

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**Análise das Relações das Tensões de Entrada de  
Inversores Multiníveis Híbridos Conectados em  
Cascata para Minimizar a THD da Tensão de  
Saída**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Hueslei Hoppen**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

# **ANÁLISE DAS RELAÇÕES DAS TENSÕES DE ENTRADA DE INVERSORES MULTINÍVEIS HÍBRIDOS CONECTADOS EM CASCATA PARA MINIMIZAR A THD DA TENSÃO DE SAÍDA**

por

**Hueslei Hoppen**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Prof. José Renes Pinheiro**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Hoppen, Hueslei  
Análise das Relações das Tensões de Entrada de Inversores Multiníveis Híbridos Conectados em Cascata para Minimizar a THD da Tensão de Saída / Hueslei Hoppen.-2012.  
108 p.; 30cm

Orientador: José Renes Pinheiro  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012

1. Engenharia Elétrica 2. Eletrônica de Potência 3. Inversores Multiníveis I. Pinheiro, José Renes II. Título.

---

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Hueslei Hoppen. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Padre Hildebrando, 1086, apto 211, Porto Alegre, RS, 91030-310

Fone: 51 91875963; Endereço Eletrônico: hueslei.hoppen@gmail.com

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DAS RELAÇÕES DAS TENSÕES DE ENTRADA DE  
INVERSORES MULTINÍVEIS HÍBRIDOS CONECTADOS EM  
CASCATA PARA MINIMIZAR A THD DA TENSÃO DE SAÍDA**

elaborada por  
**Hueslei Hoppen**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**José Renes Pinheiro, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Cassiano Rech, Dr. (UFSM)**

**Diorge Alex Bão Zambra, Dr. (UCS)**

Santa Maria, 27 de Abril de 2012.

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ANÁLISE DAS RELAÇÕES DAS TENSÕES DE ENTRADA DE INVERSORES MULTINÍVEIS HÍBRIDOS CONECTADOS EM CASCATA PARA MINIMIZAR A THD DA TENSÃO DE SAÍDA**

AUTOR: HUESLEI HOPPEN

ORIENTADOR: JOSÉ RENES PINHEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de Abril de 2012.

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo considerando inversores multiníveis formados a partir de inversores dois e três níveis conectados em cascata. Na literatura são apresentados vários trabalhos envolvendo inversores multiníveis assimétricos. As pesquisas, na sua maioria, tratam sobre técnicas de modulação considerando uma topologia binária ou trinária. Ainda, são apresentadas pesquisas que consideram uma pequena variação nas tensões de entrada dos inversores e analisam o comportamento do sistema. Contudo, ainda não existe um estudo que realize uma análise para obtenção da melhor relação entre as tensões de entrada do sistema multinível. Sendo que estas relações de tensão, juntamente com os ângulos de comutação, são capazes de gerar uma tensão de saída com uma THD mínima.

Esta dissertação foi realizada buscando obter esta relação de tensões para sistemas multiníveis formados a partir de inversores dois e três níveis. Além disso, é realizada a busca de um padrão para esta relação de tensão para  $n$  inversores conectados em cascata.

Para a obtenção dos resultados desejados foram aplicadas técnicas de eliminação seletiva de harmônicos. Com esta técnica, as harmônicas de baixa ordem são eliminadas, reduzindo a necessidade do filtro de saída. Além disso, considerações sobre algoritmos genéticos são realizadas. Este algoritmo é utilizado para reduzir o esforço computacional para a obtenção dos ângulos de comutação. Isto é necessário devido ao aumento significativo das variáveis a serem determinadas à medida que se eleva o número de inversores conectados em cascata.

Palavras-chave: Engenharia Elétrica, Eletrônica de Potência, Inversores Multiníveis

## **ABSTRACT**

Master Thesis  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ANALYSIS OF THE RELATIONS OF INPUT VOLTAGE OF HYBRID CASCADED MULTILEVEL INVERTERS TO MINIMIZE THD OUTPUT VOLTAGE**

AUTHOR: HUESLEI HOPPEN  
RESEARCH SUPERVISOR: JOSÉ RENES PINHEIRO  
Santa Maria, April 27<sup>th</sup>, 2012.

This Master Thesis presents a study considering multilevel inverters formed from two and three level cascaded inverters.

The literature presents several papers on asymmetric multilevel inverters and most studies are related to control and/or modulation techniques considering a binary or trinary topology. Also, there are studies that consider a small variation of the inverters input voltage and analyses the system behavior. However, any of these studies performs analysis to obtain the best relation between input voltage of the multilevel system, while this together with switching angles are capable of generating an output voltage with minimum THD.

This Master Thesis was developed aiming to get this voltage relation for multilevel systems formed by two and three level inverters. Furthermore, it seeks to find a pattern for the voltage ratio for several cascaded inverters.

To obtain the desired results, techniques of selective harmonic elimination was applied to reduce low order harmonics, reducing the need for output filter. To reduce the computational efforts for obtaining the switching angles, the author used considerations of genetic algorithms. This is necessary due to the significant increase of the variables to be determined as the number of cascaded inverters increase.

Keywords: Electrical Engineering, Power Electronics, Multilevel Inverter

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Inversor com ponto neutro grampeado – NPC. (a)NPC 3 níveis, (b) NPC 5 níveis .....  | 17 |
| Figura 1.2 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 1 .....   | 17 |
| Figura 1.3 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 2 .....   | 18 |
| Figura 1.4 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 3 .....   | 18 |
| Figura 1.5 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 4 .....   | 19 |
| Figura 1.6 - Inversor com capacitores de grampeamento .....  | 20 |
| Figura 1.7 - Inversores conectados em cascata. (a) inversores multinível utilizando inversores meia ponte, (b) inversor multinível utilizando inversores ponte completa..... | 21 |
| Figura 1.8 - Inversor multinível com tensão de saída com 7 níveis proposto por [11] .....  | 22 |
| Figura 2.1 Inversor meia ponte dois níveis.....  | 30 |
| Figura 2.2 - Etapas de operação do inversor meia ponte.....  | 30 |
| Figura 2.3 Inversor ponte completa.....  | 31 |
| Figura 2.4 Etapas de operação do inversor ponte completa gerando dois níveis de tensão.....  | 31 |
| Figura 2.5 Sistemas multiníveis formados por inversores meia ponte (a) e inversores ponte completa (b).....  | 32 |
| Figura 2.6 Forma de onda da tensão de saída para sistema multinível formado por dois inversores dois níveis .....  | 33 |
| Figura 2.7 - Gráfico THD x $\gamma$ .....  | 35 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1 - Tensão de saída para n inversores dois níveis conectados em série .....   | 39 |
| Figura 3.2 Níveis de tensão de três inversores meia ponte conectados em cascata.....   | 40 |
| Figura 3.3 Tensão de saída para n inversores três níveis conectados em série .....   | 41 |
| Figura 3.4 Etapas de operação de inversores ponte completa gerando três níveis de tensão de saída .....  | 42 |
| Figura 4.1 Fluxograma de um algoritmo genético padrão .....  | 49 |
| Figura 5.1 Sistema multinível assimétrico com 27 níveis (a) e semi ciclo positivo da tensão de saída do sistema citado (b).....  | 59 |
| Figura 5.2 Fluxograma do algoritmo implementado .....  | 62 |
| Figura 5.3 Sistemas multiníveis com inversores dois níveis em cascata. (a) sistema multinível com tensão de saída de 4 níveis; (b) sistema multinível com tensão de saída de 8 níveis; (c) sistema multinível com tensão de saída de 16 níveis; (d) sistema multinível com 32 níveis ..... | 63 |
| Figura 5.4 Simplificação de um inversor ponte completa .....   | 63 |
| Figura 5.5 Tensão de saída dos sistemas multiníveis analisados. (a) Inversor multinível com 4 níveis; (b) Inversor multinível com 8 níveis na saída; (c) Inversor multinível com 16 níveis na saída ; (d) Inversor multinível com 32 níveis na saída .....                                 | 64 |
| Figura 5.6 Espectro Harmônico para os quatro sistemas multiníveis utilizando inversores dois níveis. (a)duas células, (b)três células, (c) quatro células e (d) cinco células.....   | 66 |
| Figura 5.7 Sistemas multiníveis com inversores três níveis em cascata. (a) sistema multinível com tensão de saída de 9 níveis; (b) sistema multinível com tensão de saída de 27 níveis; (c)sistema multinível com tensão de saída de 81 níveis .....                                       | 67 |
| Figura 5.8 Sistemas multiníveis com inversores três níveis em cascata. (a) sistema multinível com tensão de saída de 7 níveis; (b) sistema multinível com tensão de saída de 15 níveis; (c)sistema multinível com tensão de saída de 31 níveis .....                                       | 68 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 5.9 Tensão de saída dos sistemas multiníveis analisados. (a) Inversor multinível com 9 níveis na saída; (b) Inversor multinível com 27 níveis na saída; (c) Inversor multinível com 81 níveis na a saída .....                             | 71 |
| Figura 5.10 Espectro harmônico para os três sistemas multiníveis testados. (a) sistema com 9 níveis de saída, (b) sistema com 27 níveis de saída, (c) sistema com 81 níveis de saída .....  | 72 |
| Figura 5.11 Tensão de saída dos sistemas multiníveis considerando somente a soma das tensões. (a) Inversor multinível com 7 níveis na saída; (b) Inversor multinível com 15 níveis na saída; (c) Inversor multinível com 31 níveis na saída ..... | 74 |
| Figura 5.12 Espectro harmônico para os três sistemas multiníveis testados. (a) sistema com 7 níveis de saída, (b) sistema com 15 níveis de saída, (c) sistema com 31 níveis de saída .....  | 75 |
| Figura 6.1 Sistema multinível utilizando inversores três níveis simétricos (a) e formas de onda da tensão de saída (b).....   | 77 |
| Figura 6.2 Sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis simétricos utilizados .....   | 78 |
| Figura 6.3 Inversores multiníveis com uma tensão de saída de cinco níveis formados a partir de inversores três níveis (a) e inversor NPC (b).....   | 79 |
| Figura 6.4 Sistemas simétricos analisados. Inversor três níveis (a); inversor multinível simétrico formando cinco níveis(b).....  | 80 |
| Figura 6.5 Circuito equivalente para inversores multiníveis simétrico .....   | 81 |
| Figura 6.6 Sistemas multiníveis assimétricos formados por combinações de inversores simétricos de 3 e 5 níveis .....  | 81 |
| Figura 6.7 Tensão de saída sistema multinível assimétrico 11 níveis, formado por inversor três níveis combinados com inversor multinível simétrico de 5 níveis .....  | 82 |
| Figura 6.8 Espectro Harmônico para sistema 11 níveis .....  | 82 |
| Figura 6.9 Sistemas multiníveis simétricos utilizados para a análise .....  | 82 |
| Figura 6.10 Sistemas multiníveis utilizando combinações de inversores simétricos .....  | 83 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 6.11 Tensões para as combinações apresentadas na Tabela 6.2. (a) sistema 15 níveis; (b) sistema 19 níveis; (c) sistema 23 níveis; (d) sistema 27 níveis .....           | 85 |
| Figura 6.12 Espectro Harmônico para as combinações apresentadas na Tabela 6.3. (a) sistema 15 níveis; (b) sistema 19 níveis; (c) sistema 23 níveis; (d) sistema 27 níveis..... | 86 |
| Figura 6.13 Tensões para os sistemas multiníveis com 23 níveis de saída (a) e 29 níveis de saída (b).....  | 87 |
| Figura 6.14 Espectro Harmônico para as tensões de saída dos sistemas multiníveis com 23 níveis (a) e 29 níveis (b) .....   | 88 |
| Figura 6.15 Tensões para os sistemas multiníveis com 35 níveis de saída (a) e 41 níveis de saída (b).....  | 89 |
| Figura 6.16 Espectro Harmônico para as tensões de saída dos sistemas multiníveis com 35 níveis (a) e 41 níveis (b) .....   | 89 |
| Figura 6.17 Tensões para os sistemas multiníveis com 39 níveis de saída (a), 47 níveis de saída (b) e 55 níveis de saída (c).....  | 90 |
| Figura 6.18 Espectro harmônico para as tensões de saída dos sistemas multiníveis com 39 níveis (a), 47 níveis (b) e 55 níveis (c).....   | 91 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1 Correspondência entre expressões utilizadas na biologia com expressões utilizadas em algoritmos genéticos .....  | 46 |
| Tabela 5.1 Possíveis combinações entre os três inversores do sistema multinível assimétrico .....   | 58 |
| Tabela 5.2 Valores utilizados nos parâmetros do algoritmo genético .....  | 61 |
| Tabela 5.3 Resultados dos sistemas multiníveis utilizando inversores dois níveis .....  | 65 |
| Tabela 5.4 Ângulos de comutação para os sistemas multiníveis formados a partir de inversores dois níveis .....  | 65 |
| Tabela 5.5 Resultados para sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis com todas as combinações de fontes possíveis .....                              | 69 |
| Tabela 5.6 Ângulos de comutação para sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis com todas as combinações de fontes possíveis.....                     | 70 |
| Tabela 5.7 Resultados para sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis com combinações obtidas apenas a partir da soma das fontes.....                 | 73 |
| Tabela 5.8 Ângulos de comutação para sistemas multiníveis com inversores três níveis utilizando somente a soma das tensões das fontes.....                        | 73 |
| Tabela 6.1 Tensões sintetizadas pelas combinações de sistemas simétricos .  | 83 |
| Tabela 6.2 Combinações assimétricas de conjuntos de inversores multiníveis simétricos – considerando o inversor três níveis como o inversor de menor tensão ..... | 83 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 6.3 Combinações assimétricas de conjuntos de inversores multiníveis simétricos – considerando o inversor cinco níveis como o inversor de menor tensão ..... | 87 |
| Tabela 6.4 Combinações assimétricas de conjuntos de inversores multiníveis simétricos – considerando o inversor sete níveis como o inversor de menor tensão .....  | 90 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>16</b> |
| 1.1 Revisão Bibliográfica .....   | 16        |
| 1.1.1 Inversor com Ponto Neutro Grampeado ( <i>Neutral Point Clamped - NPC</i> )    | 16        |
| 1.1.2 Inversor com capacitor de grampeamento ( <i>Flying Capacitor - FC</i> ) ..... | 19        |
| 1.1.3 Inversor Multinível utilizando células em cascata .....                       | 20        |
| 1.2 Objetivo. ....  | 25        |
| 1.3 Organização da Dissertação .....  | 25        |
| <b>Capítulo 2 Inversores Meia Ponte e Ponte Completa.....</b>                       | <b>27</b> |
| 2.1 Distorção Harmônica Total .....   | 27        |
| 2.2 Eliminação seletiva de harmônicos .....   | 29        |
| 2.3 Inversor meia-ponte .....   | 30        |
| 2.4 Inversor ponte completa .....   | 31        |
| 2.5 Inversores Multiníveis utilizando inversores dois níveis .....                  | 32        |
| 2.6 Conclusões.....   | 36        |
| <b>Capítulo 3 Generalização dos inversores multiníveis em cascata .....</b>         | <b>37</b> |
| 3.1 Generalização .....   | 37        |

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 3.2   | Generalização de inversores multiníveis formados por células 2 níveis ....  | 39        |
| 3.3   | Generalização de inversores multiníveis formados por células três níveis  | 41        |
| 3.4   | Conclusão .....   | 43        |
|       | <b>Capítulo 4 Algoritmo Genético (GA) .....</b>   | <b>45</b> |
| 4.1   | Histórico sobre os Algoritmos Genéticos.....  | 45        |
| 4.2   | Características dos Algoritmos Genéticos.....   | 46        |
| 4.3   | Passo-a-passo para implementação de um Algoritmo Genético.....  | 48        |
| 4.3.1 | Seleção por ranking.....  | 50        |
| 4.3.2 | Seleção por roleta .....  | 50        |
| 4.3.3 | Seleção por torneio .....   | 51        |
| 4.4   | Operadores Genéticos .....  | 51        |
| 4.5   | Elitismo.....   | 52        |
| 4.6   | Parâmetros de Controle do Algoritmo Genético .....  | 53        |
| 4.7   | Conclusão .....   | 54        |
|       | <b>Capítulo 5 Utilização de GA em Inversores multiníveis.....</b>   | <b>55</b> |
| 5.1   | Descrição do algoritmo utilizado.....   | 56        |
| 5.2   | Exemplo de Projeto .....  | 57        |
| 5.2.1 | Inversor multinível assimétrico com tensão de saída de 27 níveis.....   | 57        |
| 5.2.2 | Método para obtenção do valor de $\gamma$ e valor do índice de modulação de amplitude, $ma$ .....                       | 60        |
| 5.2.3 | Escolha dos parâmetros do GA.....   | 61        |
| 5.3   | Inversores multiníveis formados por inversores dois níveis em cascata. ...  | 62        |
| 5.4   | Inversores multiníveis formados por inversores três níveis em cascata.....  | 67        |
|       | <b>Capítulo 6 Combinações entre sistemas híbridos assimétricos formados por conjuntos de inversores simétricos.....</b> | <b>77</b> |
| 6.1   | Combinações de conjuntos de inversores multiníveis simétricos.....  | 78        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.2 Análise dos conjuntos de inversores simétricos conectados de forma assimétrica..... | 80         |
| 6.3 Conclusões.....   | 92         |
| <b>CONCLUSÃO .....</b>  | <b>93</b>  |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>   | <b>95</b>  |
| <b>ANEXO 1 .....</b>  | <b>100</b> |

# INTRODUÇÃO

O aumento de potência e, portanto, da tensão e/ou corrente em equipamentos para as mais diversas aplicações industriais gerou a necessidade do desenvolvimento de alternativas que possibilitassem seu acionamento. Uma alternativa bem difundida são os inversores multiníveis que permitem sintetizar níveis elevados de tensão utilizando semicondutores de menor tensão, os quais são facilmente encontrados, além de possuírem um baixo valor comparado a dispositivos que suportam tensões elevadas.

Outra característica importante dos inversores multiníveis é a sua capacidade de gerar tensões com baixa distorção harmônica, mesmo operando com reduzida frequência de comutação, e baixo  $dv/dt$ , reduzindo as exigências dos filtros de saída.

## 1.1 Revisão Bibliográfica

Os inversores multiníveis podem ser divididos em três grandes famílias, a saber, inversor com ponto neutro grampeado por diodo (NPC), inversor com capacitores de grampeamento (*Flying Capacitors*) e inversores com fontes isoladas conectadas em cascata.

### 1.1.1 Inversor com Ponto Neutro Grampeado (*Neutral Point Clamped - NPC*)

O inversor com ponto neutro grampeado foi apresentado primeiramente em [1] e [2]. Este inversor gera em sua saída três níveis de tensão, caso seja formado por somente uma fase, como mostrado na Figura 1.1 (a), ou por cinco níveis, caso seja formado por duas fases, Figura 1.1 (b). Nesta topologia a tensão sobre os semicondutores é igual à metade da tensão do barramento CC, no entanto, apresenta desequilíbrio no divisor capacitivo.



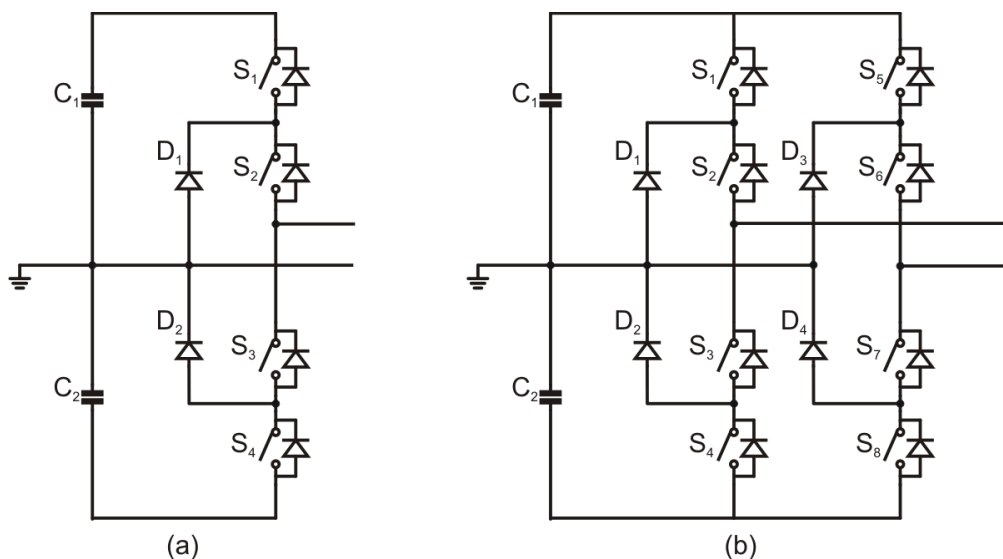


Figura 1.1 Inversor com ponto neutro grampeado – NPC. (a) NPC 3 níveis, (b) NPC 5 níveis

A partir da topologia da Figura 1.1(a), gera-se 3 níveis de saída. As etapas de operação do inversor dão-se da seguinte maneira considerando fator de potência (FP) unitário [43]:

**Etapa 1:** Os semicondutores  $S_1$  e  $S_2$  conduzem, e a tensão na saída do inversor será igual tensão sobre o capacitor  $C_1$ . A Figura 1.2 apresenta esta etapa.

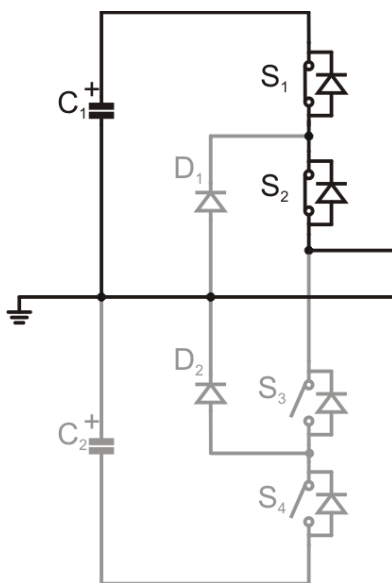


Figura 1.2 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 1

**Etapa 2:** Nesta etapa o semicondutor  $S_1$  é bloqueado. Então a corrente circulará por  $S_2$  e  $D_1$  sendo que a tensão na saída do inversor será igual a zero, conforme Figura 1.3.

