
727 elsif (contador_c15 <= 762130) then --4
728 s13a <= '1';
729 s13b <= '1';
730 s11a <= '1';
731 s11b <= '0';
732 s12a <= '1';
733 s12b <= '0';
734 s14a <= '1';
735 s14b <= '1';
736 s21a <= '1';
737 s21b <= '1';
738 s22a <= '1';
739 s22b <= '0';
740
741 elsif (contador_c15 <= 762230) then --4t
742 s13a <= '0';
743 s13b <= '1';
744 s11a <= '1';
745 s11b <= '0';
746 s12a <= '1';
747 s12b <= '0';
748 s14a <= '1';
749 s14b <= '0';
750 s21a <= '1';
751 s21b <= '1';
752 s22a <= '1';
753 s22b <= '0';
754
755 elsif (contador_c15 <= 782731) then -- 3
756 s13a <= '0';
757 s13b <= '1';
758 s11a <= '1';
759 s11b <= '1';
760 s12a <= '1';
761 s12b <= '1';
762 s14a <= '1';
763 s14b <= '0';
764 s21a <= '1';
765 s21b <= '0';
766 s22a <= '1';
767 s22b <= '1';
```

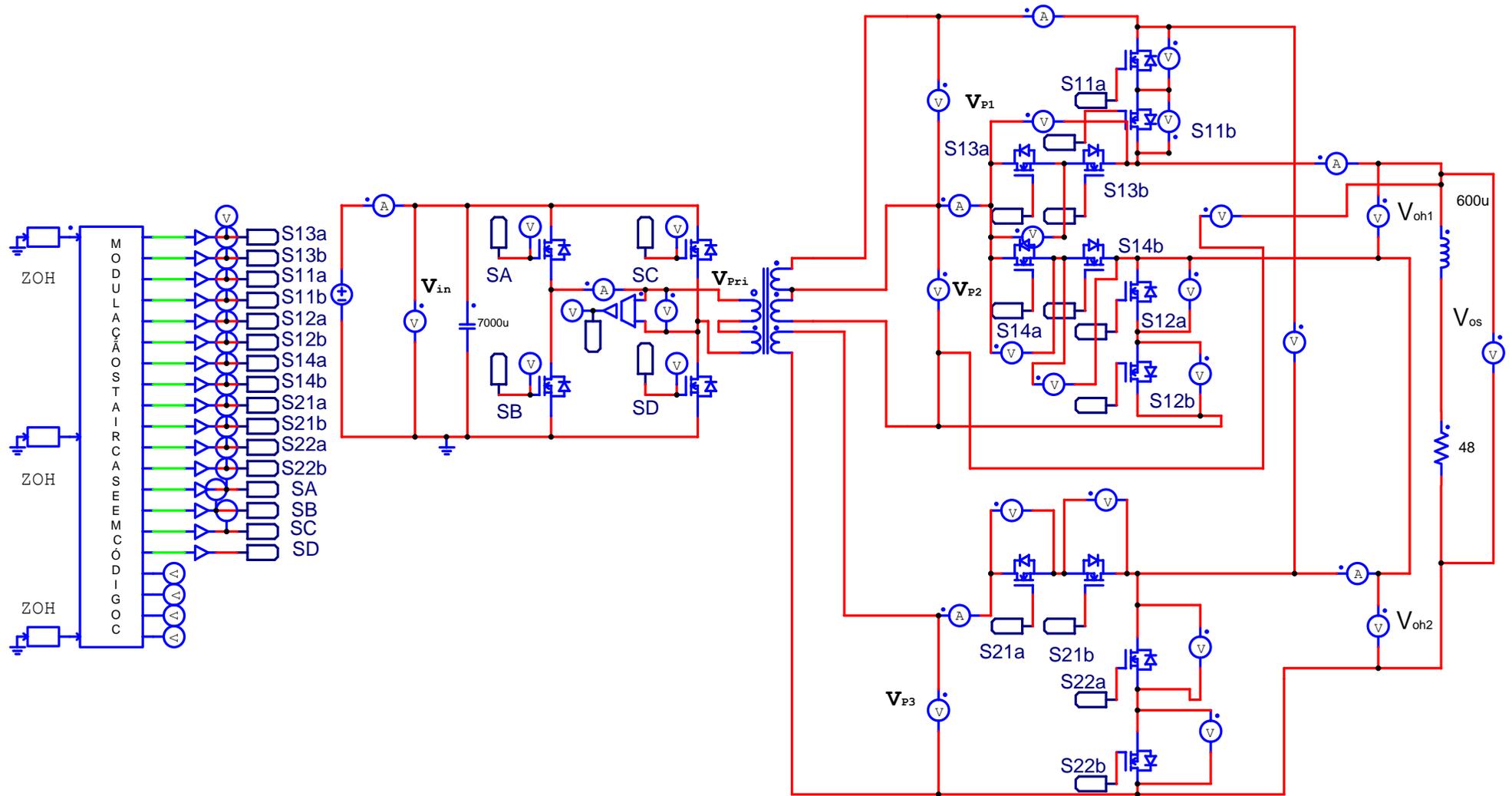
```
768
769 elsif (contador_c15 <= 782831) then --3t
770     s13a <= '0';
771     s13b <= '1';
772     s11a <= '1';
773     s11b <= '1';
774     s12a <= '1';
775     s12b <= '1';
776     s14a <= '1';
777     s14b <= '0';
778     s21a <= '1';
779     s21b <= '0';
780     s22a <= '1';
781     s22b <= '1';
782
783 elsif (contador_c15 <= 802282) then --2
784     s13a <= '1';
785     s13b <= '1';
786     s11a <= '1';
787     s11b <= '0';
788     s12a <= '1';
789     s12b <= '1';
790     s14a <= '1';
791     s14b <= '0';
792     s21a <= '1';
793     s21b <= '0';
794     s22a <= '1';
795     s22b <= '1';
796
797 elsif (contador_c15 <= 802382) then --2t
798     s13a <= '0';
799     s13b <= '1';
800     s11a <= '1';
801     s11b <= '0';
802     s12a <= '1';
803     s12b <= '1';
804     s14a <= '1';
805     s14b <= '0';
806     s21a <= '1';
807     s21b <= '0';
808     s22a <= '1';
809     s22b <= '1';
810
811 elsif (contador_c15 <= 821333) then --1
812     s13a <= '0';
813     s13b <= '1';
814     s11a <= '1';
815     s11b <= '1';
816     s12a <= '1';
817     s12b <= '0';
818     s14a <= '1';
819     s14b <= '1';
820     s21a <= '1';
821     s21b <= '0';
822     s22a <= '1';
823     s22b <= '1';
824
825 elsif (contador_c15 <= 821433) then --1t
826     s13a <= '0';
827     s13b <= '1';
828     s11a <= '1';
829     s11b <= '1';
830     s12a <= '0';
831     s12b <= '0';
```