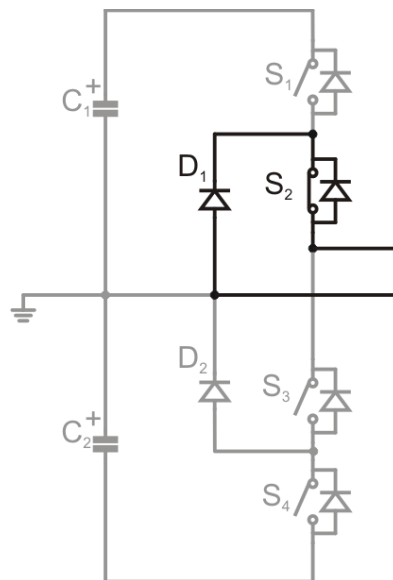


Figura 1.3 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 2

**Etapa 3:** Agora,  $S_2$  é bloqueado e  $S_3$  e  $S_4$  são acionados. Desta maneira, a tensão de saída do sistema será igual a tensão sobre o capacitor  $C_2$ , conforme pode ser observado na Figura 1.4.

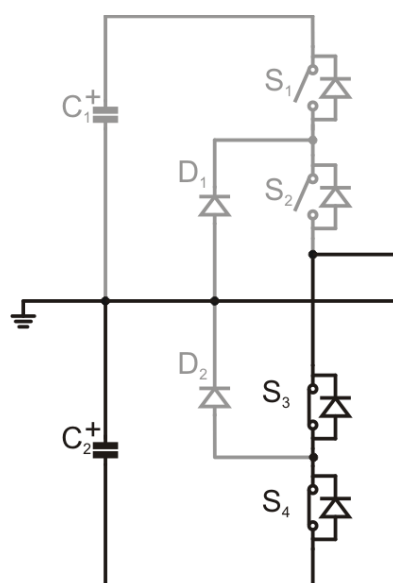


Figura 1.4 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 3

**Etapa 4:** Quando  $S_4$  é bloqueado, a corrente passa a circular por  $S_3$  e  $D_2$  aplicando zero de tensão na saída do inversor, a Figura 1.5 representa a etapa de operação descrita.

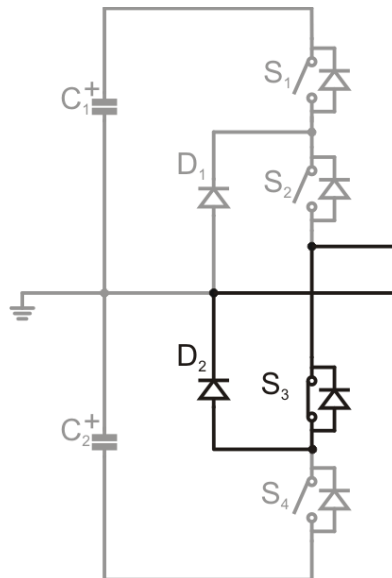


Figura 1.5 Etapas de funcionamento do inversor NPC 3 níveis, etapa 4

### 1.1.2 Inversor com capacitor de grampeamento (*Flying Capacitor - FC*)

A topologia que utiliza capacitores para fixar uma tensão sobre os semicondutores é denominado inversor com capacitores de grampeamento, já outros nomeiam como capacitores flutuantes ou ainda como células imbricadas. A Figura 1.6 apresenta a topologia citada, onde é possível observar a possibilidade de o mesmo nível de tensão ser sintetizado por diferentes chaves semicondutoras [6], [30], [31] e [32].

Contudo, esta topologia apresenta grandes desvantagens em relação as demais, uma vez que toda a corrente do sistema flui através dos capacitores. Além disso, existe a dificuldade para a regulação do nível de tensão dos capacitores [31].

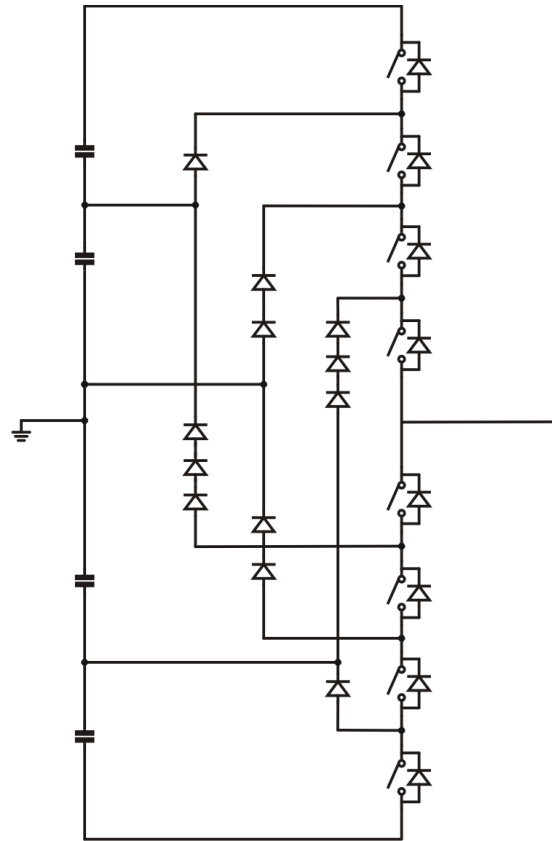


Figura 1.6 - Inversor com capacitores de grampeamento

### 1.1.3 Inversor Multinível utilizando células em cascata

A topologia que utiliza inversores conectados em série, ilustrado na Figura 1.7, possui como princípio básico a soma das tensões de saída de cada um dos inversores conectados. Esta topologia já foi abordada diversas vezes, utilizado com arranjos monofásicos ou trifásicos de inversores do tipo ponte completa [3] – [10]. Porém, outras topologias de inversores podem ser conectadas em cascata possibilitando a utilização de inversores de menor tensão/potência para sintetizar tensões/potências elevadas. Com isso, torna-se possível utilizar semicondutores com limites de tensão menor e, conseqüentemente, com um custo menor se comparado a dispositivos com capacidade de tensão/potência elevada.

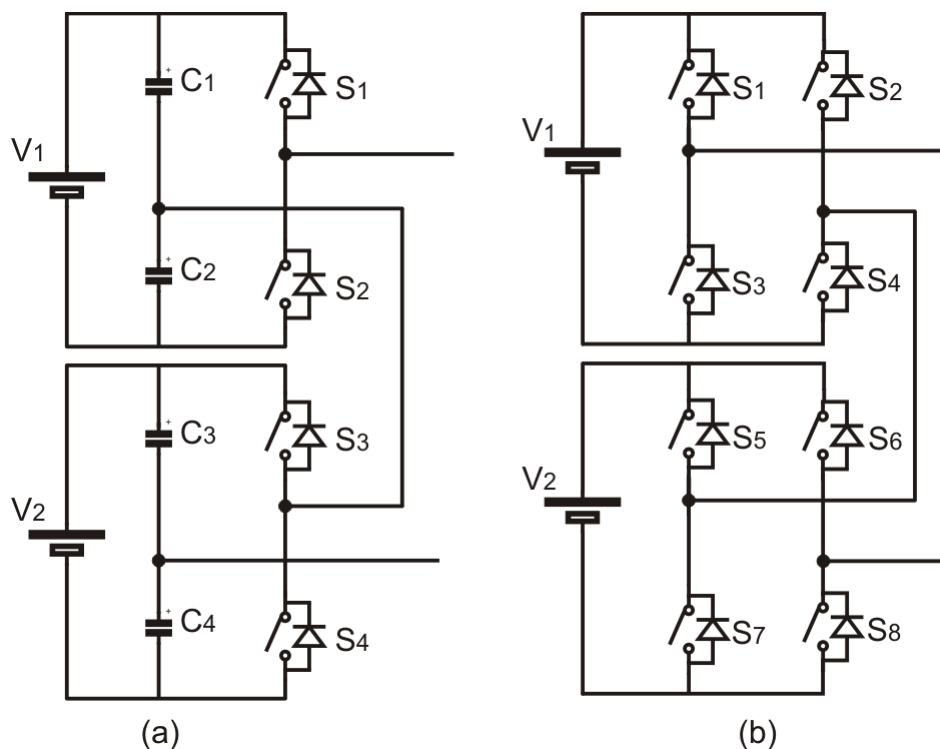


Figura 1.7 - Inversores conectados em cascata. (a) inversores multinível utilizando inversores meia ponte, (b) inversor multinível utilizando inversores ponte completa

A partir das topologias citadas (NPC, FC, células em cascata), foram desenvolvidas outras configurações, onde se destacam os inversores multiníveis híbridos [12], [13], [14], [33], [34], [35], que apresentam células em série com valores de tensão, estratégias de modulação, topologias e/ou tecnologias de semicondutores diferentes. Dessa forma, é possível um melhor aproveitamento das características de cada semicondutor devido à possibilidade de operação com níveis de tensão e frequências de comutação diferentes.

Uma topologia é apresentada em [11] na qual utiliza um inversor híbrido multinível com sete níveis, Figura 1.8. Este sistema multinível é formado por dois inversores ponte completa, sendo que um possuindo retificador controlado na entrada. Um deles de alta potência comutado em baixa frequência utilizando IGCTs. Já, o segundo inversor sendo de baixa potência, comutado em alta frequência, formado por IGBTs. Além disso, o sistema possui uma relação binária entre seus barramentos CC.

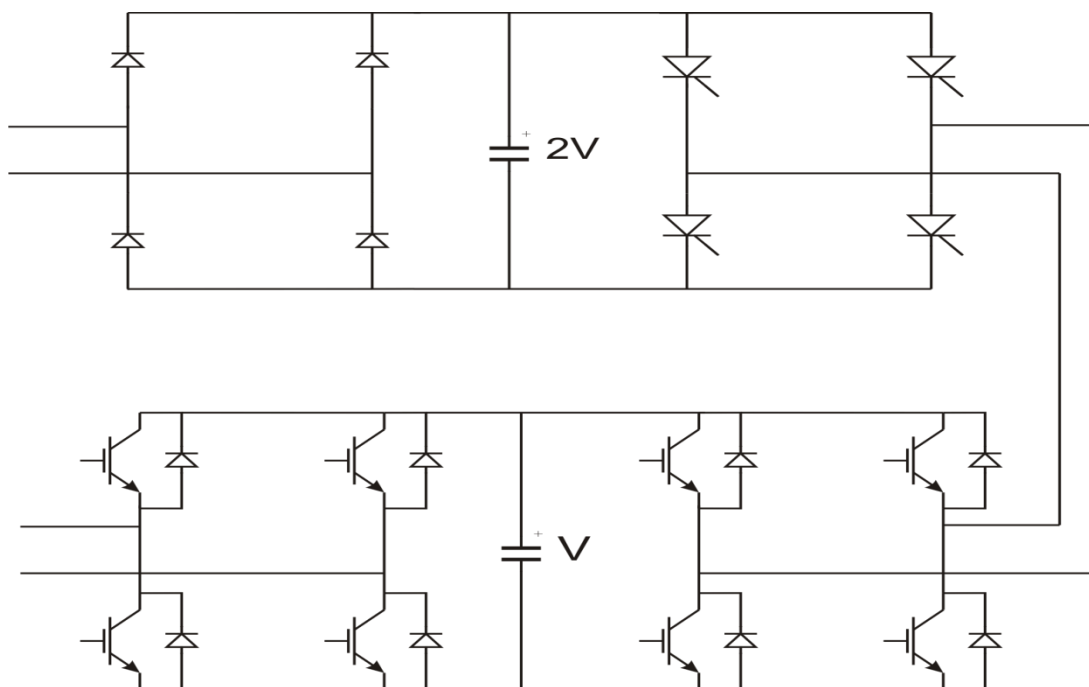


Figura 1.8 - Inversor multinível com tensão de saída com 7 níveis proposto por [11]

Em [12] é realizada uma análise unificada e considerações de projeto de conversores multiníveis híbridos. É apresentada uma análise comparativa de várias topologias de inversores multiníveis híbridos e propõem metodologias de projetos para aplicações distintas. Já em [13] é apresentada uma análise do impacto das estratégias de modulação em conversores multiníveis híbridos considerando componentes harmônicos da corrente de entrada e da tensão de saída.

Muitas pesquisas apresentam sistemas multiníveis com níveis de tensão distintos em cada célula sendo possível sintetizar um maior número de níveis na tensão de saída do inversor. Nestes trabalhos normalmente os arranjos utilizados possuem fontes de tensão múltiplas entre si, com configurações do tipo binária e do tipo trinária [14], [17], [37] – [42].

Uma comparação entre três topologias de inversores multiníveis utilizados no acionamento de motores de indução é apresentado em [14]. Foram comparadas as topologias, semicondutores e modulação de inversores tipo NPC, multinível cascata simétrica e multinível cascata assimétrica. Foram analisados parâmetros como DF1, DF2, tensão de modo comum, distribuição de perdas nos semicondutores, volume do dissipador e THD, sendo que o

inversor multinível em cascata assimétrico apresentou melhores resultados para a maioria dos índices analisados.

A análise da relação não inteira entre as fontes de tensão é apresentada em [15] onde foi proposta a utilização de um algoritmo genético para obtenção dos ângulos de comutação dos inversores multiníveis com fontes CC de valores diferentes de forma a eliminar as componentes harmônicas desejadas. São consideradas quatro combinações de fontes CC, para cada combinação são obtidos conjuntos de ângulos que satisfazem as restrições especificadas, eliminação seletiva de harmônicos e, ao final, é realizada uma comparação dos quatro casos considerando THD e índice de modulação.

Já [16], realiza a eliminação seletiva de harmônicos em inversores multiníveis com fontes CC diferentes utilizando o método PSO (Particle Swarm Optimization) uma vez que fontes CC com valores diferentes aumentam a dificuldade em obter os ângulos de comutação que satisfaçam as restrições. São considerados três casos, utilizando dois, três e quatro inversores em cascata com tensões CC distintas entre eles. Ao final é realizada uma comparação da técnica iterativa Newton – Raphson e a técnica PSO proposta para os três casos. Foram considerados o tempo computacional necessário para obter os ângulos de comutação e o valor da THD.

Em [17] é proposto um sistema multinível assimétrico com somente uma fonte CC, sendo utilizado um transformador toroidal com vários secundários para aplicar diferentes níveis de tensão nos inversores do sistema. No inversor multinível apresentado foi utilizada a relação trinária.

Em [18], além de serem apresentadas as três principais topologias utilizadas em conversores multiníveis, propõem uma técnica de modulação *Space Vector* para conversores com relações de tensão não inteira que soluciona o problema da distribuição não uniforme dos vetores devido essa relação de tensão não inteira.

Os trabalhos mais recentes que abordam a utilização de fontes de tensão com valores diferentes tratam principalmente de técnicas de modulação. Em [19] é proposto um algoritmo em tempo real para obter os ângulos de comutação que minimizem a THD em inversores multiníveis utilizando modulação do tipo degrau. Já em [20], o algoritmo é expandido para atuar em

inversores multiníveis com tensões diferentes ou degraus de tensão variáveis utilizando o mesmo tipo de modulação.

Já em [26] os autores apresentam um inversor multinível assimétrico composto por três inversores ponte-completa. Estes inversores possuem tensões das fontes CC compostas por tensões de  $V$ ,  $3V$  e  $5V$  gerando um sistema com 19 níveis. É então realizada a variação do índice de modulação de amplitude entre 0,6 e 1,1. Para a obtenção dos ângulos de comutação, que minimize as componentes harmônicas ímpares da 5ª à 25ª, é utilizado um algoritmo genético. Como resultado, os autores apresentam o espectro harmônico de tensão, comprovando a redução das componentes harmônicas e consequentemente a minimização da THD de tensão.

O artigo [27] simplesmente utiliza um algoritmo genético para obter os ângulos de comutação de um sistema multinível simétrico composto por três inversores ponte-completa. Também é realizada uma variação no índice de modulação de amplitude e determinada a eliminação da 5ª e 7ª componente harmônica.

Em [29] é utilizado um inversor multinível com 7 níveis da tensão de saída, formado por três inversores ponte completa conectados em cascata. Onde as fontes CC de cada inversor podem assumir diferentes valores que, em conjunto com os ângulos de comutação obtidos a partir de algoritmos genéticos, geram uma THD mínima para o sistema proposto. São realizadas algumas combinações com as tensões CC dos inversores do sistema multinível e conjunto com uma variação do índice de modulação de amplitude obtendo uma THD mínima para o sistema para determinadas combinações de fontes CC.

Como é possível perceber, existe uma vasta bibliografia relacionada à inversores multiníveis. Contudo, não foi encontrada nenhuma pesquisa que verificasse qual a melhor relação da tensão de entrada de inversores conectados em cascata que, combinados com determinados ângulos de comutação, retornem uma THD mínima para determinada faixa de operação. Também, não foi encontrado nenhum trabalho que verificasse a existência de um padrão para a relação das tensões de entrada do sistema com a THD de saída. Uma vez obtida esta combinação seria possível, por exemplo, reduzir os filtros de saída do sistema.



## 1.2 Objetivo

Com o intuito de preencher essa lacuna, o presente trabalho apresenta um estudo de inversores multiníveis conectados em cascata, visando obter a melhor relação de tensão entre as fontes de entrada do sistema. Esta relação, juntamente com os ângulos de comutação também obtidos no estudo, será capaz de gerar uma tensão de saída com uma THD mínima.

São realizadas configurações utilizando inversores de dois e três níveis. Além disso, são realizadas combinações utilizando conjuntos de inversores simétricos, gerando sistemas assimétricos. Em todas estas configurações, além de obter a mínima THD de tensão de saída, busca-se também verificar um comportamento padrão para as relações de tensão para as diversas configurações.

## 1.3 Organização da Dissertação

Primeiramente, é realizada uma revisão sobre inversores multiníveis. São brevemente apresentadas as três topologias básicas de inversores multiníveis (Inversor com ponto neutro grampeado – NPC; *flying capacitor* e inversores conectados em cascata). Um exemplo dessas variações é a utilização de fontes de tensão com valores distintos, visando o aumento do número de níveis da tensão de saída

No capítulo 2, é apresentado um estudo dos inversores do tipo dois níveis. É realizada uma revisão das principais topologias de inversores capazes de gerar tais níveis de tensão de saída. É realizado também, o equacionamento que será utilizado no decorrer desta dissertação. Além disso, com o intuito de validar o equacionamento, são apresentados os parâmetros necessários para uma THD da tensão de saída mínima, obtidos a partir do equacionamento.

No capítulo 3, o equacionamento obtido no capítulo anterior é generalizado para  $n$  inversores conectados em cascata. Esta análise foi realizada tanto com inversores dois níveis, como para inversores três níveis.

O capítulo 4 contém uma revisão sobre Algoritmos Genéticos (GA – *Genetic Algorithm*). Isto é feito, pois este foi o método matemático escolhido para realizar a busca dos ângulos de comutação que satisfizessem as restrições especificadas.

Já no capítulo 5 o algoritmo genético é utilizado para realizar a busca de ângulos de comutação para diversos inversores multiníveis. Também, são apresentados os principais pontos do algoritmo utilizado. Além disso, os resultados obtidos para inversores multiníveis formados por inversores dois e três níveis contados em cascata são apresentados neste capítulo.

No capítulo 6, é realizado um estudo para a obtenção de uma THD mínima para inversores multiníveis assimétricos híbridos utilizando conjuntos de inversores multiníveis simétricos conectados em cascata.

Por fim, a conclusão contém as principais contribuições obtidas na dissertação bem como propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2 Inversores Meia Ponte e Ponte Completa

Os inversores de dois e três níveis são amplamente utilizados na indústria devido a sua simplicidade [44], uma vez que são formados por duas ou quatro chaves semicondutoras. Além disso, seu comando é de fácil implementação. Contudo, estes sistemas geram componentes harmônicas elevadas tornando o seu uso desaconselhável em aplicações onde existam equipamentos sensíveis.

Para contornar este problema, além de técnicas de modulação, estes inversores podem ser conectados em cascata [45], gerando assim um maior número de níveis na saída do sistema, reduzindo assim as componentes harmônicas geradas.

A seguir, é realizada uma breve revisão sobre Distorção Harmônica Total uma vez que é o principal parâmetro utilizado no trabalho. Também, são realizadas considerações sobre eliminação seletiva de harmônicos. Além disso, são apresentadas as topologias de inversores meia ponte, ponte completa e inversores meia ponte conectados em cascata. Para esta última topologia é realizada uma análise inicial considerando a melhor relação entre as tensões de entrada dos inversores em cascata.

### 2.1 Distorção Harmônica Total

A Distorção Harmônica Total (*THD – Total Harmonic Distortion*) é um dos métodos mais utilizados para quantificar um sistema. Será o parâmetro analisado neste trabalho. Esta distorção é gerada devido às características não lineares de dispositivos e cargas conectados no sistema elétrico.

Quando sistemas ou componentes são submetidos a harmônicos, estes podem apresentar ressonâncias, aquecimento excessivo, acionamento de proteções, vibrações, entre outros [46]. Para obter a magnitude e o ângulo de cada harmônico, que são os parâmetros necessários para obtenção da THD, é necessário realizar a decomposição da forma de onda analisada utilizando séries de Fourier.

A série de Fourier permite expressar qualquer forma de onda periódica no domínio do tempo em um somatório infinito. A equação (2.1) representa a série de Fourier. Onde os coeficientes  $a_k$  e  $b_k$  são dados respectivamente nas equações (2.3) e (2.4).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h \cdot \omega t) + b_h \text{sen}(h \cdot \omega t) \quad (2.1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_h = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(h \cdot \omega t) dt \quad (2.3)$$

$$b_h = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \text{sen}(h \cdot \omega t) dt \quad (2.4)$$

As formas de onda de tensão também podem ser apresentadas no domínio da frequência sendo representadas pela equação (2.5). Onde,  $h$  é o valor da ordem da componente harmônica,  $V_p$  é o valor de pico de cada uma das componentes harmônica e  $\theta$  é o ângulo de fase da componente fundamental e das harmônicas [10].

$$v(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} V_p \cos(h\omega t + \theta) \quad (2.5)$$

A partir disso, é possível obter o valor da Distorção Harmônica Total (*Total Harmonic Distortion – THD*) utilizando a equação (2.6).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^{\infty} V_{pH}^2}}{V_{p1}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Onde  $H$  é a ordem da componente fundamental.

## 2.2 Eliminação seletiva de harmônicos

As pesquisas sobre técnicas de eliminação seletiva de harmônicos (*SHE – Selective Harmonic Elimination*) tiveram início nos anos 60, sendo melhor desenvolvidas durante os anos 70 [1]-[4]. Esta técnica possui diversas vantagens, sendo possível citar o bom desempenho em baixa frequência de comutação e o controle direto das componentes harmônicas [47].

Estes primeiros trabalhos consideravam somente formas de onda com simetria de um quarto de onda. Sendo que as mais conhecidas são as formas de onda com dois e três níveis. A simetria de um quarto de onda garante que todas as harmônicas pares serão iguais à zero. Contudo, embora as características da simetria de um quarto de onda sejam interessantes, suas restrições limitam o espaço das soluções. Quando estas restrições são relaxadas, passando para uma simetria de meia onda, as componentes harmônicas pares continuam sendo eliminadas naturalmente, contudo as fases das harmônicas podem sofrer variações [14].

A forma de onda da saída do sistema é analisada utilizando teoria de Fourier, produzindo assim um grupo de equações transcendentais. A solução dessas equações, caso exista, gera os ângulos de comutação necessários para obter o valor da componente fundamental e das harmônicas de interesse. Para a solução das equações são utilizados métodos de iteração como, por exemplo, Newton-Raphson. Porém, métodos como este, apresentam dificuldades em resolver as equações à medida que aumenta o número de inversores em cascata uma vez que o número de ângulos a serem obtidos se eleva consideravelmente. Para solucionar o problema, foram utilizados métodos de otimização, como, por exemplo, algoritmos genéticos [27].

### 2.3 Inversor meia-ponte

Este inversor meia-ponte pode ser constituído por duas chaves semicondutoras dispostas conforme Figura 2.1. Devido à sua configuração o inversor meia ponte necessita de um barramento CC com ponto médio [48].

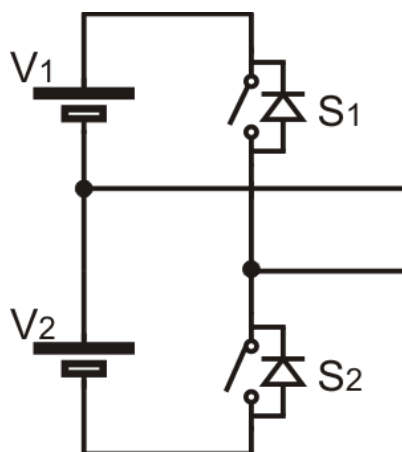


Figura 2.1 Inversor meia ponte dois níveis

Outra característica da topologia meia ponte é a necessidade das chaves semicondutoras suportarem o dobro da tensão da saída do sistema. Além disso, não são capazes de gerar nível zero na saída uma vez que os semicondutores atuam de forma complementar gerando nível positivo ou negativo. A Figura 2.2 apresenta o funcionamento do inversor meia ponte.

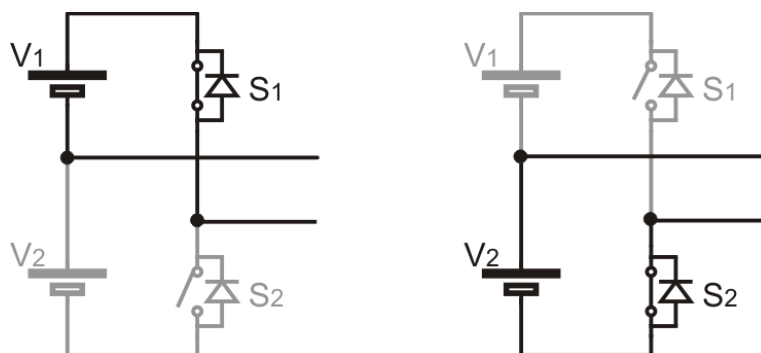


Figura 2.2 - Etapas de operação do inversor meia ponte

## 2.4 Inversor ponte completa

O inversor ponte completa é composto por dois braços inversores e uma fonte de tensão CC Figura 2.3. Esta topologia exige comando dos quatro semicondutores, onde ao menos o comando dos dois semicondutores superiores deve ser isolado. Comparado com o inversor meia ponte, este apresenta vantagens como a necessidade de somente uma fonte de tensão, além de uma menor tensão aplicada sobre os semicondutores [49].

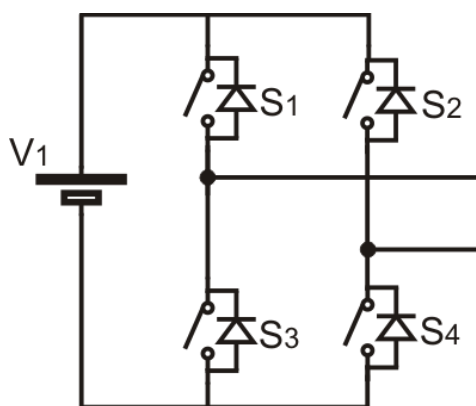


Figura 2.3 Inversor ponte completa

Para ilustrar o funcionamento do inversor ponte completa gerando dois níveis de tensão de saída, as etapas de operação são apresentadas na Figura 2.4.

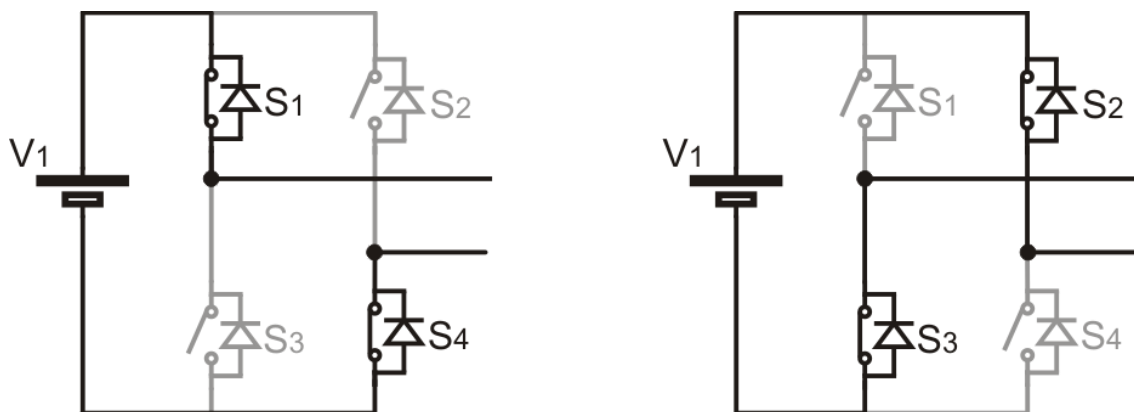


Figura 2.4 Etapas de operação do inversor ponte completa gerando dois níveis de tensão

## 2.5 Inversores Multiníveis utilizando inversores dois níveis

Para inversores multiníveis, utilizando células dois níveis, com tensões CC diferentes, o número de níveis da tensão de saída obedece à relação  $2^i$  onde  $i$  é a quantidade de inversores utilizados [35]. Esta relação é válida somente quando são utilizadas todas as relações possíveis entre as fontes, considerando a utilização de dois inversores em cascata, Figura 2.5, o sistema resultante é formado pelos seguintes níveis de tensão:

- $V_2 + V_1$ ;
- $V_2 - V_1$ ;
- $-V_2 + V_1$ ;
- $-V_2 - V_1$ .

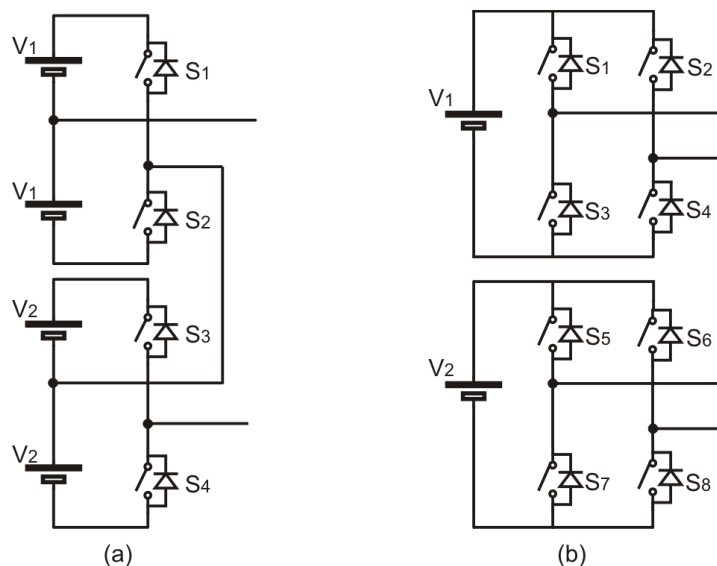


Figura 2.5 Sistemas multiníveis formados por inversores meia ponte (a) e inversores ponte completa (b)



A tensão gerada por este sistema multinível utilizando células dois níveis será dada conforme Figura 2.6. Considerando que  $V_2 > V_1$ .

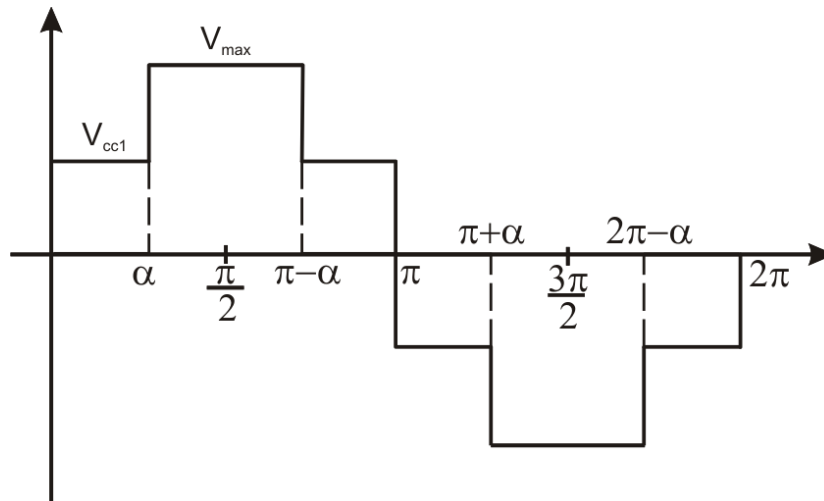


Figura 2.6 Forma de onda da tensão de saída para sistema multinível formado por dois inversores dois níveis

A partir disso é possível realizar o equacionamento de um sistema multinível. O qual é apresentado a seguir.

O valor máximo na saída do conversor multinível pode ser dado pela equação (2.5):

$$V_{max} = V_2 + V_1 \quad (2.5)$$

Onde  $V_1$  e  $V_2$  são as tensões de entrada de cada um dos inversores utilizados.

Já a relação entre as fontes  $V_1$  e  $V_2$  é definida por (2.6):

$$\gamma = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.6)$$

Onde  $\gamma > 1$

A partir das equações (2.5) e (2.6) foi realizada a análise harmônica do conversor multinível formado por inversores meia ponte. O valor de pico da

componente fundamental de  $V_0(t)$  é obtido através da série de Fourier da forma de onda apresentada na Figura 2.6, a qual é expressa por (2.7),

$$H_1 = \frac{4}{\pi} [V_2 + V_1 \cdot (2 \cdot \cos(\alpha) - 1)] \quad (2.7)$$

Onde  $V_1$  e  $V_2$  são as tensões de entrada dos inversores meia ponte e  $\alpha$  é o ângulo de comutação do sistema. Para a obtenção do ângulo,  $\alpha$ , é realizado o procedimento a seguir.

Primeiramente, a partir das equações (2.5) e (2.6) se obtém as tensões  $V_1$  e  $V_2$ , em função de  $V_{max}$  e  $\gamma$ . As equações resultantes são apresentadas em (2.8) e (2.9).

$$V_1 = \frac{V_{max}}{1 + \gamma} \quad (2.8)$$

$$V_2 = \frac{\gamma \cdot V_{max}}{1 + \gamma} \quad (2.9)$$

O valor de pico da componente fundamental da tensão de saída em função do índice de modulação de amplitude,  $m_a$ , e de  $V_{max}$ , dada por (2.10).

$$H_1 = m_a \cdot V_{max} \quad (2.10)$$

Logo, substituindo  $V_1$ ,  $V_2$  e  $H_1$ , respectivamente (2.8), (2.9) e (2.10) em (2.7), é possível obter uma equação que calcule o ângulo de disparo dos semicondutores,  $\alpha$ , conforme expresso em (2.11):

$$\alpha = \pi - \arccos \left[ \frac{1}{8} \cdot (4 \cdot \gamma - 4 - \pi \cdot m_a \cdot (1 + \gamma)) \right] \text{ [rad]} \quad (2.11)$$

Obtido o valor do ângulo de comutação, é possível obter o valor da THD da tensão de saída do sistema (2.12).

$$THD = \left( \frac{1}{H_1} \cdot \sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} H_n^2} \right) \cdot 100 \quad (2.12)$$

Onde  $H_n$  é o valor de pico do harmônico de ordem  $n$ . Uma vez que a tensão de saída possui simetria ímpar, esta somente possui harmônicos ímpares dados por (2.13):

$$H_n = \frac{4}{n \cdot \pi} [V_2 + V_1 \cdot (2 \cdot \cos(n \cdot \alpha) - 1)] \quad (2.13)$$

A partir do equacionamento apresentado, é possível então traçar uma curva ( $\gamma$  x  $THD$ ) com a qual se obtém o valor de  $\gamma$  que retorna uma THD mínima para um índice de modulação,  $m_a$ , unitário.

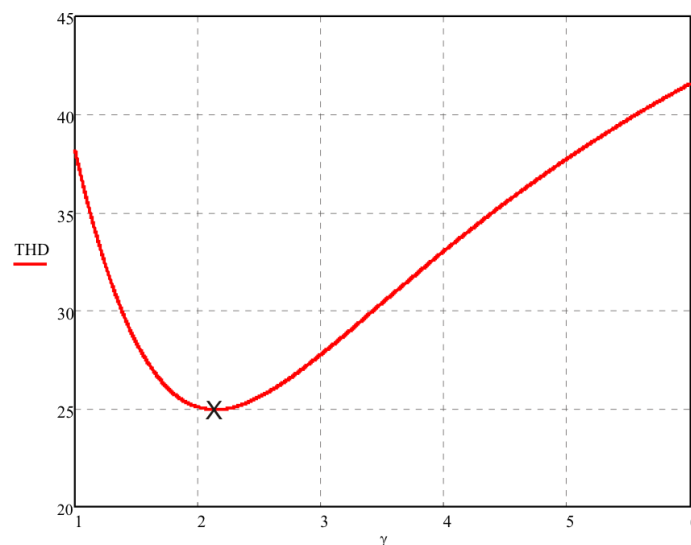


Figura 2.7 - Gráfico THD x  $\gamma$

A partir do gráfico da Figura 2.7, verifica-se que para a obtenção de uma THD mínima, a relação entre as fontes de entrada,  $\gamma$ , dever ser de 2.14. Utilizando a equação (2.11) obtém-se o ângulo  $\alpha = 48,46^\circ$  resultando assim em uma THD mínima em torno de 24,95%.

## 2.6 Conclusões

Neste capítulo foram realizados comentários sobre THD, uma vez que este será o índice de desempenho utilizado no decorrer da dissertação. Também foram realizadas considerações sobre eliminação seletiva de harmônicos, método que também será utilizado no decorrer do trabalho. Além disso, foram realizadas considerações sobre as topologias de inversores meia ponte, ponte completa e inversores conectados em cascata.

Foi realizado um estudo inicial, utilizando duas células dois níveis conectados em cascata. Neste estudo foi obtida a melhor relação entre as fontes de tensão de entrada capaz de gerar, juntamente com o ângulo de comutação também determinado no estudo, uma THD mínima para o sistema.

## Capítulo 3 Generalização dos inversores multiníveis em cascata

Neste capítulo será realizada a generalização do equacionamento apresentado no Capítulo 2. De posse dessas equações gerais, é possível obter as relações de tensão e ângulos de comutação que geram uma forma de onda de tensão de saída com uma THD mínima para o ponto de operação desejado.

### 3.1 Generalização

Tendo obtido no capítulo 2 a melhor relação de  $\gamma$  para um inversor multinível formado por dois inversores dois níveis em cascata, foi realizada a generalização do método, para ' $n$ ' inversores meia ponte conectados em série. Para tanto, foi utilizado um método baseado em algoritmos genéticos uma vez que à medida que se eleva o número de inversores conectados em cascata, eleva-se também o esforço computacional, devido ao considerável aumento das variáveis a serem definidas.

A tensão máxima do sistema será dada pela equação (3.1).

$$V_{max} = \sum_{1}^i V_i \quad (3.1)$$

Onde,  $m_a$  é o índice de modulação de amplitude e  $i$  é o número de inversores conectados em cascata.

Para obter uma equação generalizada para  $\gamma$ , foi considerado que a fonte de menor tensão,  $V_1$ , como valor base, ou seja:

$$\gamma_{inv-1} = \frac{V_{inv}}{V_1} \quad (3.2)$$

Utilizando as equações (3.1) e (3.2) é possível obter uma equação generalizada para obter as tensões de cada inversor em função de  $\gamma$  para  $n$  inversores em cascata. A menor tensão do sistema,  $V_1$ , é dada pela equação (3.3).

$$V_1 = \frac{m_a \cdot V_{max}}{1 + \sum_2^i \gamma_{i-1}} \quad (3.3)$$

As demais tensões seguem a equação (3.4).

$$V_{inv} = \frac{\gamma_{inv-1} \cdot m_a \cdot V_{max}}{1 + \sum_2^i \gamma_{i-1}} \quad (3.4)$$

Onde  $inv$  é o índice da tensão do inversor desejado.

Para obter os valores das componentes harmônicas foi utilizada a equação (3.5), obtida a partir da forma de onda da tensão de saída do sistema multinível:

$$H_n = \frac{4}{n \cdot \pi} \cdot [\Delta V_{cc_m} \cdot \cos(n \cdot \alpha_d)] \quad (3.5)$$

Onde ' $n$ ' é o valor da componente harmônica desejada, e  $\alpha_d$  é o valor do ângulo de comutação. Já  $\Delta V_{cc_m}$  é o valor do degrau da tensão de saída do sistema multinível. O valor dos degraus é dado por:

$$\Delta V_{cc_m} = V_{cc_{m+1}} - V_{cc_m} \quad (3.6)$$

Onde  $V_{cc_m}$  é o valor de cada um dos degraus que formam a tensão de saída do sistema. Este valor é obtido a partir da combinação das tensões dos inversores que compõem o sistema multinível.

### 3.2 Generalização de inversores multiníveis formados por células 2 níveis

A Figura 3.1, apresenta uma forma de onda generalizada para inversores multiníveis em cascata.

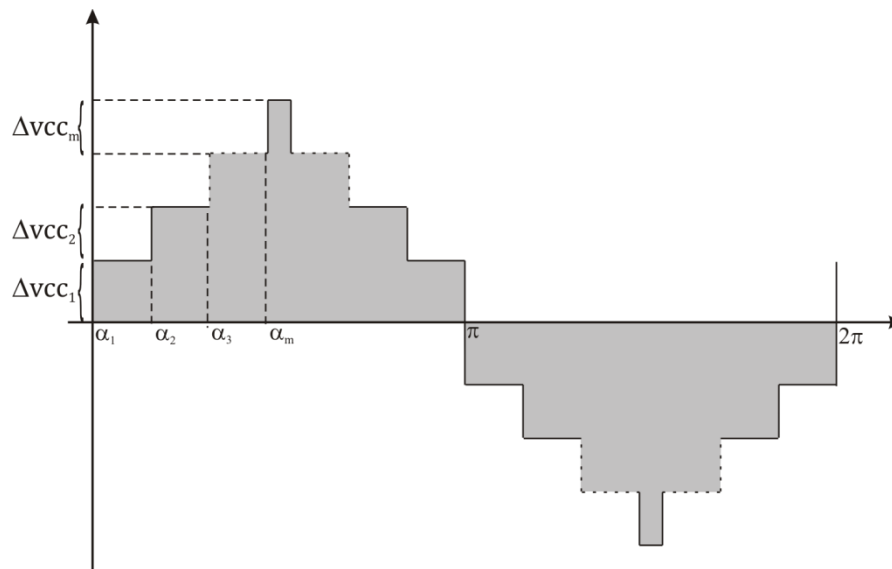


Figura 3.1 - Tensão de saída para n inversores dois níveis conectados em série

Já a Figura 3.2, mostra as tensões de cada inversor pertencente ao sistema multinível. Percebe-se que ao utilizar inversores com apenas 2 níveis de tensão o sistema apresentará momentos em que ao menos um dos inversores estará subtraindo sua tensão dos demais. A tensão  $V_3$  representa a tensão de saída do inversor de maior potência, operando na menor frequência. A tensão  $V_2$  representa a tensão de saída do inversor de potência intermediária. Já a  $V_1$  representa a tensão de saída do inversor de menor potência, operando com a maior frequência de comutação. Este procedimento é realizado independentemente do número de inversores assimétricos conectados em cascata. Ou seja, a frequência de comutação do inversor é inversamente proporcional à tensão de entrada do mesmo.

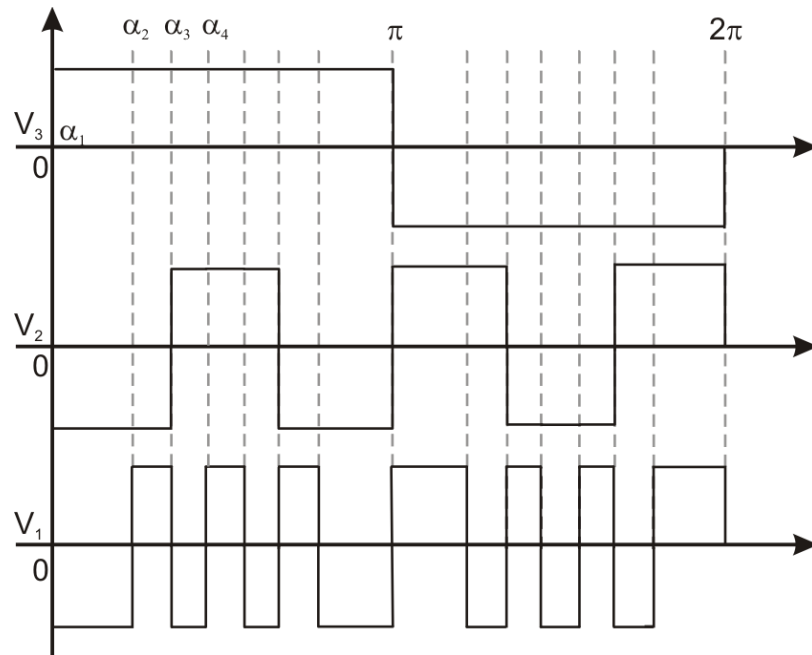


Figura 3.2 Níveis de tensão de três inversores meia ponte conectados em cascata

Sabendo que o número de níveis de saída do sistema,  $m$ , é dado pela equação (3.7) é possível obter o número de ângulos de comutação para  $i$  inversores em cascata (3.8),

$$m = 2^i \quad (3.7)$$

$$N_\alpha = \frac{m - 2}{2} \quad (3.8)$$

Onde,  $m$  é o número de níveis do sistema e  $N_\alpha$  é o número de ângulos de comutação. Logo, substituindo (3.7) em (3.8), é possível obter a equação (3.9) que fornece o número de ângulos de comutação somente em função do número de níveis do sistema.

$$N_\alpha = \frac{2^i - 2}{2} \quad (3.9)$$



### 3.3 Generalização de inversores multiníveis formados por células três níveis

A Figura 3.3, mostra a tensão de saída do sistema multinível formado por inversores 3 níveis.