```
832 s14a <= '1';
833 s14b <= '1';
834 s21a <= '0';
835 s21b <= '0';
836 s22a <= '1';
837 s22b <= '1';
838
839 elsif (contador_c15 <= 833033) then --0
840 s13a <= '1';
841 s13b <= '1';
842 s11a <= '0';
843 s11b <= '0';
844 s12a <= '0';
845 s12b <= '0';
846 s14a <= '1';
847 s14b <= '1';
848 s21a <= '0';
849 s21b <= '0';
850 s22a <= '1';
851 s22b <= '1';
852 elsif (contador_c15 <= 833183) then --0t
853 s13a <= '1';
854 s13b <= '1';
855 s11a <= '0';
856 s11b <= '0';
857 s12a <= '0';
858 s12b <= '0';
859 s14a <= '1';
860 s14b <= '1';
861 s21a <= '0';
862 s21b <= '0';
863 s22a <= '1';
864 s22b <= '1';
865
866 else --0
867 s13a <= '1';
868 s13b <= '1';
869 s11a <= '0';
870 s11b <= '0';
871 s12a <= '0';
872 s12b <= '0';
873 s14a <= '1';
874 s14b <= '1';
875 s21a <= '0';
876 s21b <= '0';
877 s22a <= '1';
878 s22b <= '1';
879 end if;
880
881 else
882 contador_c15 <= 0;
883 s1 <= '0';
884 s2 <= '0';
885 s3 <= '0';
886 s4 <= '0';
887 s13a <= '0';
888 s13b <= '0';
889 s11a <= '0';
890 s11b <= '0';
891 s12a <= '0';
892 s12b <= '0';
893 s14a <= '0';
894 s14b <= '0';
895 s21a <= '0';
```