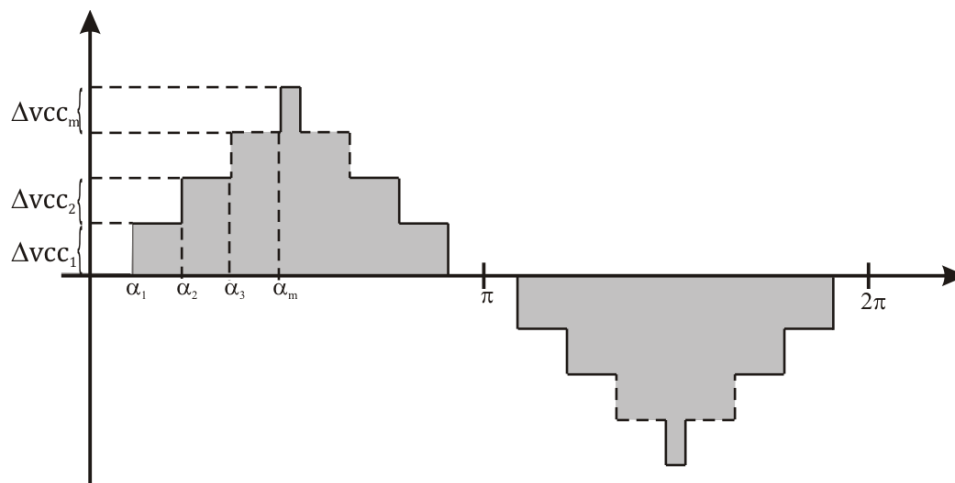


Figura 3.3 Tensão de saída para n inversores três níveis conectados em série

Para este sistema serão utilizados inversores ponte completa semelhante à topologia utilizada para gerar dois níveis de tensão de saída. Isto é possível, pois esta topologia caracteriza-se também por possibilitar gerar o zero de tensão de saída. As etapas de operação do inversor três níveis são apresentadas na Figura 3.4.

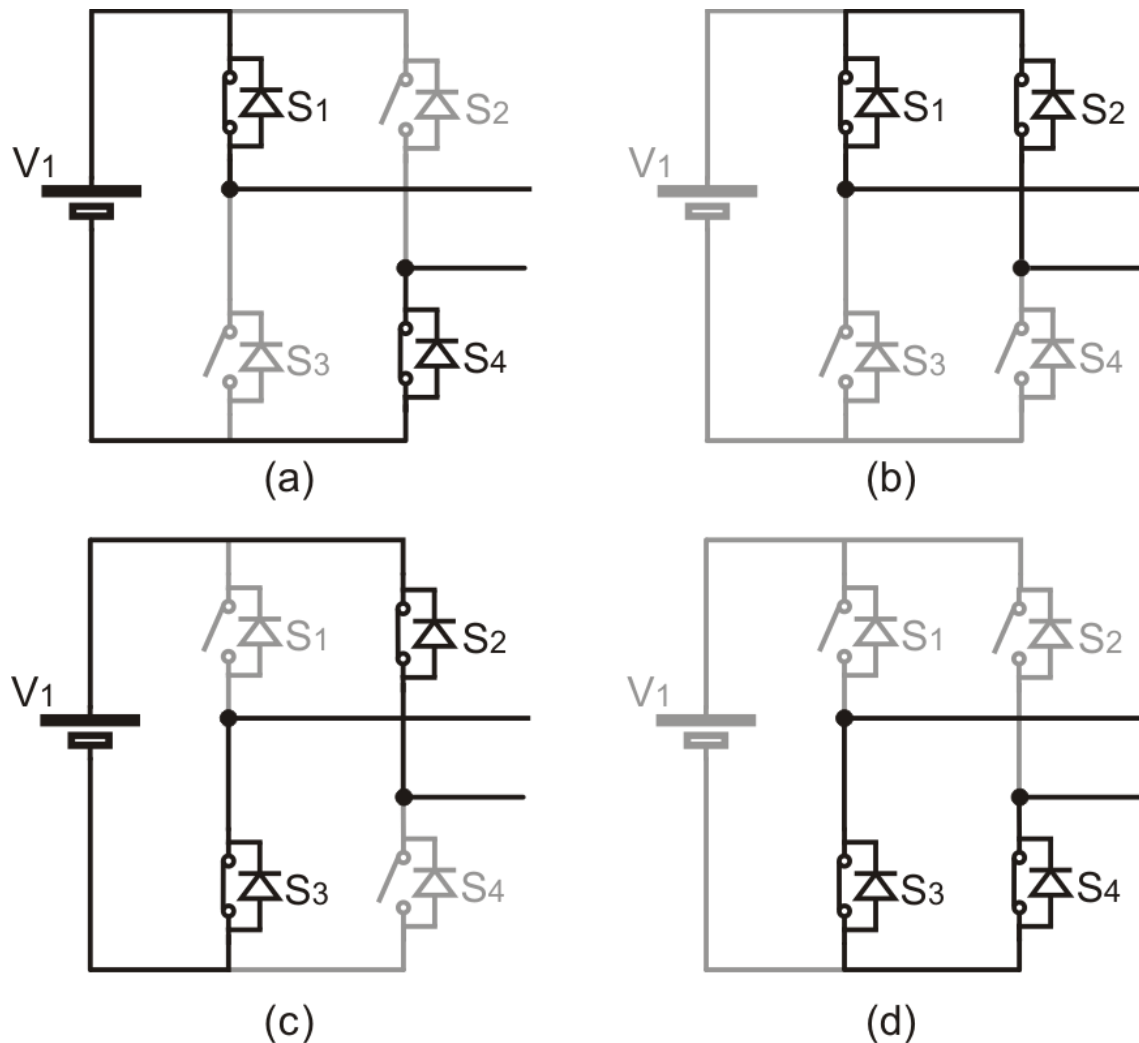


Figura 3.4 Etapas de operação de inversores ponte completa gerando três níveis de tensão de saída

Para a topologia ponte completa é necessário tomar as devidas precauções para não ativar simultaneamente os semicondutores do mesmo braço. Pois, a exemplo da topologia meia ponte, isto formaria um curto circuito no braço do inversor [49]. Para o sistema multinível, os inversores são conectados em série sendo que cada inversor possui 3 níveis na tensão de saída. Uma vez que as fontes de alimentação dos inversores são independentes entre si e possuem valores distintos, é possível, com duas células, gerar 9 níveis de tensão na saída do sistema, equação (3.10). Contudo ela somente é válida quando o sistema utilizar todas as combinações possíveis entre as fontes.

Logo, para obter o número de níveis de um sistema formado por inversores três níveis conectados em cascata, é possível utilizar a equação (3.10).

$$m = 3^i \quad (3.10)$$

O número de ângulos a serem obtidos é dado por (3.11).

$$N_\alpha = \frac{m - 1}{2} \quad (3.11)$$

Logo, substituindo (3.10) em (3.11) é possível obter o número de ângulos gerados para  $i$  inversores conectados em cascata, dado pela equação (3.12).

$$N_\alpha = \frac{3^i - 1}{2} \quad (3.12)$$

Contudo, é possível considerar uma configuração que não utiliza a subtração das fontes de tensão. Considerando este caso, o equacionamento a ser utilizado deve ser o apresentado abaixo.

O número de níveis em função do número de inversores em cascata é dado por (3.13).

$$m = 2^{i+1} - 1 \quad (3.13)$$

Já o número de ângulos, neste caso é dado por (3.14).

$$N_\alpha = 2^i - 1 \quad (3.14)$$

### 3.4 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados os inversores dois e três níveis, suas etapas de operação e formas de onda. Além disso, foi realizada a

generalização dos inversores citados. Possibilitando, desta forma, obter a relação ótima para  $n$  inversores conectados em cascata.

## Capítulo 4 Algoritmo Genético (GA)

Neste capítulo são realizados alguns comentários sobre Algoritmos Genéticos (GA – *Genetic Algorithm*). Uma breve revisão sobre o surgimento dos GA é realizada. Além disso, são explicados os princípios básicos do funcionamento do algoritmo. Esta revisão é realizada pois este algoritmo é utilizado no decorrer de toda a dissertação como ferramenta para obtenção dos ângulos de comutação.

Obtida a generalização dos sistemas multiníveis utilizando inversores dois e/ou três níveis em cascata é possível obter a relação de tensão,  $\gamma$ , que gere uma THD mínima para  $n$  inversores conectados em cascata. Contudo, à medida que se aumenta o número de inversores, a quantidade de variáveis a definir eleva-se consideravelmente, exigindo grande esforço computacional. Em função disso, são utilizados métodos de otimização a fim de reduzir o tempo necessário para a obtenção das variáveis de interesse.

Para amenizar este problema foi desenvolvido um algoritmo genético (GA – *Genetic Algorithm*) que busca um valor de  $\gamma$  que, combinado com os ângulos de comutação retornem a THD mínima para o ponto de operação desejado. Estes ângulos são obtidos de forma a eliminar as harmônicas de interesse.

### 4.1 Histórico sobre os Algoritmos Genéticos

As pesquisas envolvendo algoritmos evolucionários, ou seja, técnicas de busca baseadas no processo de evolução natural tiveram início na década de 1960 na Alemanha, na área de estratégias evolutivas, e nos Estados Unidos, onde suas pesquisas abrangiam problemas de otimização, auto-adaptabilidade de processos biológicos. Na década de 70 Holland desenvolveu algoritmos genéticos baseado nas teorias de seleção natural propostas por Darwin. Holland estudou a evolução das espécies propondo um modelo computacional heurístico que obtinha boa qualidade para problemas que não eram possíveis de serem resolvidos na época [50].

Estes algoritmos são baseados na teoria da evolução, onde é combinada a sobrevivência dos mais aptos, com a troca de informações de uma forma estruturada, ou seja, nestes algoritmos, um problema real é modelado através de um conjunto de indivíduos, sendo estes potenciais soluções que se ajustam ao ambiente [51].

## 4.2 Características dos Algoritmos Genéticos

Para facilitar o entendimento sobre algoritmos genéticos, é possível realizar uma analogia entre termos utilizados na biologia com módulos computacionais referentes a algoritmos genéticos.

É possível comparar os métodos para obtenção de resultados dos algoritmos genéticos à reprodução sexuada. Sendo que esta exige a presença de dois organismos que fazem a troca entre si de material genético [50]. Na reprodução sexuada, os elementos que fazem parte do processo são: genética, genes e alelos. Já, na técnica utilizada em algoritmos genéticos os elementos participantes do processo são: problemas de otimização, indivíduos, variáveis e valor das variáveis.

Para estes processos foi criada a correspondência apresentada na Tabela 4.1 [51]:

**Tabela 4.1 Correspondência entre expressões utilizadas na biologia com expressões utilizadas em algoritmos genéticos**

| Reprodução Sexuada | Algoritmo Genético      |
|--------------------|-------------------------|
| Genética           | Problemas de otimização |
| Cromossomos        | Indivíduos              |
| Genes              | Variáveis               |
| Alelos             | Valor das Variáveis     |

Nos algoritmos genéticos, é possível apresentar as definições associadas aos termos da biologia [23].

- Cromossomo: representa uma cadeia de caracteres representando alguma informação relativa às variáveis do problema. Cada indivíduo representa uma solução do problema;
- Genes: É a unidade do cromossomo. Cada cromossomo tem determinado número de genes, cada um descrevendo uma variável do problema;
- População: Conjunto de cromossomos ou soluções;
- Geração: O número de iterações que o algoritmo genético executa;
- Operações Genéticas: Operações que o algoritmo genético realiza sobre cada um dos cromossomos;
- Região Factível: Conjunto, espaço ou região que compreende as soluções factíveis do problema a ser otimizado. É caracterizado pelas funções de restrições, que definem as soluções factíveis do problema a ser resolvido.
- Função objetivo: É a função que se deseja otimizar. A função contém a informação do desempenho de cada indivíduo na população. Nesta função estão representadas as características do problema que o GA necessita para realizar seu objetivo.

Sendo que eles apresentam as seguintes vantagens em relação a outros métodos [51], [23]:

- São robustos e podem ser aplicados em diversos problemas;
- Não utilizam informações locais, não ficando presos a pontos ótimos locais como determinados métodos de busca. Sendo adequados para funções multimodais e de comportamento complexo.
- Não tem o desempenho comprometido por descontinuidades na função ou em suas derivadas. Isso ocorre devido o fato que os algoritmos genéticos não utilizam informações de derivadas para realizar suas evoluções;
- Apresentam bom desempenho para um grande número de problemas;
- São de fácil implementação e proporcionam flexibilidade no tratamento do problema a ser resolvido.

Contudo, por se tratarem de algoritmos estocásticos iterativos não é possível garantir a convergência do GA.[24].

O objetivo de um GA é minimizar ou maximizar uma função objetivo. As variáveis de entrada desta função são denominadas gene. Um conjunto de genes é chamado de cromossomo, já um conjunto de cromossomos é denominado população.

### **4.3 Passo-a-passo para implementação de um Algoritmo Genético**

A seguir é apresentado um procedimento para implementação de um algoritmo genético [51].

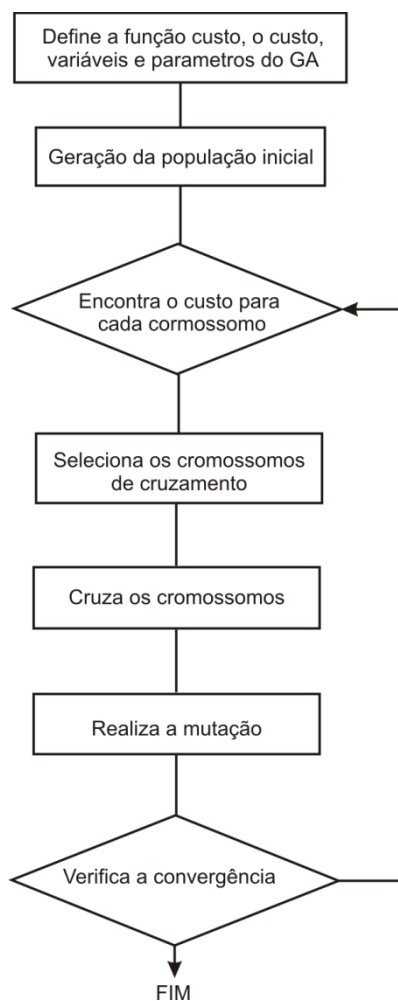
Primeiramente é necessário adequar toda a população segundo um critério determinado por uma função que meça a qualidade do individuo (função de aptidão ou *fitness*). Assim, os melhores indivíduos são aqueles que apresentam função de aptidão de melhor qualidade;

Deve ser estabelecida uma estratégia de seleção dos cromossomos como base para criação de um novo conjunto de cromossomos (nova população);

Após isso, é necessário definir um mecanismo para implementar os operadores genéticos de recombinação e mutação. A nova população é obtida aplicando sobre os cromossomos selecionados os operadores definidos previamente.

Este procedimento é repetido até que um cromossomo de qualidade aceitável seja obtido ou o número preestabelecido de passos seja atingido ou ainda o algoritmo não obtenha mais evoluções significativas. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma padrão exemplificando o funcionamento de um algoritmo genético padrão.





**Figura 4.1 Fluxograma de um algoritmo genético padrão**

A geração da população inicial normalmente é gerada de forma aleatória. Contudo, em alguns casos, a geração da população inicial se dá de maneira heurística. Desta forma, é possível adicionar na população inicial cromossomos com características desejadas, ou seja, que contenha soluções aproximadas conhecidas. A avaliação da população é feita utilizando uma função custo que indica a qualidade de cada cromossomo na população. Esta etapa é necessária para avaliar os cromossomos criados e assim selecionar os cromossomos que darão continuidade à criação de outros que possibilitem a evolução das características desejadas. Nesta etapa é medida a proximidade que o cromossomo está da solução desejada ou quão boa é a solução.

A função custo é importante, pois deve avaliar a qualidade dos cromossomos, diferenciando corretamente as soluções impróprias das desejadas. Caso a precisão na avaliação seja precária, uma solução ótima

pode ser descartada durante a execução do algoritmo, além de gastar um tempo computacional explorando soluções pouco promissoras [24].

Após a avaliação dos cromossomos de uma população deve ser criado um mecanismo que transmita a hereditariedade para as populações futuras, preservando as boas características. A seleção desses cromossomos é realizada baseando-se no princípio da sobrevivência dos melhores, isto é, os cromossomos com melhor custo possuem maior probabilidade de integrarem novas populações.

Vários métodos podem ser utilizados para selecionar os melhores cromossomos. Os métodos mais comuns são apresentados a seguir [21], [23], [51].

#### 4.3.1 Seleção por ranking

Neste método os cromossomos da população são ordenados de acordo com o valor de adequação e então a probabilidade de escolha é atribuída conforme a posição que ocupam.

#### 4.3.2 Seleção por roleta

Neste método, a população resultante da seleção natural deve ser ordenada em função do custo. Então, para cada cromossomo é atribuída uma probabilidade de seleção que pode estar associada ou ao seu custo, quanto a sua posição na tabela de ordenação dos melhores cromossomos. Este segundo método é o mais simples e direto para ser implementado na roleta. Além disso, este método garante que os melhores cromossomos recebam a maior probabilidade de gerar descendentes, ajudando no processo de convergência do algoritmo.

### 4.3.3 Seleção por torneio

Este é um dos métodos de mais simples implementação computacional além de obter bons resultados [21] - [23]. O objetivo do método é realizar um torneio entre um grupo de  $n$  ( $n \geq 2$ ) cromossomos obtidos de forma aleatória na população. O cromossomo com melhor custo entre o grupo é selecionado para integrar a nova população enquanto os perdedores são descartados. A seleção termina quando a quantidade de torneios se igualar ao tamanho da população.

## 4.4 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos são funções aplicadas nas populações que permitem obter novas populações. Uma vez selecionados os cromossomos da população, é realizada a recombinação e/ou mutação deles. Dessa forma, obtém-se uma nova população com melhores indivíduos ou não. Por várias gerações este procedimento é repetido até se obter um resultado satisfatório a fim de que a população se diversifique mantendo as características de adaptação das gerações anteriores.

Os algoritmos genéticos básicos são normalmente constituídos de dois operadores, recombinação e mutação.

O primeiro possibilita a troca de dois cromossomos (cromossomos-pais), desta forma ocorre uma troca de informações que gere uma probabilidade razoável dos cromossomos resultantes (cromossomos-filhos) serem melhores que os pais. O primeiro passo, para isso, é agrupar toda a população em pares de forma aleatória. A recombinação ocorre de forma aleatória, escolhendo uma taxa de recombinação gerando um número aleatório para cada par. Se o valor aleatório gerado for menor que a taxa de recombinação, a recombinação é permitida; caso contrário, os pares são mantidos inalterados [6]. Dois exemplos de operadores são:

- **Operadores de um ponto:** onde cada par de cromossomos a serem recombinados são divididos em um ponto escolhido de forma aleatória. Um novo cromossomo é criado permutando a metade inicial de um cromossomo, com a metade final do outro.
- **Operador multiponto:** é uma generalização do método anterior. Onde são escolhidos 2 ou mais pontos para dividir o cromossomo. Este método apresenta um desempenho melhor que o citado anteriormente.

Para criar uma maior variabilidade entre os descendentes, é utilizado um operador genético de mutação. Este operador realiza uma pequena alteração aleatória no código genético da qual garante que várias alternativas serão exploradas.

#### 4.5 Elitismo

Este parâmetro tem a função de elevar a velocidade de convergência do algoritmo preservando as melhores soluções obtidas na geração atual para gerações futuras. O processo mais simples realiza a cópia dos melhores indivíduos da população para a próxima geração, garantindo que as soluções não sejam eliminadas nas etapas de recombinação e mutação. Desta maneira os melhores cromossomos são passados para a próxima geração. Além disso, participarão da criação de novos cromossomos. A maior vantagem da utilização do elitismo é a garantia da convergência do sistema. Caso o ponto ótimo global seja obtido durante o processo, o algoritmo genético deve convergir para esta solução. Contudo, a desvantagem do método é que, como sempre existirá uma cópia ou mais dos melhores cromossomos, existe a possibilidade do algoritmo forçar a busca na direção de um ponto ótimo local que tenha sido obtido antes do ponto ótimo global [6].

## 4.6 Parâmetros de Controle do Algoritmo Genético

O correto uso dos parâmetros de controle (tamanho da população, taxa de recombinação, taxa de mutação) são itens fundamentais na estrutura do algoritmo genético. A escolha dos parâmetros é dependente de como será aplicado o GA. A eficiência e o funcionamento do algoritmo são dependentes dos parâmetros que serão descritos a seguir:

- Tamanho da população: indica o número de cromossomos em cada população. O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência do GA. Uma população muito pequena pode perder a diversidade necessária para convergir para uma solução adequada com mais facilidade. Isto ocorre, pois é fornecida uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Caso a população seja muito grande, o algoritmo perderá parte de sua eficiência uma vez que irá demorar para avaliar a função custo de todo o conjunto a cada iteração. Além disso, será necessário um maior esforço computacional.
- Taxa de Recombinação: indica a probabilidade que a recombinação entre os cromossomos selecionados na população irá ocorrer. Quanto maior a taxa, mais rápido novas estruturas são introduzidas na população. Contudo, caso a taxa seja muito elevada, ela poderá retirar rapidamente cromossomos de boa qualidade da população. Já valores baixos podem tornar a convergência do algoritmo muito lenta.
- Taxa de Mutação: indica a probabilidade com que ocorrerá a mutação nos cromossomos ao longo do processo de evolução. Este parâmetro é utilizado para possibilitar novas informações dentro da população, aumentando a diversidade populacional. Além disso, esta taxa permite uma maior varredura do espaço da busca. Porém, taxa muito elevada pode tornar a busca extremamente aleatória.

## 4.7 Conclusão

Neste capítulo foi realizada uma breve revisão sobre algoritmos genéticos. Foi apresentado um histórico sobre o método, mostrando suas semelhanças com a teoria evolutiva proposta por Darwin. Além disso, foram citadas as características e os principais parâmetros que devem ser considerados para o funcionamento eficaz de algoritmos genéticos.

É explicado o funcionamento de um algoritmo genético padrão uma vez que este pode ser utilizado para a obtenção de pontos ótimos para diversas aplicações. Este algoritmo é abordado, pois é utilizado para otimização do método de obtenção dos valores dos ângulos de comutação. Estes ângulos em conjunto com a relação de tensão de entrada dos inversores geram uma tensão de saída com uma THD mínima para o ponto de operação desejado. Esta otimização se faz necessária devido ao grande número de ângulos a serem obtidos à medida que o número de níveis da tensão de saída se eleva.

## Capítulo 5 Utilização de GA em Inversores multiníveis

Seguindo os procedimentos descritos no capítulo anterior, partiu-se em busca da obtenção da melhor relação de tensões,  $\gamma$ , bem como do melhor conjunto de ângulos de comutação,  $\alpha_n$  que, além de gerar a mínima THD, também elimine as harmônicas desejadas.

Para utilizar GA em sistema multinível é necessário definir os parâmetros de entrada, a função objetivo bem como suas restrições.

Os parâmetros de entrada são:

- a)  $\gamma$ , relação entre as fontes de tensão;
- b)  $m_a$ , índice de modulação de amplitude;
- c) Número de cromossomos;
- d) Taxa de seleção natural;
- e) Taxa de mutação;
- f) Número de Evoluções não significativas.

Sendo que os quatro últimos parâmetros são definições do algoritmo genético que influenciam diretamente no tempo de simulação.

A primeira restrição diz respeito ao valor dos ângulos, onde estes não devem ser menores que zero, nem maiores que  $90^\circ$  e devem ser distribuídos de forma crescente.

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \frac{\pi}{2};$$

Já a segunda restrição diz respeito às componentes harmônicas. A componente  $H_1$  refere-se à fundamental, seu valor é expresso em p.u. As demais são as componentes harmônicas que se deseja eliminar. O número de harmônicos possíveis de serem eliminados é igual a (n-1) ângulos de comutação uma vez que um dos graus de liberdade é utilizado para definir o valor da componente fundamental do sistema.

Para a obtenção da relação ótima de  $\gamma$  e dos ângulos  $\alpha_n$  que resultem em uma THD mínima do sistema, foi utilizado um algoritmo que alia as melhores características de um GA com a técnica de Eliminação Seletiva de Harmônicos (SHE – Selective Harmonic Elimination) [25] – [29]

### 5.1 Descrição do algoritmo utilizado

A função do GA neste programa é obter um conjunto de ângulos válidos que, em conjunto com  $\gamma$  retornem uma THD mínima para um determinado ponto de operação. Após o algoritmo obter um conjunto que melhor se enquadra aos parâmetros especificados, estes são utilizados como chute inicial no método de Eliminação Seletiva de Harmônicos. Obtendo assim um resultado mais preciso. A função da Eliminação Seletiva de Harmônicos é realizar apenas um ajuste nos ângulos obtidos pelo GA. Garantindo a obtenção do ponto mínimo global.

Os primeiros parâmetros a serem definidos no algoritmo são as harmônicas a serem eliminadas. Em seguida deve ser equacionado o valor das tensões de cada inversor utilizado no sistema multinível. De posse dos valores das tensões dos inversores são equacionados os níveis de tensão sintetizáveis pelo sistema. Após isso, os níveis de tensão são ordenados de forma crescente possibilitando assim uma tensão de saída em forma de escadas.

Em seguida são obtidas as amplitudes de cada degrau da tensão sintetizada uma vez que estes valores são necessários para obter o valor das componentes harmônicas.

Em seguida são colocados os parâmetros do algoritmo genético em si. São definidos o número de genes (ângulos a serem definidos). Também são definidas as restrições do sistema, como, por exemplo, as componentes harmônicas que se deseja eliminar.

Deve-se então criar os critérios de parada do algoritmo, definindo o número máximo de gerações, número máximo de gerações sem evolução significativa, entre outros.



Após a definição destes parâmetros, o algoritmo genético pode iniciar sua operação, criando conjuntos de ângulos que minimizam a função para obtenção da THD. Para tanto é necessário realizar uma varredura em determinada faixa de  $\gamma$ . Sendo que, cada valor de  $\gamma$  é utilizado no algoritmo, gerando assim um conjunto de ângulos. Após a obtenção de conjuntos de ângulos para toda a faixa de  $\gamma$  definida, é realizado uma comparação para obter o valor de  $\gamma$  que gera a mínima THD do sistema.

Contudo, à medida que se eleva o número de níveis, eleva-se também o número de ângulos a serem definidos sendo que diversas combinações de ângulos podem satisfazer as restrições estabelecidas. E estas combinações, podem não resultar em uma THD mínima global, e sim em uma THD mínima local. Em função disso, a combinação obtida a partir do GA é utilizada como chute inicial para o método de eliminação seletiva de harmônicos, que retorna ângulos de comutação mais precisos.

## 5.2 Exemplo de Projeto

Para exemplificar o exposto no início deste capítulo, será apresentado um exemplo de projeto utilizando um inversor multinível assimétrico formado por três inversores ponte completa conectados em cascata. Com esta configuração é possível gerar uma tensão de saída com 27 níveis.

### 5.2.1 Inversor multinível assimétrico com tensão de saída de 27 níveis

A Figura 5.1 apresenta em (a) o inversor multinível utilizado para exemplificar o método para obtenção da relação de tensão dos inversores além dos ângulos de comutação que minimiza a THD de tensão de saída. Já em (b) é apresentada a forma de onda da tensão de saída do sistema multinível assimétrico formado por 27 níveis. Para fins de simplificação é apresentado somente o semi-ciclo positivo. Já a Tabela 5.1 apresenta as possíveis combinações das tensões dos inversores que compõem o sistema multinível.

Cabe ressaltar que a Tabela 5.1 apresenta somente as possibilidades de combinações das tensões dos inversores do sistema. Sendo que a posição que

cada combinação de tensão irá ocupar na forma de onda de saída do sistema irá depender do valor de  $\gamma$  obtido no algoritmo. A única exigência do sistema é que o padrão da forma de onda de saída seja semelhante à apresentada na Figura 5.1(b). Além disso, o inversor de maior tensão é o de número 3 e o de menor tensão é o de número 1.

**Tabela 5.1 Possíveis combinações entre os três inversores do sistema multinível assimétrico**

| Nº de níveis de saída | Inversor 3 | Inversor 2 | Inversor 1 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| 13                    | 1          | 1          | 1          |
| 12                    | 1          | -1         | -1         |
| 11                    | 1          | -1         | 1          |
| 10                    | 1          | 1          | -1         |
| 9                     | 1          | -1         | 0          |
| 8                     | 1          | 0          | -1         |
| 7                     | 1          | 1          | 1          |
| 6                     | 1          | 1          | 0          |
| 5                     | 1          | 0          | 1          |
| 4                     | 1          | 0          | 0          |
| 3                     | 0          | 1          | 1          |
| 2                     | 0          | 1          | 0          |
| 1                     | 0          | 0          | 1          |
| 0                     | 0          | 0          | 0          |
| -1                    | 0          | 0          | -1         |
| -2                    | 0          | -1         | 0          |
| -3                    | 0          | -1         | -1         |
| -4                    | 0          | 0          | 0          |
| -5                    | -1         | 0          | -1         |
| -6                    | -1         | -1         | 0          |
| -7                    | -1         | -1         | -1         |
| -8                    | -1         | 0          | 1          |
| -9                    | -1         | 1          | 0          |
| -10                   | -1         | -1         | 1          |
| -11                   | -1         | 1          | -1         |
| -12                   | -1         | 1          | 1          |
| -13                   | -1         | -1         | -1         |

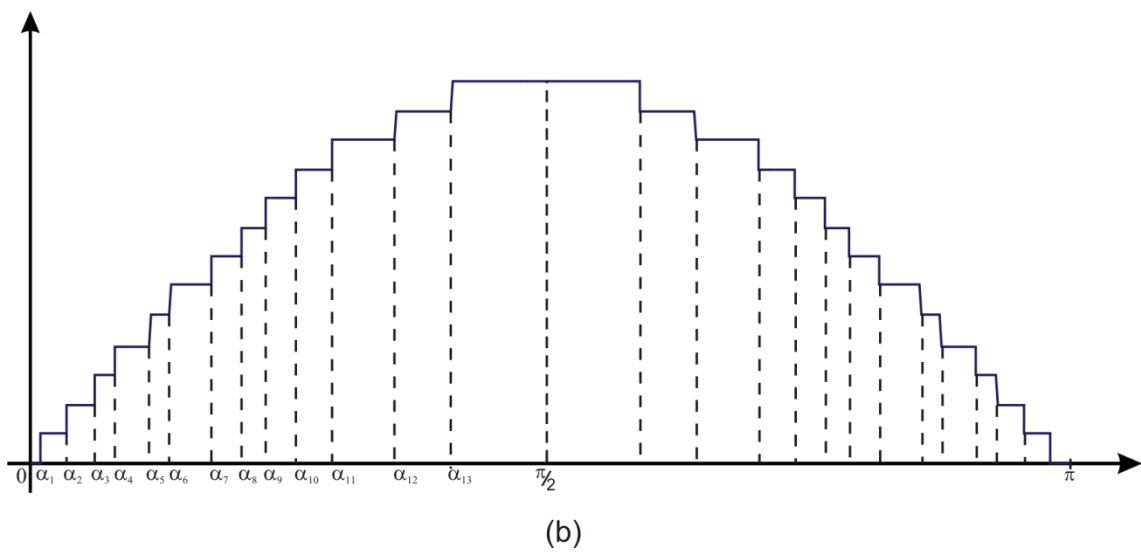
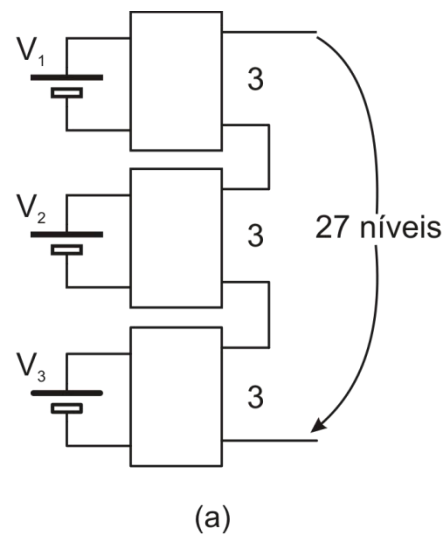


Figura 5.1 Sistema multinível assimétrico com 27 níveis (a) e semi ciclo positivo da tensão de saída do sistema citado (b)

5.2.2 Método para obtenção do valor de  $\gamma$  e valor do índice de modulação de amplitude,  $m_a$ .

Quando utilizado três inversores em cascata, serão obtidos dois valores de  $\gamma$  ( $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ ) sendo que estes valores são obtidos respectivamente a partir de (5.1) e (5.2).

$$\gamma_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (5.1)$$

$$\gamma_2 = \frac{V_3}{V_1} \quad (5.2)$$

Além disso, é considerado que sempre  $\gamma_2 > \gamma_1$ .

Determinando estes parâmetros é realizada uma variação nos valores de  $\gamma$ . O passo desta variação irá depender da precisão desejada, uma vez que, quanto menor o passo, maior será a precisão do algoritmo. Porém, o esforço computacional também será elevado, sendo que dependendo do número de  $\gamma$  a serem definidos, o algoritmo poderá levar muitas horas para cobrir todos os valores especificados para  $\gamma$ .

Para exemplo abordado, o passo  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  será de 0.01, sendo que o primeiro sofrerá variações de 1 até 10. Já a variação do segundo será do valor de  $\gamma_1$  até 15. Isso significa que, para cada valor de  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  sofrerá um incremento de 0.01 do valor de  $\gamma_1$  até 15.

Caso se queira variar o valor do índice de modulação de amplitude, deve ser realizado o mesmo procedimento. Sendo que, quanto menor o passo da variação de  $m_a$ , ainda maior será o tempo de simulação, pois para cada valor será necessário realizar uma varredura completa dos valores de  $\gamma$ . Podendo ser necessário dias para o GA retornar o resultado completo. Em função disso, para todos os resultados apresentados nesta dissertação, o valor do índice de modulação de amplitude foi fixado como sendo 1.

### 5.2.3 Escolha dos parâmetros do GA

Como já citado, alguns dos principais parâmetros de um algoritmo genético são o número de cromossomos, taxa de seleção natural, taxa de mutação e número de evoluções não significativas. Os parâmetros citados são importantes, pois influenciam diretamente no tempo de simulação e nos resultados obtidos.

A escolha destas variáveis depende muito da experiência do projetista e da velocidade de processamento do computador que será utilizado para a simulação. A Tabela 5.2 apresenta os valores dos parâmetros citados necessários para realizar a simulação utilizando três inversores ponte completa conectados em cascata. Cabe resaltar que estes valores podem ser modificados pelo projetista a fim de adequar o projeto à capacidade computacional disponível.

**Tabela 5.2 Valores utilizados nos parâmetros do algoritmo genético**

| Parâmetros do Algoritmo Genético | Valores determinados pelo projetista |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| Número de cromossomos            | 60                                   |
| Taxa de seleção natural          | 0,4                                  |
| Taxa de mutação                  | 0,7                                  |
| Evoluções não significativas     | 30                                   |

A Figura 5.2 apresenta um fluxograma completo do sistema implementado. Onde estão apresentadas as etapas de definição dos parâmetros antes de iniciar o algoritmo genético. No Anexo 1 são apresentados os algoritmos utilizados para a obtenção dos valores de  $\gamma$  e dos ângulos de comutação.

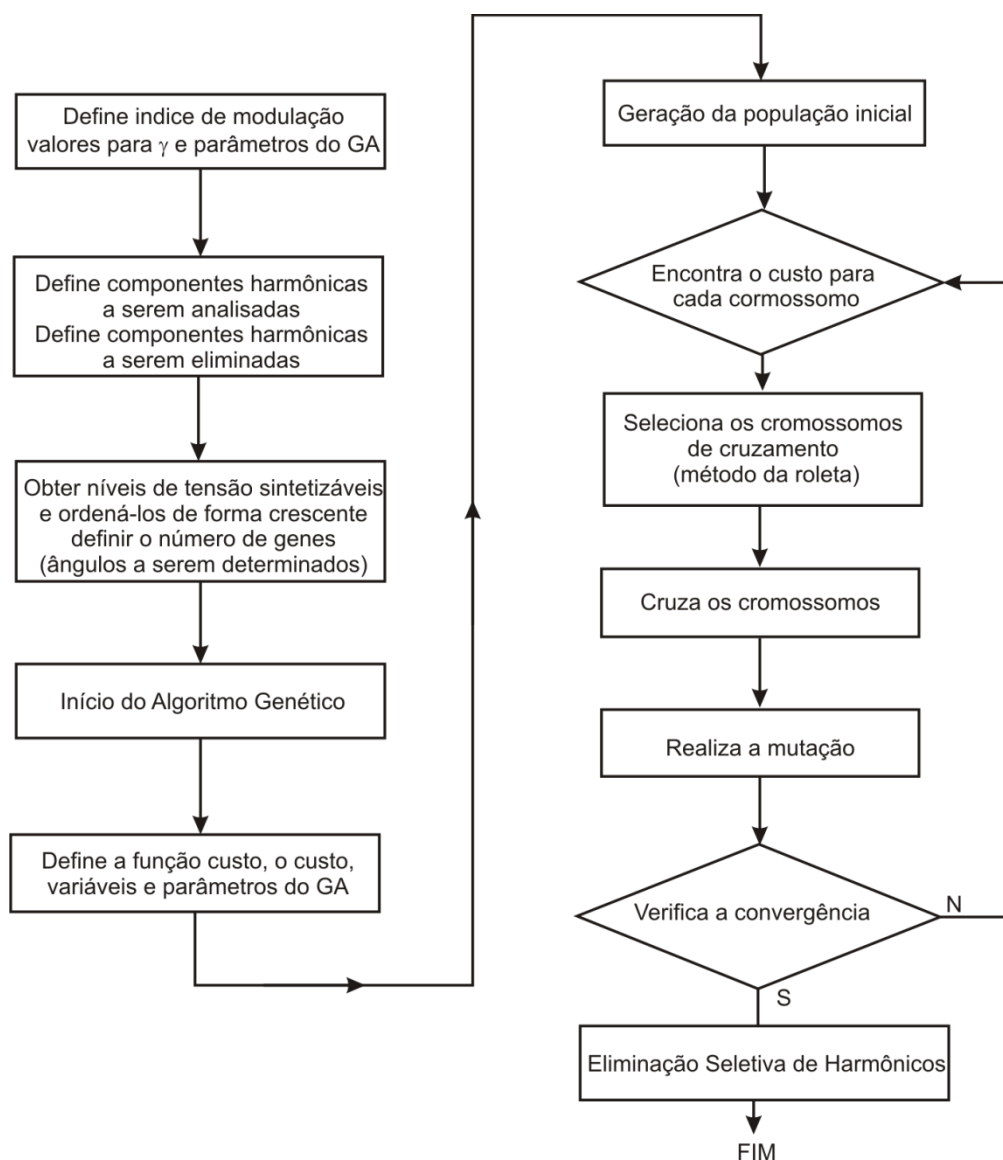


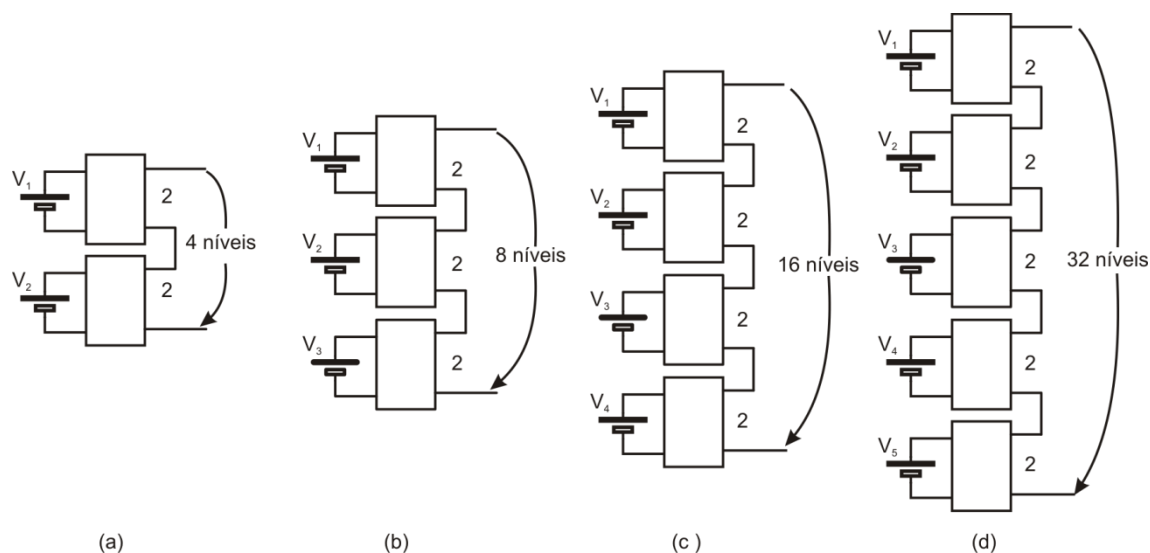
Figura 5.2 Fluxograma do algoritmo implementado

### 5.3 Inversores multiníveis formados por inversores dois níveis em cascata.

Os métodos utilizando algoritmos genéticos foram utilizados para a obtenção da melhor relação de tensão e as melhores combinações de ângulos de comutação de forma a obter a THD mínima para o sistema. Em um primeiro momento foram considerados somente inversores dois níveis.

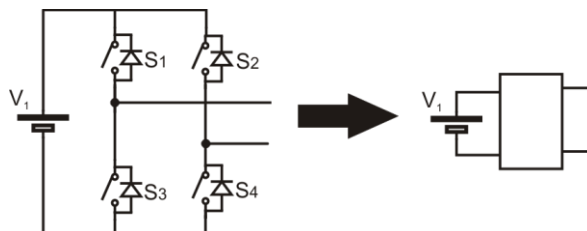
O primeiro caso utiliza dois inversores em cascata e já foi apresentado no capítulo dois, Figura 5.3 (a). O segundo caso utiliza três inversores em cascata, Figura 5.3 (b), gerando uma tensão de saída com 8 níveis, possuindo três

ângulos de comutação. Em seguida foi adicionado mais um inversor em cascata, Figura 5.3(c), gerando uma tensão de saída com 16 níveis e consequentemente 7 ângulos de comutação. A última análise envolvendo inversores dois níveis foi considerando 5 inversores conectados em cascata, Figura 5.3 (d), gerando dessa forma 32 níveis na saída do sistema e possuindo 15 ângulos de comutação.