```
896 s21b <= '0';
897 s22a <= '0';
898 s22b <= '0';
899 end if;
900 end if;
901 end process process_c15;
902 end hardware;
```

**APÊNDICE B – CIRCUITO DO INVERSOR SIMULADO NO POWERSIM E  
CÓDIGO DA MODULAÇÃO STAIRCASE FEITO EM LINGUAGEM C**

Figura 88 – Circuito do inversor simulado no Powersim com bloco de código em linguagem C.



```

static int ni=14;
static int divisor=0,ciclo=0, pola=1, SA=1, SB=0, SC=1, SD=0;
static int n=0, x=0, p=12, nf=0, dl=0;
// Código adaptado de mesquita 2016
// Tabela de estados fixos e em transição para 15 níveis
//S13aS13b S11aS11b S12aS12b S14aS164 S21aS21b S22aS22b

int array [30] [25] = {
1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0,
1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 76,
1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 457, //2
1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 848, //3
1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1260, //4
1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1707, //5
1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 2222, //6
1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 2887, //7
1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 5227, //6
1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 5892, //5
1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 6407, //4
1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 6854, //3
1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 7266, //2
1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 7657, //1
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 8038, //0
0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 8419, //-1
1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 8800, //-2
0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 9191, //-3
1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 9603, //-4
0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 10050, //-5
1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 10565, //-6
0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 11230, //-7
1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 13617, //-6
0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 14282, //-5
1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 14797, //-4
0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 15244, //-3
1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 15656, //-2
0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 16047, //-1
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 16428, //0
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 16666 //0

};

if(p==12)
{
dl++;
if (dl==1)
{p=0; dl=0;}
}

//tempos da ponte para 60Hz
//8333
if(ciclo >=8333) // T= 1/(2xf)
{
ciclo=0;
if(pola){ pola=0; x=1;}
else{ pola=1; x=0; p=0;}
}

if(ciclo==8330) //passagem por zero 3us agora + 3 us em ciclo=3 -> 6us
{
SA=0; SB=0; SC=0; SD=0;
SA=15; SB=0; SC=15; SD=0;
}

```

```

if(ciclo==3)
{
    if(pola){
        SA=0;SB=0;SC=0;SD=0;
        SA=15;SB=0;SC=0;SD=15;
    }
    else{
        SA=0;SB=0;SC=0;SD=0;
        SA=0;SB=15;SC=15;SD=0;
    }
}

ciclo++;

//fim tempos da ponte

if(divisor<=16666)
{
    if(divisor >= array[n+1][24]) { // na busca dados t=24 dif da dimensao na declara da tab=25
        n=n+1; p=12; }

    divisor=divisor+1;
}

if(divisor>16666)
{
    divisor=0;
    n=0; nf=0;
}

if(divisor<=8333)
{
    if(pola==1)
    {
        nf=n;
    }
    if(pola==0 )
    {
        nf=n+ni;
    }
}

if(divisor>8333)
{
    if(pola==1)
    {
        nf=n;
    }
    if(pola==0 )
    {
        nf=n-ni;
    }
}

out[0]=array[nf][0+p+x];

```

```
out[1]=array[nf][1+p-x];
out[2]=array[nf][2+p-x];
out[3]=array[nf][3+p-x];
out[4]=array[nf][4+p-x];
out[5]=array[nf][5+p-x];
out[6]=array[nf][6+p-x];
out[7]=array[nf][7+p-x];
out[8]=array[nf][8+p-x];
out[9]=array[nf][9+p-x];
out[10]=array[nf][10+p-x];
out[11]=array[nf][11+p-x];
out[12]=SA;
out[13]=SB;
out[14]=SC;
out[15]=SD;
out[16]=n;
out[17]=nf;
out[18]=p;
out[19]=dl;
out[20]=x;
```