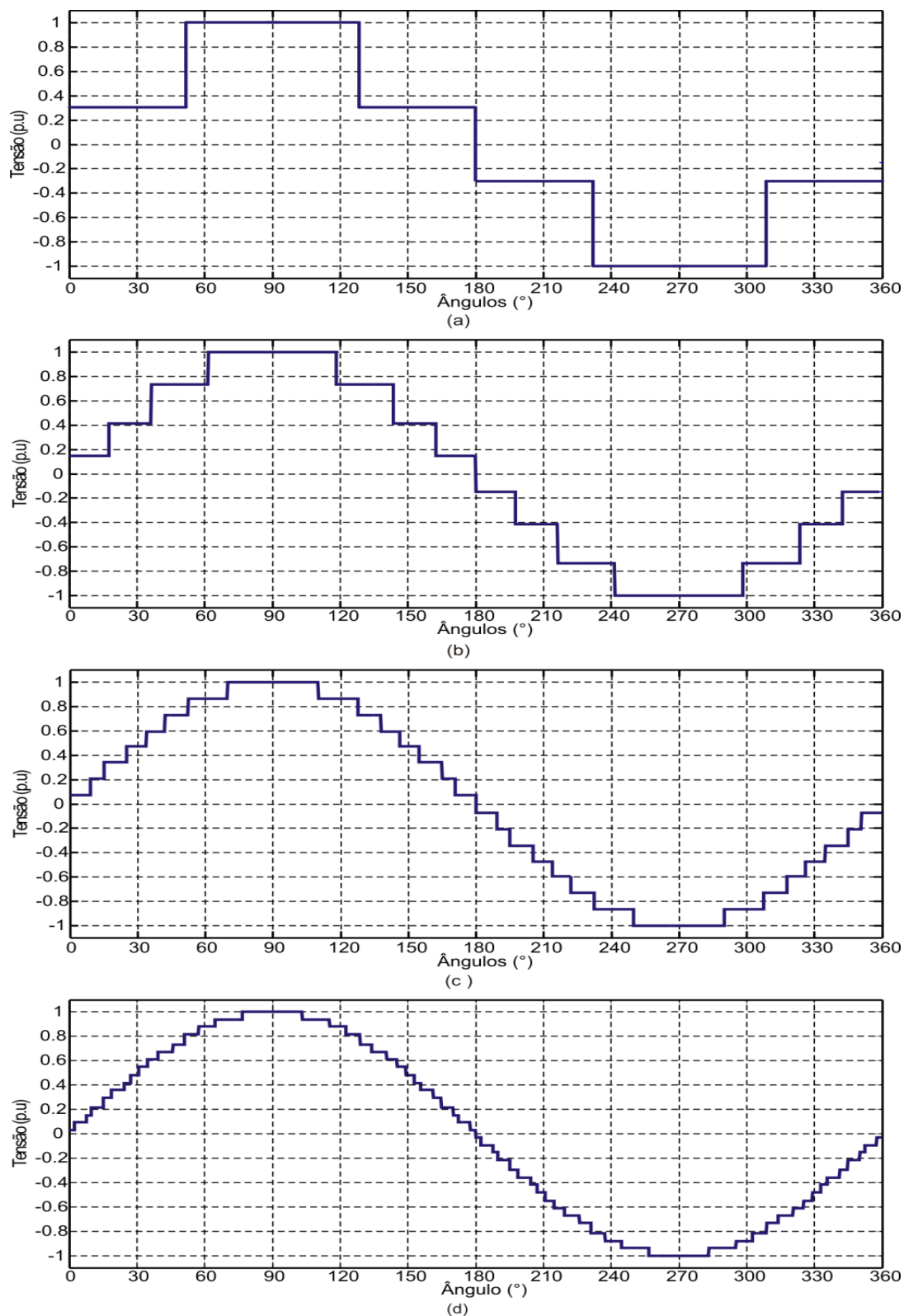
**Figura 5.3** Sistemas multiníveis com inversores dois níveis em cascata. (a) sistema multinível com tensão de saída de 4 níveis; (b) sistema multinível com tensão de saída de 8 níveis; (c) sistema multinível com tensão de saída de 16 níveis; (d) sistema multinível com 32 níveis

Onde, para fins de simplificação dos desenhos foi realizada a seguinte consideração, ilustrada na Figura 5.4. Onde o inversor ponte completa será comutado, em um primeiro momento, de forma a gerar dois níveis na tensão de saída.



**Figura 5.4** Simplificação de um inversor ponte completa

As formas de onda da tensão de saída para os sistemas multiníveis formados a partir de inversores dois níveis são apresentados na Figura 5.5. Onde é visível o aumento do número de níveis da tensão de saída.



**Figura 5.5 Tensão de saída dos sistemas multiníveis analisados. (a) Inversor multinível com 4 níveis; (b) Inversor multinível com 8 níveis na saída; (c) Inversor multinível com 16 níveis na saída ; (d) Inversor multinível com 32 níveis na saída**

A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros obtidos para inversores multiníveis com 4, 8, 16 e 32 níveis de tensão de saída. Estes sistemas



multiníveis são formados por inversores dois níveis. Em função disso, não são capazes de gerar nível zero. Na Tabela 5.3 também são apresentados os harmônicos que foram eliminados em cada um dos casos. Cabe ressaltar que, para nenhum dos casos apresentados neste trabalho foi especificada a eliminação das componentes harmônicas múltiplas de 3. Isto se deve ao fato que, como inversores multiníveis normalmente são utilizados em sistemas trifásicos, a eliminação das harmônicas múltiplas de 3 se dá naturalmente.

**Tabela 5.3 Resultados dos sistemas multiníveis utilizando inversores dois níveis**

| Parâmetros de interesse | Inversor 4 níveis | Inversor 8 níveis               | Inversor 16 níveis                                | Inversor 32 níveis                                |
|-------------------------|-------------------|---------------------------------|---|---|
| $V_1$                   | 0.318             | 0.1333                          | 0.06711   | 0.0317  |
| $V_2$                   | 0.682             | 0.2933                          | 0.1342  | 0.0602  |
| $V_3$                   | –                 | 0.57333                         | 0.2617  | 0.1330  |
| $V_4$                   | –                 | –                               | 0.5369  | 0.2597  |
| $V_5$                   | –                 | –                               | –   | 0.5155  |
| Harmônica eliminada     | –                 | 5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> |
| $\gamma_1$              | 2.14              | 2.2                             | 2   | 1.9   |
| $\gamma_2$              | –                 | 4.3                             | 3.9   | 4.2   |
| $\gamma_3$              | –                 | –                               | 8   | 8.2   |
| $\gamma_4$              | –                 | –                               | –   | 16.28   |
| <b>THD<sub>%</sub></b>  | 24.95             | 10.62                           | 4.94  | 2.46  |

É possível observar que para estas combinações a relação binária resulta na mínima THD da tensão de saída dos sistemas. A Tabela 5.4 contém os ângulos de comutação para os sistemas da Tabela 5.3.

**Tabela 5.4 Ângulos de comutação para os sistemas multiníveis formados a partir de inversores dois níveis**

| Inversor 4 níveis | Inversor 8 níveis | Inversor 16 níveis | Inversor 32 níveis |                      |
|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| $\alpha_0$ 0      | $\alpha_0$ 0      | $\alpha_0$ 0       | $\alpha_0$ 0       | $\alpha_9$ 34,69     |
| $\alpha_1$ 48,46° | $\alpha_1$ 17,61° | $\alpha_1$ 9,245°  | $\alpha_1$ 2,36°   | $\alpha_{10}$ 39,40  |
|                   | $\alpha_2$ 36,34° | $\alpha_2$ 15,06°  | $\alpha_2$ 7,65°   | $\alpha_{11}$ 46,05  |
|                   | $\alpha_3$ 61,60° | $\alpha_3$ 25,19°  | $\alpha_3$ 9,81°   | $\alpha_{12}$ 51,17  |
|                   |                   | $\alpha_4$ 33,88°  | $\alpha_4$ 15,26   | $\alpha_{13}$ 57,39° |
|                   |                   | $\alpha_5$ 42,08°  | $\alpha_5$ 18,71   | $\alpha_{14}$ 64,56  |
|                   |                   | $\alpha_6$ 52,34°  | $\alpha_6$ 24,34°  | $\alpha_{15}$ 76,76° |
|                   |                   | $\alpha_7$ 69,91°  | $\alpha_7$ 27,29°  |                      |
|                   |                   |                    | $\alpha_8$ 30,87°  |                      |

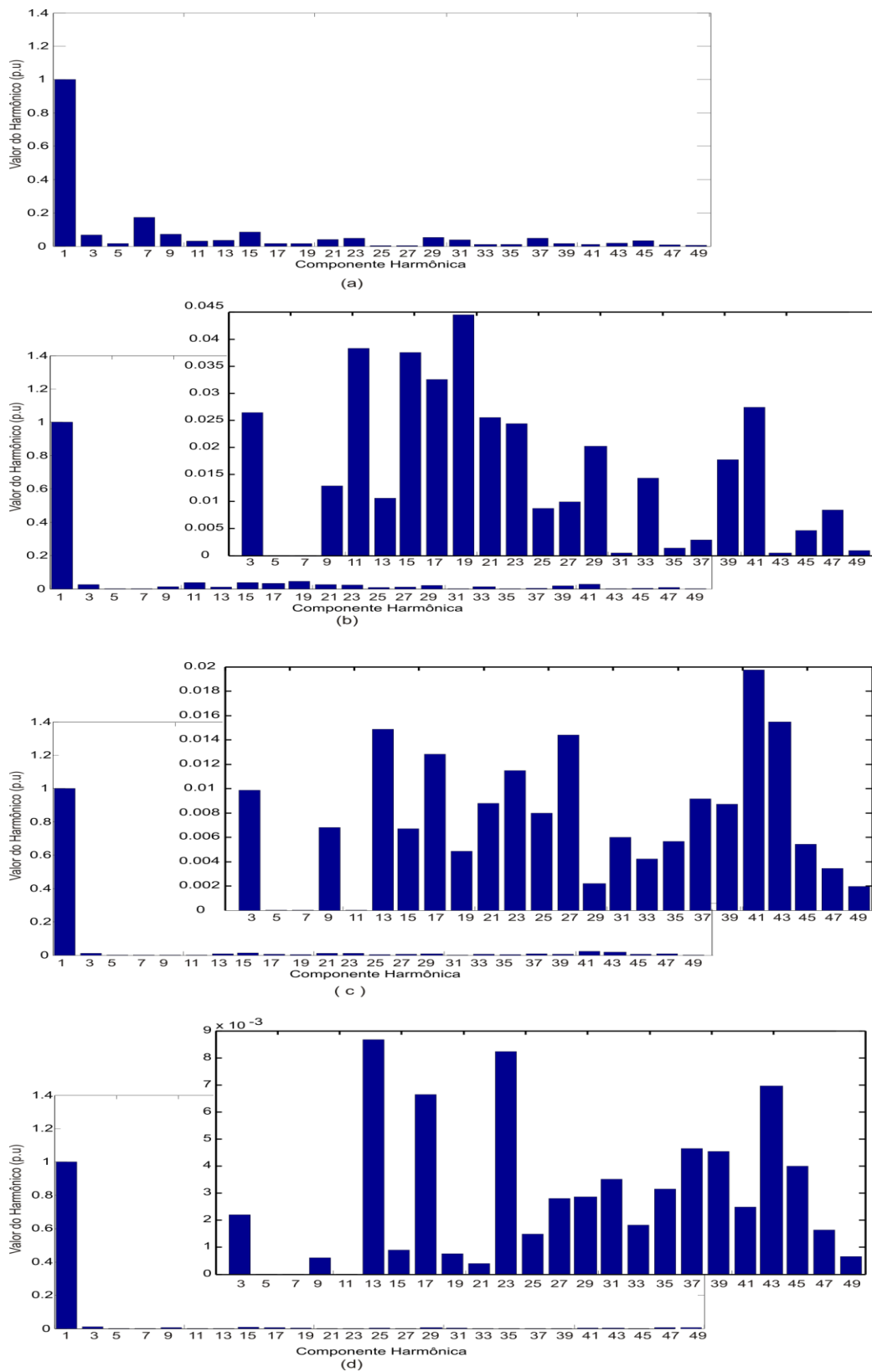
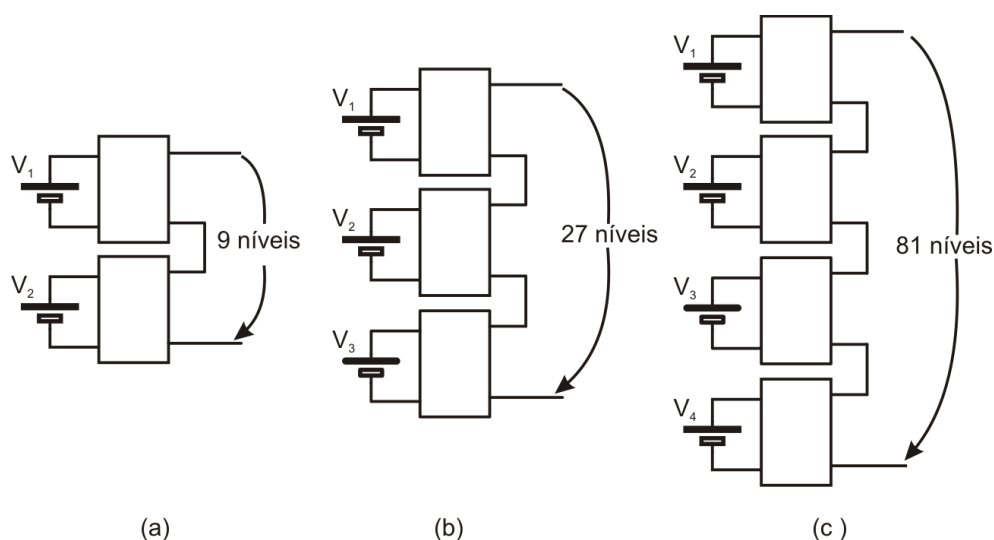


Figura 5.6 Espectro Harmônico para os quatro sistemas multiníveis utilizando inversores dois níveis. (a) duas células, (b) três células, (c) quatro células e (d) cinco células

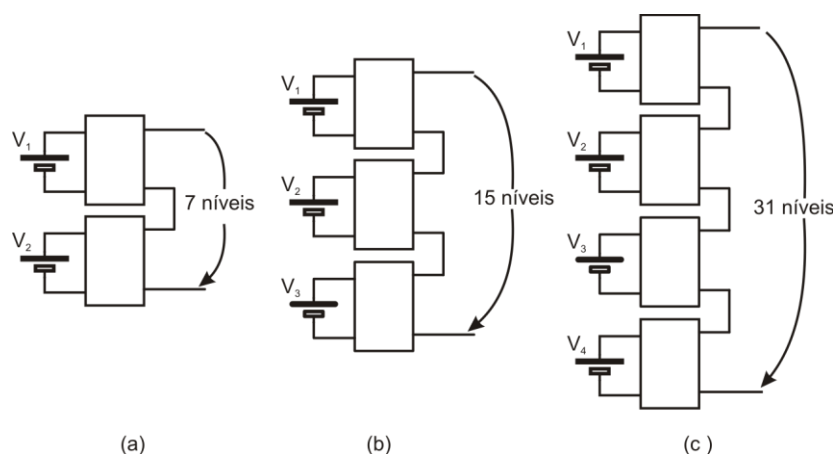
Os espectros harmônicos para os quatro sistemas utilizando inversores dois níveis são mostrados na Figura 5.6. Dos sistemas testados, somente no inversor com quatro níveis na saída não é possível realizar eliminação seletiva de harmônicos. Uma vez que o sistema possui somente um ângulo de comutação. É possível observar nos espectros harmônicos dos sistemas que, para os sistemas utilizando mais de dois inversores, é possível eliminar as componentes harmônicas de baixa ordem.

#### 5.4 Inversores multiníveis formados por inversores três níveis em cascata.

Quando utilizado inversores três níveis conectados em cascata, é possível se obter um aumento significativo de níveis na tensão de saída do sistema. A Figura 5.7 apresenta os sistemas considerados para o caso onde são utilizadas todas as combinações possíveis entre as fontes de tensão. Já, a Figura 5.8 apresenta uma representação do sistema onde foram consideradas somente as somas das tensões de entrada dos inversores.



**Figura 5.7** Sistemas multiníveis com inversores três níveis em cascata. (a) sistema multinível com tensão de saída de 9 níveis; (b) sistema multinível com tensão de saída de 27 níveis; (c) sistema multinível com tensão de saída de 81 níveis



**Figura 5.8** Sistemas multiníveis com inversores três níveis em cascata. (a) sistema multinível com tensão de saída de 7 níveis; (b) sistema multinível com tensão de saída de 15 níveis; (c) sistema multinível com tensão de saída de 31 níveis

A Tabela 5.5 apresenta os valores obtidos para sistemas utilizando todas as possibilidades de combinações de tensão dos sistemas apresentados na Figura 5.7. Percebe-se que a melhor relação entre tensões para este caso aproxima-se da relação trinária. É possível verificar também a considerável redução da THD do sistema. Para estes casos, foram eliminadas apenas as componentes harmônicas também apresentadas na Tabela 5.5. Não foi realizada a eliminação de outros componentes harmônicos em razão, principalmente, ao tempo de simulação que seria necessário para obter resultados válidos.

Para os sistemas com inversores três níveis, todas as combinações permitem eliminação seletiva de harmônicas. É possível observar na Figura 5.9 as formas de onda da tensão de saída dos sistemas multiníveis considerando todas as possibilidades de tensão. Os espectros harmônicos para os sistemas da Tabela 5.5, são apresentados na Figura 5.10. Percebe-se facilmente a eliminação das componentes harmônicas de baixa ordem. Destacando Figura 5.9(c) onde as componentes harmônicas de ordem 3, 9 e 15 foram eliminadas naturalmente, devido o método da busca de um ponto onde a THD é mínima, ou seja, sem a necessidade de selecionar tais componentes para a eliminação seletiva, mesmo tratando-se de um sistema monofásico.

Para sistemas multiníveis que utilizam somente combinações a partir da soma das tensões dos inversores três níveis. Foram realizadas simulações também para três casos, Figura 5.8. Os resultados contendo as relações de tensão e o valor da THD de tensão para os casos analisados são apresentados na Tabela 5.7. Já os ângulos de comutação são apresentados na Tabela 5.8.

Percebe-se que a melhor relação, que gera THD mínima, se dá para combinações muito próximas a relação binária.

Para a obtenção dos resultados obtidos, o tempo médio de simulação fica em torno de 3 a 4 horas. Sendo que, à medida que o número de níveis e ângulos aumenta, bem como o número de componentes harmônicas a serem eliminadas, ocorre também um maior esforço computacional para a obtenção dos resultados.

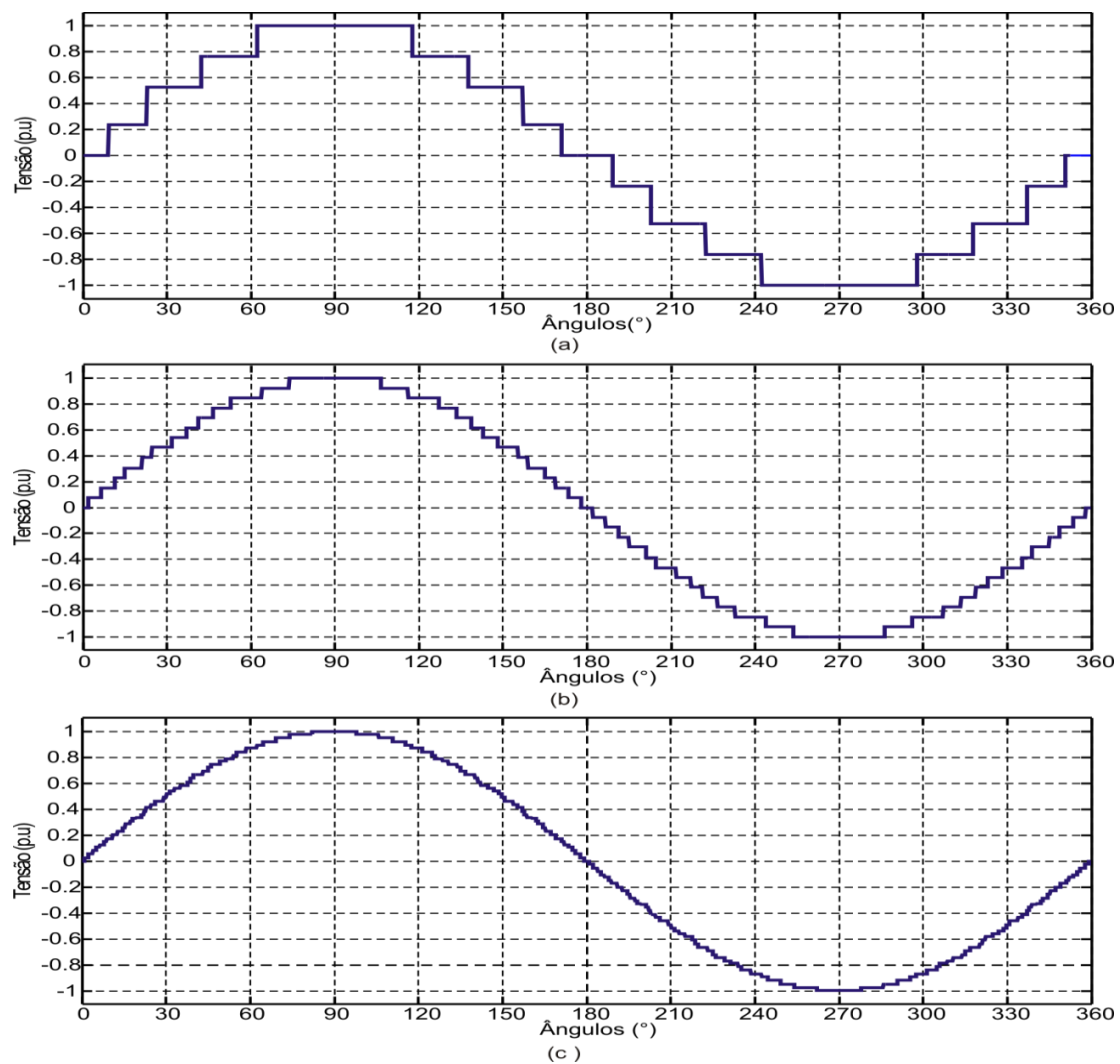
**Tabela 5.5 Resultados para sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis com todas as combinações de fontes possíveis**

| Parâmetros de interesse | Inversor 9 níveis                                 | Inversor 27 níveis                                | Inversor 81 níveis  |
|-------------------------|---|---|---|
| $V_1$                   | 0.2381  | 0.0763  | 0.0246  |
| $V_2$                   | 0.7619  | 0.229   | 0.0813  |
| $V_3$                   | –   | 0.6947  | 0.2291  |
| $V_4$                   | –   | –   | 0.665   |
| $V_5$                   | –   | –   | –   |
| Harmônicas Eliminadas   | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 9 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 15 <sup>a</sup> |
| $\gamma_1$              | 3.2   | 3   | 3.3   |
| $\gamma_2$              | –   | 9.1   | 9.3   |
| $\gamma_3$              | –   | –   | 27  |
| <b>THD<sub>%</sub></b>  | 9.5   | 3.0157  | 0.8561  |

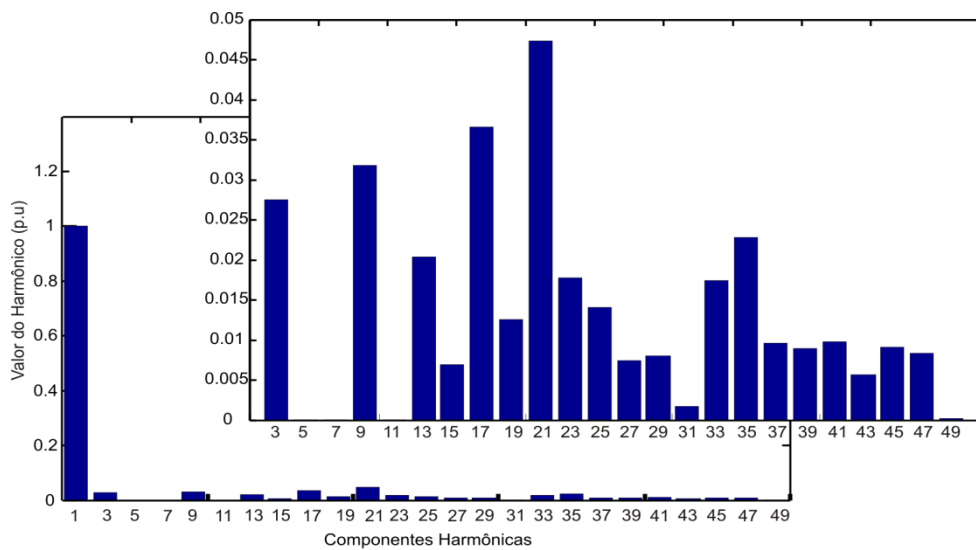
A Tabela 5.6 apresenta os ângulos de comutação para os sistemas multiníveis testados que utilizam inversores três níveis conectados em cascata.

**Tabela 5.6 Ângulos de comutação para sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis com todas as combinações de fontes possíveis**

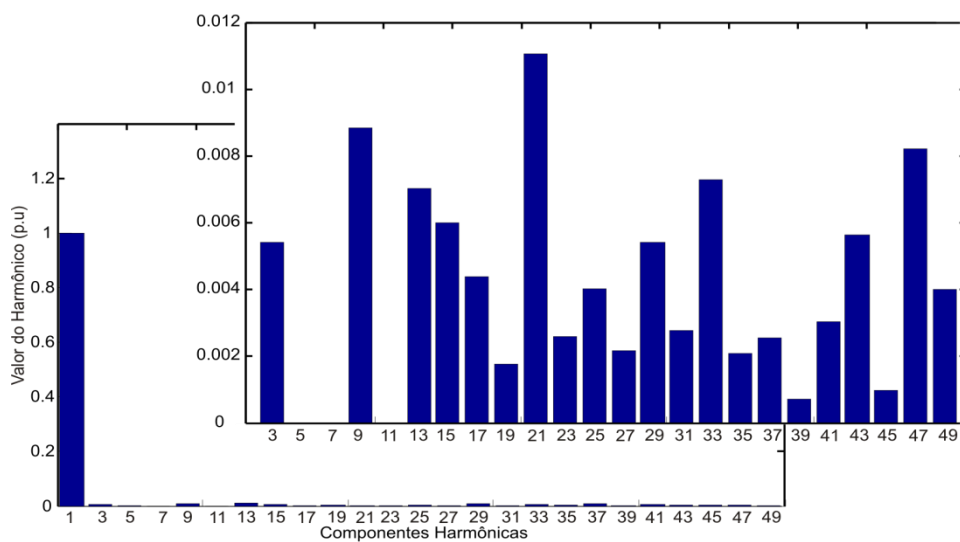
| Inversor 9 níveis |          | Inversor 27 níveis |          | Inversor 81 níveis |          |
|-------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| $\alpha_1$        | 9,137°   | $\alpha_1$         | 1,3999°  | $\alpha_1$         | 1,2074°  |
| $\alpha_2$        | 22,9366  | $\alpha_2$         | 7,0152°  | $\alpha_2$         | 2,0591°  |
| $\alpha_3$        | 42,1902° | $\alpha_3$         | 10,2176° | $\alpha_3$         | 3,6332°  |
| $\alpha_4$        | 62,1902° | $\alpha_4$         | 13,5118° | $\alpha_4$         | 5,5344°  |
|                   |          | $\alpha_5$         | 21,0181° | $\alpha_5$         | 7,7627°  |
|                   |          | $\alpha_6$         | 25,5909° | $\alpha_6$         | 8,2550°  |
|                   |          | $\alpha_7$         | 30,3874° | $\alpha_7$         | 9,0846°  |
|                   |          | $\alpha_8$         | 35,2261° | $\alpha_8$         | 10,3891° |
|                   |          | $\alpha_9$         | 40,1517° | $\alpha_9$         | 12,6987° |
|                   |          | $\alpha_{10}$      | 46,4473° | $\alpha_{10}$      | 14,0032° |
|                   |          | $\alpha_{11}$      | 54,1457° | $\alpha_{11}$      | 15,3607° |
|                   |          | $\alpha_{12}$      | 61,5585° | $\alpha_{12}$      | 16,5322° |
|                   |          | $\alpha_{13}$      | 77,5910° | $\alpha_{13}$      | 18,6419° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{14}$      | 19,1706° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{15}$      | 20,6370° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{16}$      | 21,7898° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{17}$      | 23,4859° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{18}$      | 25,6766° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{19}$      | 26,7817° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{20}$      | 27,8108° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{21}$      | 30,8147° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{22}$      | 32,2596° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{23}$      | 32,5024° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{24}$      | 34,2894° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{25}$      | 36,8394° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{26}$      | 38,5860° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{27}$      | 40,9244° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{28}$      | 42,4466° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{29}$      | 45,2543° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{30}$      | 47,7092° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{31}$      | 48,9725° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{32}$      | 51,2287° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{33}$      | 52,6594° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{34}$      | 55,5764° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{35}$      | 58,6791° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{36}$      | 61,6706° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{37}$      | 65,6043° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{38}$      | 69,2758° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{39}$      | 73,4542° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{40}$      | 82,3364° |



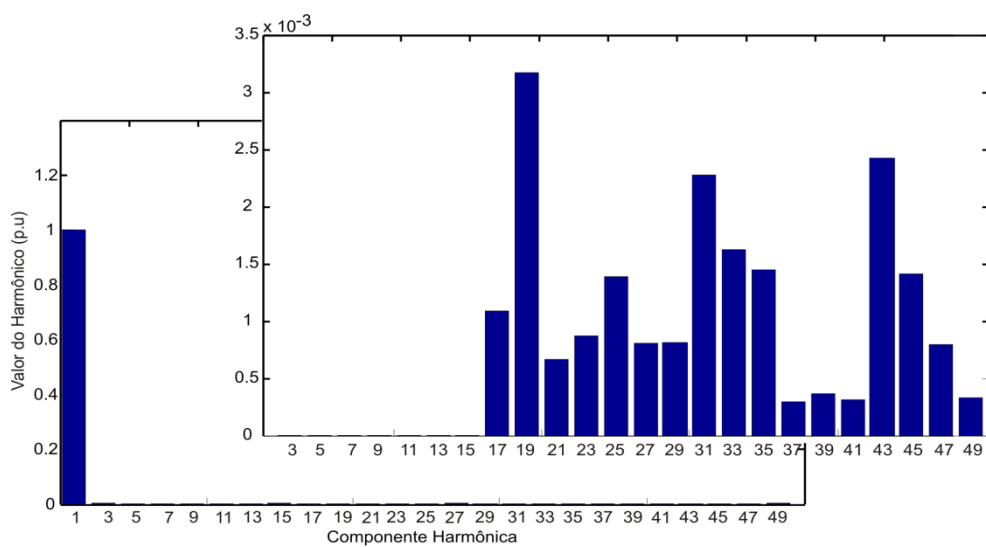
**Figura 5.9** Tensão de saída dos sistemas multiníveis analisados. (a) Inversor multinível com 9 níveis na saída; (b) Inversor multinível com 27 níveis na saída; (c) Inversor multinível com 81 níveis na saída



(a)



(b)



(c)

Figura 5.10 Espectro harmônico para os três sistemas multiníveis testados. (a) sistema com 9 níveis de saída, (b) sistema com 27 níveis de saída, (c) sistema com 81 níveis de saída

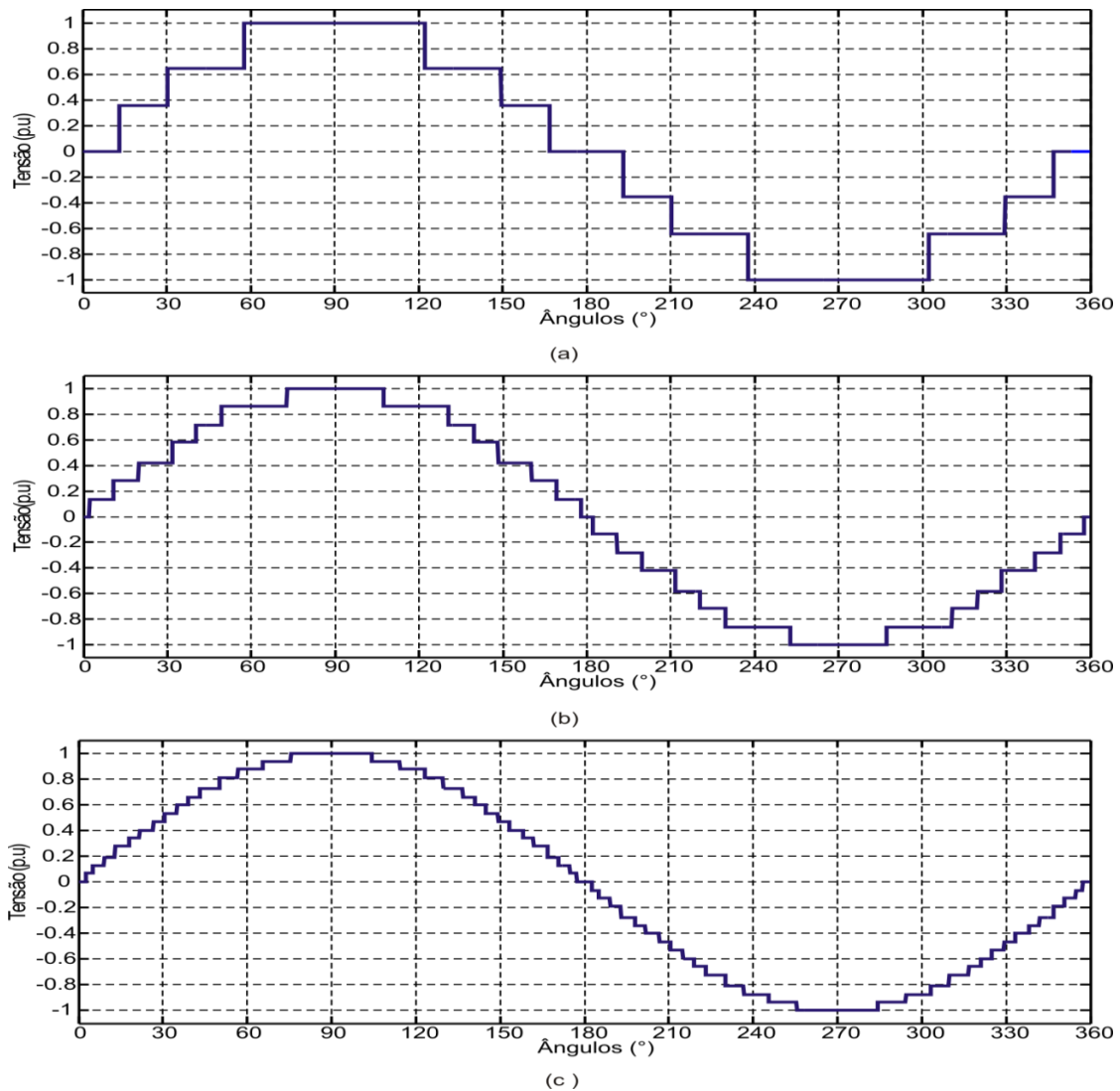


**Tabela 5.7 Resultados para sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis com combinações obtidas apenas a partir da soma das fontes**

| Parâmetros de interesse | Inversor 7 níveis               | Inversor 15 níveis                                | Inversor 31 níveis  |
|-------------------------|---------------------------------|---|---|
| $V_1$                   | 0.3546                          | 0.1362  | 0.0658  |
| $V_2$                   | 0.6464                          | 0.2820  | 0.1250  |
| $V_3$                   | –                               | 0.5817  | 0.2763  |
| $V_4$                   | –                               | –   | 0.5329  |
| Harmônicas eliminadas   | 5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> |
| $\gamma_1$              | 1.82                            | 2.07  | 1.9   |
| $\gamma_2$              | –                               | 4.27  | 4.2   |
| $\gamma_3$              | –                               | –   | 8.1   |
| <b>THD</b> <sub>%</sub> | 12.961                          | 5.1934  | 2.64  |

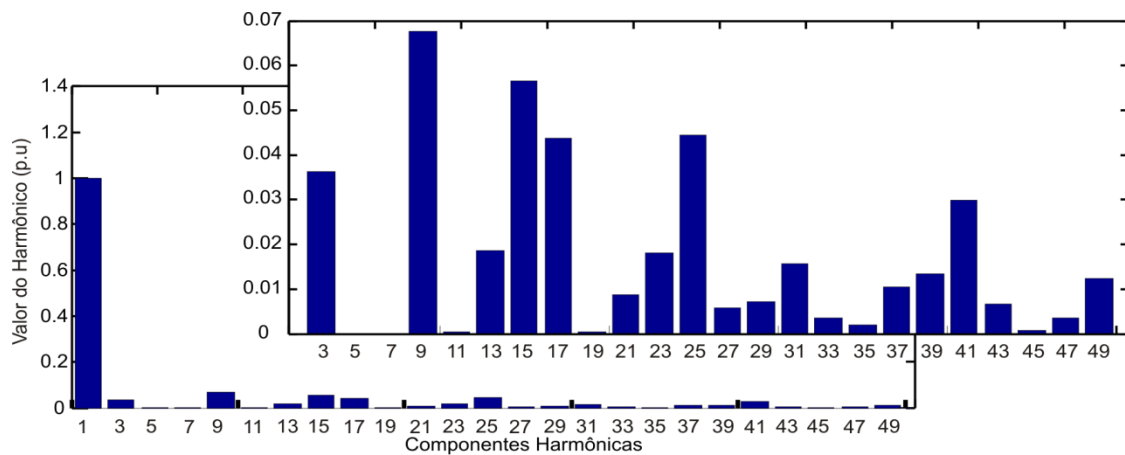
**Tabela 5.8 Ângulos de comutação para sistemas multiníveis com inversores três níveis utilizando somente a soma das tensões das fontes**

| Inversor 7 níveis |          | Inversor 15 níveis |          | Inversor 31 níveis |          |
|-------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| $\alpha_1$        | 13,1571° | $\alpha_1$         | 4,7204°  | $\alpha_1$         | 2,6514°  |
| $\alpha_2$        | 30,4884° | $\alpha_2$         | 12,2764° | $\alpha_2$         | 4,1506°  |
| $\alpha_3$        | 57,6940° | $\alpha_3$         | 21,3052° | $\alpha_3$         | 8,0538°  |
|                   |          | $\alpha_4$         | 30,5470° | $\alpha_4$         | 13,4360° |
|                   |          | $\alpha_5$         | 42,1539° | $\alpha_5$         | 17,1221° |
|                   |          | $\alpha_6$         | 52,0022° | $\alpha_6$         | 22,5798° |
|                   |          | $\alpha_7$         | 69,0534° | $\alpha_7$         | 26,5686° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_8$         | 29,9511° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_9$         | 34,2056° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{10}$      | 39,7965° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{11}$      | 43,8584° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{12}$      | 48,2390° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{13}$      | 57,3064° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{14}$      | 65,9740° |
|                   |          |                    |          | $\alpha_{15}$      | 76,8559° |

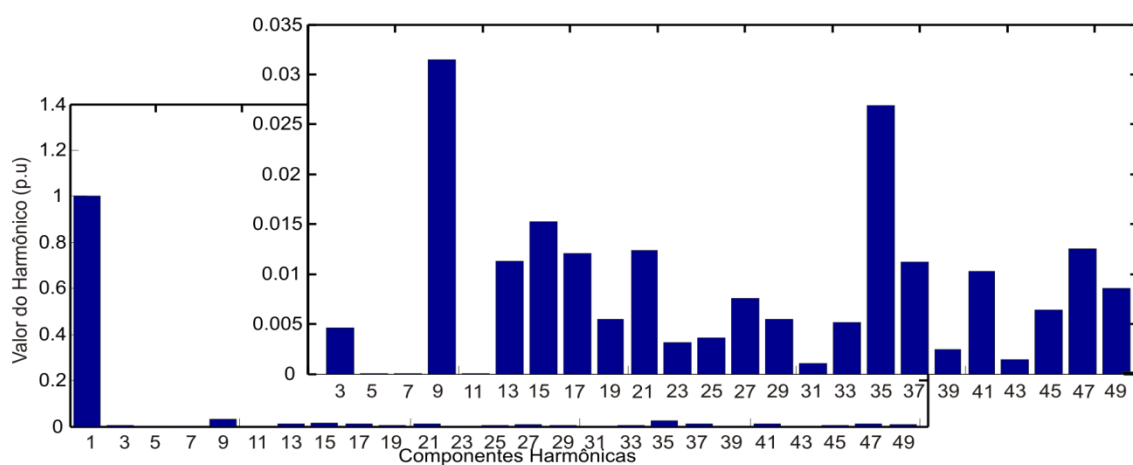


**Figura 5.11** Tensão de saída dos sistemas multiníveis considerando somente a soma das tensões. (a) Inversor multinível com 7 níveis na saída; (b) Inversor multinível com 15 níveis na saída; (c) Inversor multinível com 31 níveis na saída

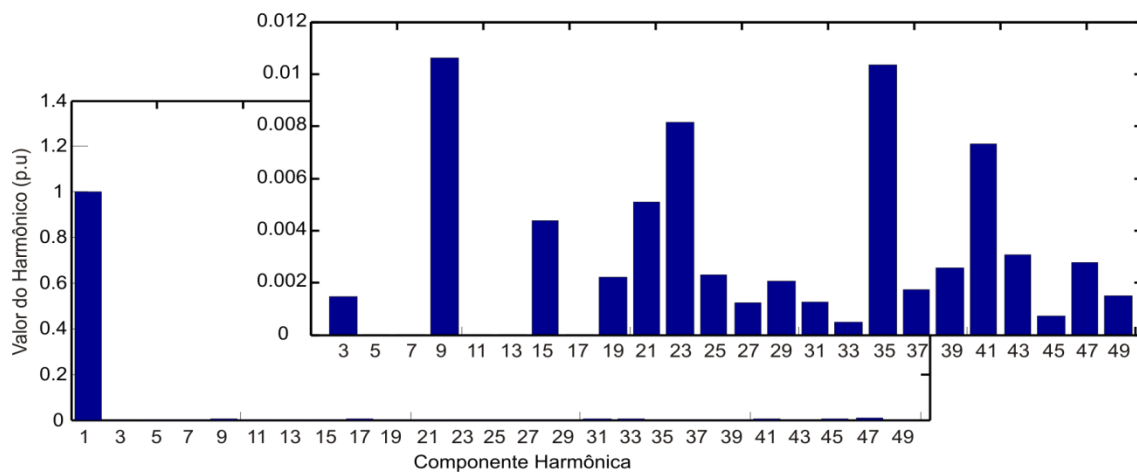
Na Figura 5.12, a exemplo das simulações utilizando inversores dois níveis e com todas as combinações utilizando inversores três níveis, é possível observar a eliminação seletiva das harmônicas de baixa ordem. Neste caso, as harmônicas múltiplas de 3 não são eliminadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.12 Espectro harmônico para os três sistemas multiníveis testados. (a) sistema com 7 níveis de saída, (b) sistema com 15 níveis de saída, (c) sistema com 31 níveis de saída

## 5.4 Conclusões

Neste capítulo foi realizada a análise para sistemas multiníveis utilizando inversores dois e três níveis conectados em cascata. Foram obtidas as relações de tensão entre as fontes de entrada dos inversores que, em conjunto com os ângulos de comutação, geram uma THD mínima para tensão de saída do sistema.

Para os sistemas multiníveis utilizando inversores dois níveis, foram realizadas análises para três sistemas, além do já analisado no Capítulo 2. Na Tabela 5.3 fica claro que a melhor relação entre as tensões de entrada, quando utilizado inversores dois níveis, é a relação binária. Contudo um problema apresentado por essa topologia é a incapacidade de geração do nível zero de tensão conforme pode ser verificado na Figura 5.5.

A relação binária também é a ideal quando são utilizados inversores três níveis, desde que sejam utilizadas apenas as combinações de tensões resultantes da soma das fontes. A Tabela 5.7 contém os parâmetros encontrados para esta topologia e a Figura 5.11 as formas de onda para os três casos estudados.

Já quando são utilizados inversores três níveis considerando todas as combinações possíveis entre as fontes obtêm-se as tensões de saída conforme a Figura 5.9. Onde os valores das relações de tensão ficam muito próximos a configuração trinária, conforme pode ser verificado na Tabela 5.5.

## Capítulo 6 Combinações entre sistemas híbridos assimétricos formados por conjuntos de inversores simétricos

Neste capítulo será realizado estudo considerando sistemas híbridos assimétricos formados por conjuntos de inversores multiníveis simétricos conectados em série.

A análise realizada nos capítulos anteriores, a qual se buscou obter uma relação entre as tensões de entrada resultando em uma THD mínima para o sistema foi realizada utilizando inversores três níveis assimétricos conectados em cascata. Utilizando células simétricas em inversores multiníveis ocorre uma redundância em relação aos níveis de tensão, reduzindo o número de níveis sintetizáveis. A Figura 6.1 apresenta um exemplo de inversor multinível utilizando inversores simétricos em cascata, Figura 6.1 (a), bem como a representação das tensões de saída de cada inversor e a tensão equivalente do sistema, Figura 6.1 (b).

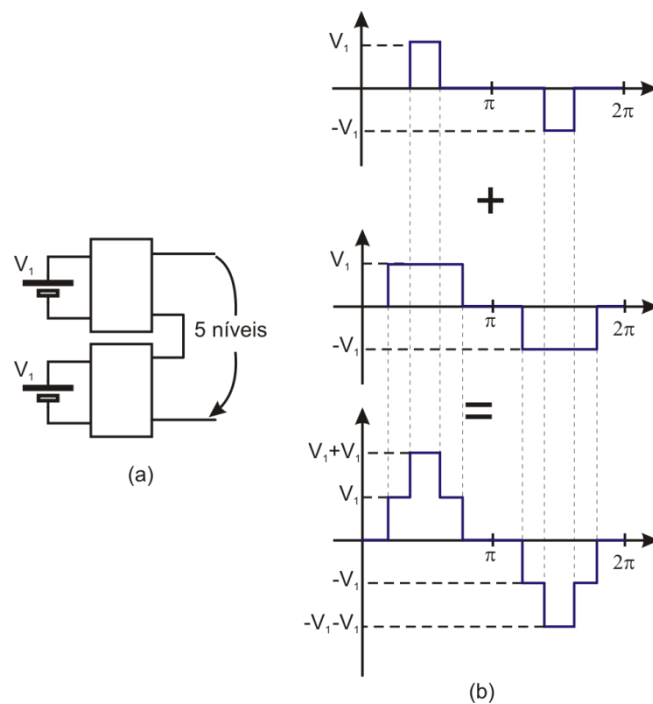


Figura 6.1 Sistema multinível utilizando inversores três níveis simétricos (a) e formas de onda da tensão de saída (b)

## 6.1 Combinações de conjuntos de inversores multiníveis simétricos

A análise considerando inversores simétricos torna-se interessante uma vez que possibilita utilizar inversores idênticos para formar conjuntos com diferentes níveis de tensão. Dessa forma é possível elevar ainda mais o número de níveis do sistema final, utilizando inversores com o mesmo nível de tensão de entrada.

Para um inversor multinível simétrico quando se utiliza duas células três níveis é possível obter cinco níveis de tensão na saída do inversor. Com a equação (6.1) é possível obter o número de níveis para  $i$  inversores simétricos conectados em cascata.

$$m_s = 2 \cdot i + 1 \quad (6.1)$$

Estes inversores podem ser combinados em cascata conforme a Figura 6.2. Nesta figura são apresentados os inversores multiníveis simétricos desde sua formação com somente um inversor, gerando três níveis de saída, até seis inversores conectados em cascata, gerando 13 níveis na saída. Para a análise realizada nesta dissertação, foi limitado em seis inversores conectados em cascata. Contudo a análise pode ser utilizada pra qualquer quantidade de inversores em cascata.

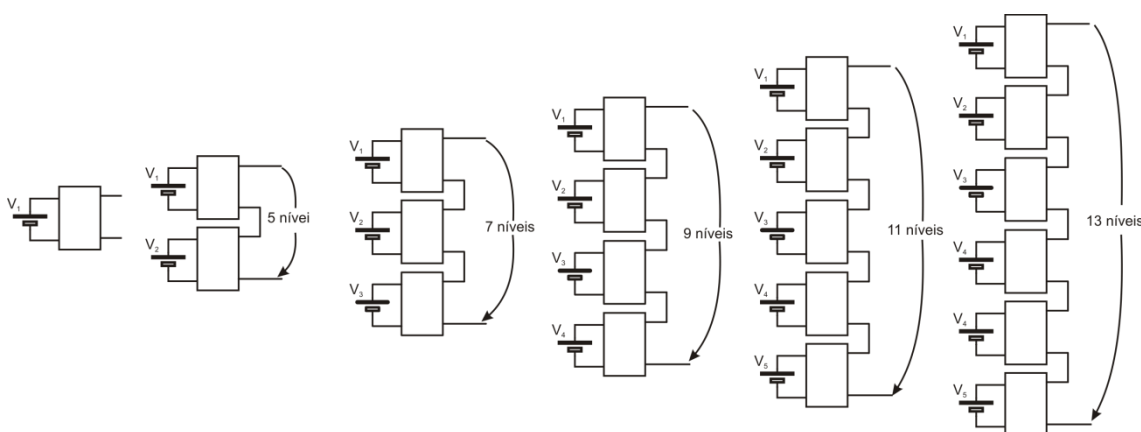
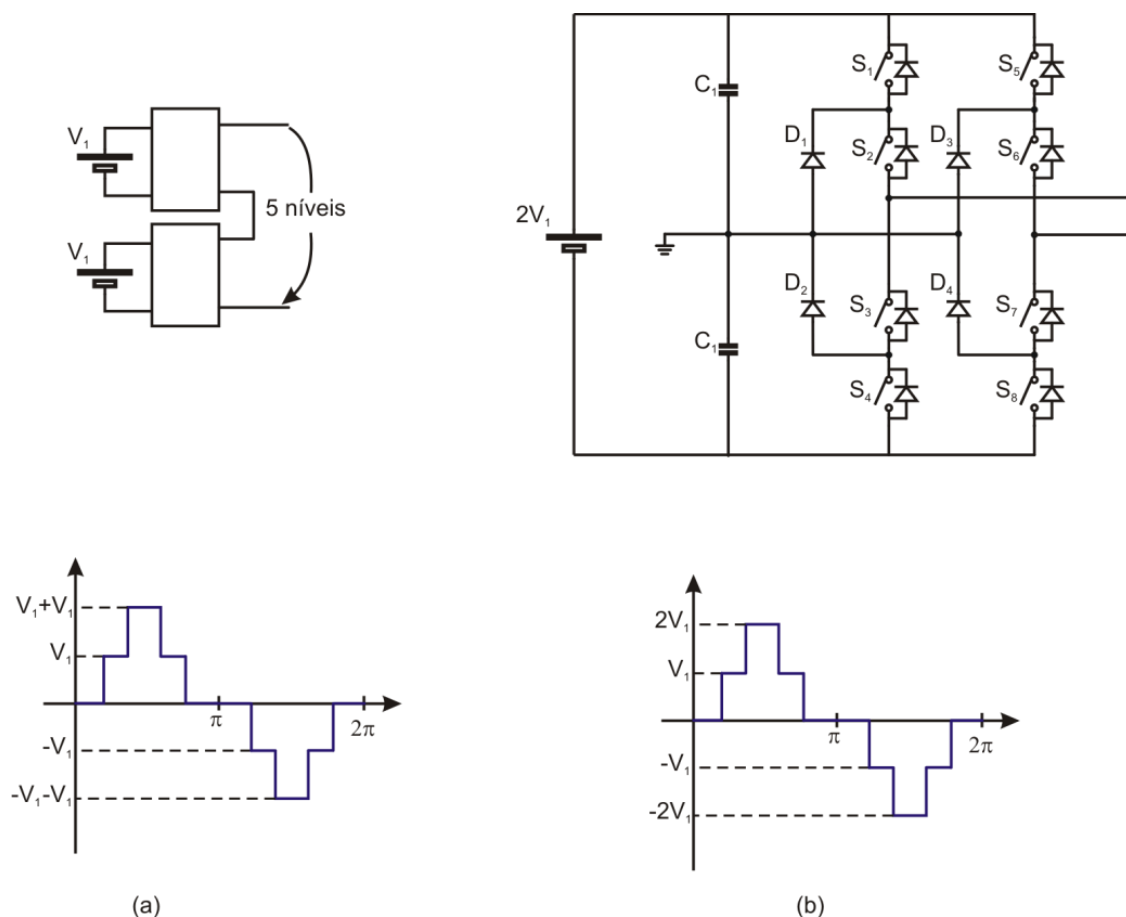


Figura 6.2 Sistemas multiníveis utilizando inversores três níveis simétricos utilizados

A partir destes conjuntos, diversas combinações de sistemas multiníveis assimétricos híbridos podem ser formados. Vale ressaltar que esta análise considera somente a tensão de entrada e a forma de onda da tensão de saída, independente da topologia de inversor utilizada. Um exemplo disso é a possibilidade de utilização tanto de um inversor NPC cinco níveis como de um inversor multinível simétrico formado por dois inversores três níveis que geram, a exemplo do NPC, uma tensão de saída com cinco níveis. A Figura 6.3 mostra a comparação entre inversores multiníveis simétricos cinco níveis e um inversor NPC cinco níveis.



**Figura 6.3 Inversores multiníveis com uma tensão de saída de cinco níveis formados a partir de inversores três níveis (a) e inversor NPC (b)**

## 6.2 Análise dos conjuntos de inversores simétricos conectados de forma assimétrica

A análise combina dois conjuntos de inversores multiníveis buscando obter uma THD mínima para o sistema. Para obter o valor de  $\gamma$  entre os conjuntos de inversores multiníveis simétricos, foi considerado que o valor base é sempre a tensão equivalente do inversor com menor número de níveis.

Para realizar uma avaliação deste método foi considerado dois conjuntos de inversores multiníveis simétricos. O primeiro formado por um inversor três níveis, já o segundo é formado por dois inversores três níveis simétricos gerando cinco níveis de saída, Figura 6.4. Para realizar a análise, o sistema formado pelos dois inversores simétricos é considerado como um único sistema, formado por uma fonte de entrada de tensão igual a  $2V_2$  e uma tensão de saída de cinco níveis, Figura 6.5.

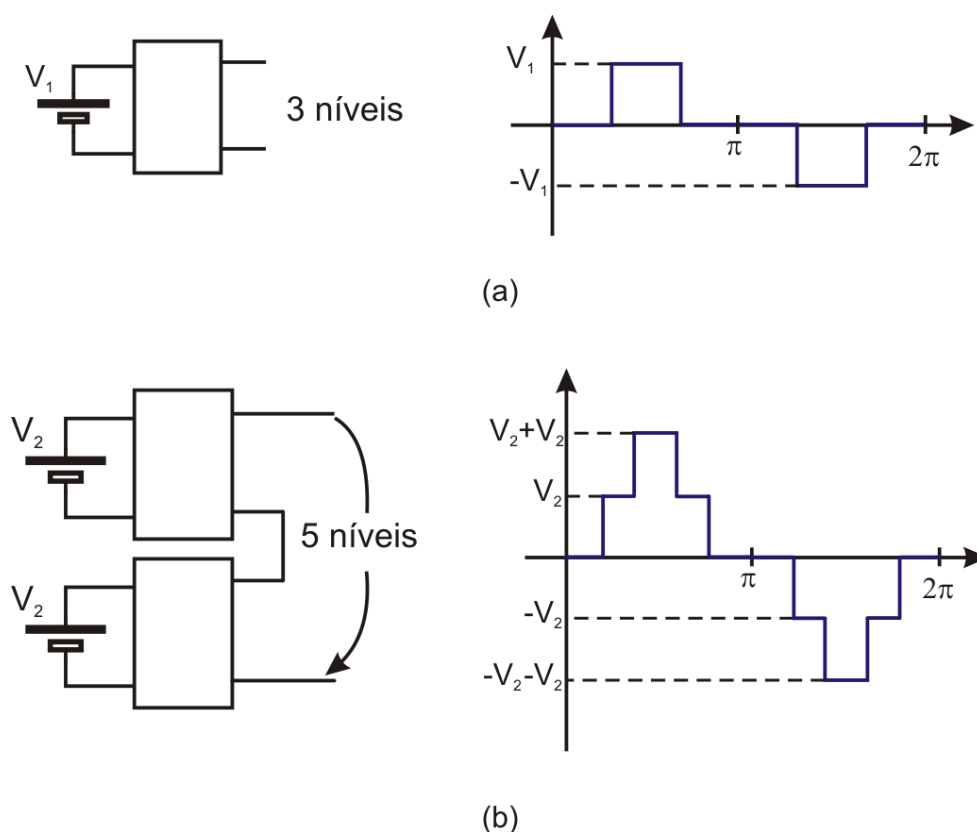


Figura 6.4 Sistemas simétricos analisados. Inversor três níveis (a); inversor multinível simétrico formando cinco níveis(b)



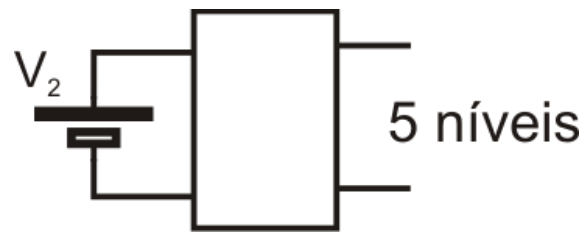


Figura 6.5 Circuito equivalente para inversores multiníveis simétrico

Os dois sistemas simétricos são combinados em cascata gerando um sistema multinível assimétrico, Figura 6.6. A tensão de saída do sistema será de 11 níveis sendo que os degraus da tensão são formados a partir da soma das tensões dos inversores combinados. Esta combinação gera os seguintes níveis de tensão no semi – ciclo positivo:  $0, V_1, V_2, \frac{V_2}{2}, V_2 + V_1, \frac{V_2}{2} + V_1$ .

Realizando a busca pelo ponto ótimo de operação que gera uma THD mínima para o sistema foi obtido que a relação das tensões é igual a 4.2. A tensão de saída para este sistema, bem como o espectro harmônico são apresentados respectivamente nas Figura 6.7 e Figura 6.8.

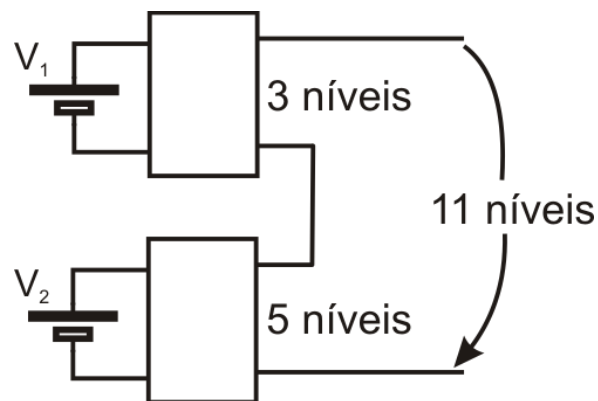
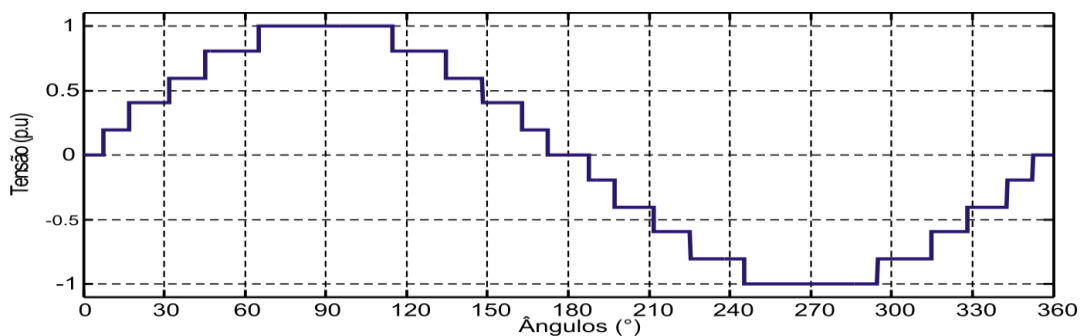
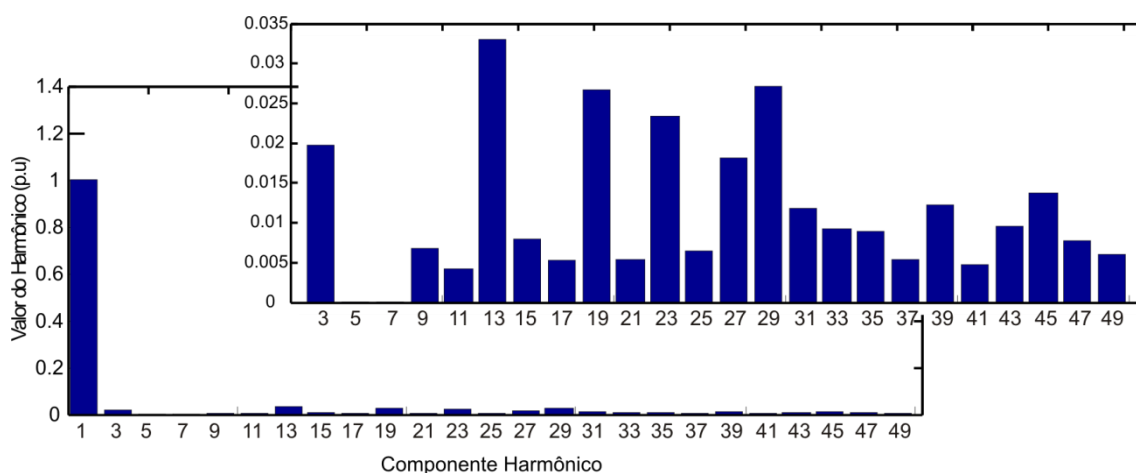


Figura 6.6 Sistemas multiníveis assimétricos formados por combinações de inversores simétricos de 3 e 5 níveis



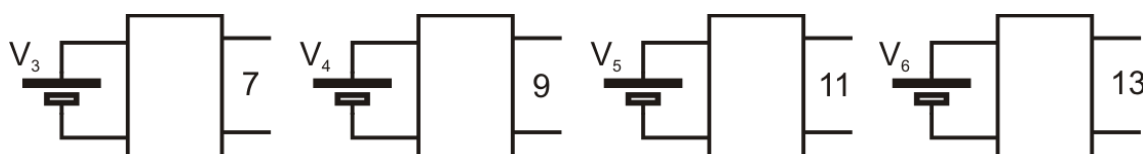
**Figura 6.7 Tensão de saída sistema multinível assimétrico 11 níveis, formado por inversor três níveis combinados com inversor multinível simétrico de 5 níveis**



**Figura 6.8 Espectro Harmônico para sistema 11 níveis**

No sistema assimétrico com 11 níveis, Figura 6.7, é possível observar que apenas foi realizada a eliminação da 5ª e da 7ª componente harmônica, apesar da possibilidade de eliminar mais componentes.

O mesmo procedimento foi realizado utilizando combinações de inversores multiníveis simétricos formando sistemas com 7, 9, 11 e 13 níveis. A representação desses sistemas e as combinações de tensão possíveis para cada sistema são apresentadas respectivamente na Figura 6.9 e na Tabela 6.1.



**Figura 6.9 Sistemas multiníveis simétricos utilizados para a análise**

Tabela 6.1 Tensões sintetizadas pelas combinações de sistemas simétricos

| Sistema 7 níveis | Sistema 9 níveis | Sistema 11 níveis | Sistema 13 níveis |
|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| $V_3$            | $V_4$            | $V_5$             | $V_6$             |
| $2V_3/3$         | $3V_4/4$         | $4V_5/5$          | $5V_6/6$          |
| $V_3/3$          | $2V_4/4$         | $3V_5/5$          | $4V_6/6$          |
|                  | $V_4/4$          | $2V_5/5$          | $3V_6/6$          |
|                  |                  | $V_5/5$           | $2V_6/6$          |
|                  |                  |                   | $V_6/6$           |

Os inversores multiníveis simétricos apresentados foram conectados em cascata com um inversor três níveis, Figura 6.10. Foi realizado o mesmo procedimento para obter a melhor relação de tensão entre os inversores. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas Tabela 6.2.

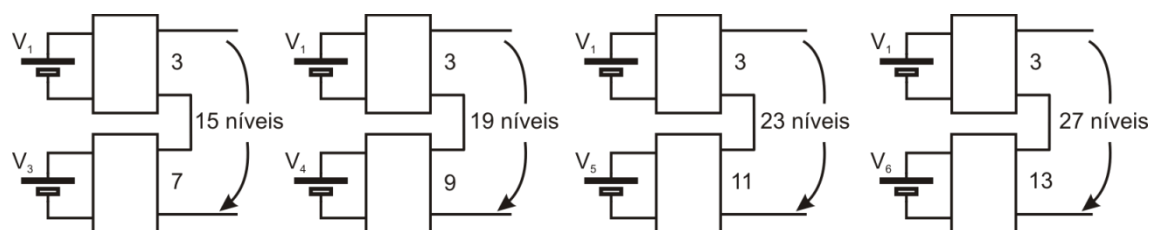


Figura 6.10 Sistemas multiníveis utilizando combinações de inversores simétricos

Tabela 6.2 Combinações assimétricas de conjuntos de inversores multiníveis simétricos – considerando o inversor três níveis como o inversor de menor tensão

| Inversor 1 ( $I_1$ ) | Inversor 2 ( $I_2$ ) | Inversor equivalente ( $I_e$ ) | Harmônicas Eliminadas   | $\gamma(V_x/V_1)$ | THD <sub>e</sub> |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|---|-------------------|------------------|
| $I_{1\_3}$           | $I_{2\_5}$           | $I_{e\_11}$                    | 5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup>   | 4.21              | 7.55             |
| $I_{1\_3}$           | $I_{2\_7}$           | $I_{e\_15}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 6.5               | 5.58             |
| $I_{1\_3}$           | $I_{2\_9}$           | $I_{e\_19}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 8.61              | 4.06             |
| $I_{1\_3}$           | $I_{2\_11}$          | $I_{e\_23}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 10.6              | 3.44             |
| $I_{1\_3}$           | $I_{2\_13}$          | $I_{e\_27}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 12.48             | 2.82             |

Para estes testes, o inversor com um menor número de níveis de tensão de saída, será o valor base do sistema multinível. A partir dos resultados obtidos nos sistemas apresentados na Tabela 6.2 é possível verificar que o número de níveis do sistema equivalente formado por dois sistemas multiníveis simétricos é dado pela equação (6.2).

$$A \cdot C_2 + B = I_e \quad (6.2)$$

Sendo que  $A$  e  $B$  são parâmetros de ajuste da equação (6.2),

$$A + B = I_1 \quad (6.3)$$

e,

$$A - B = 1 \quad (6.4)$$

Onde  $I_1$  é o número de níveis do menor conjunto do sistema multiníveis,  $I_2$  é o número de níveis do maior conjunto do sistema multinível e  $I_e$  é o número de níveis do sistema formado pelos dois conjuntos. É importante ressaltar que este equacionamento é válido somente para sistemas formados por dois conjuntos de inversores multiníveis. As tensões de saída e os espectros harmônicos para as combinações presentes na Tabela 6.2 são apresentados respectivamente nas Figura 6.11 e Figura 6.12.

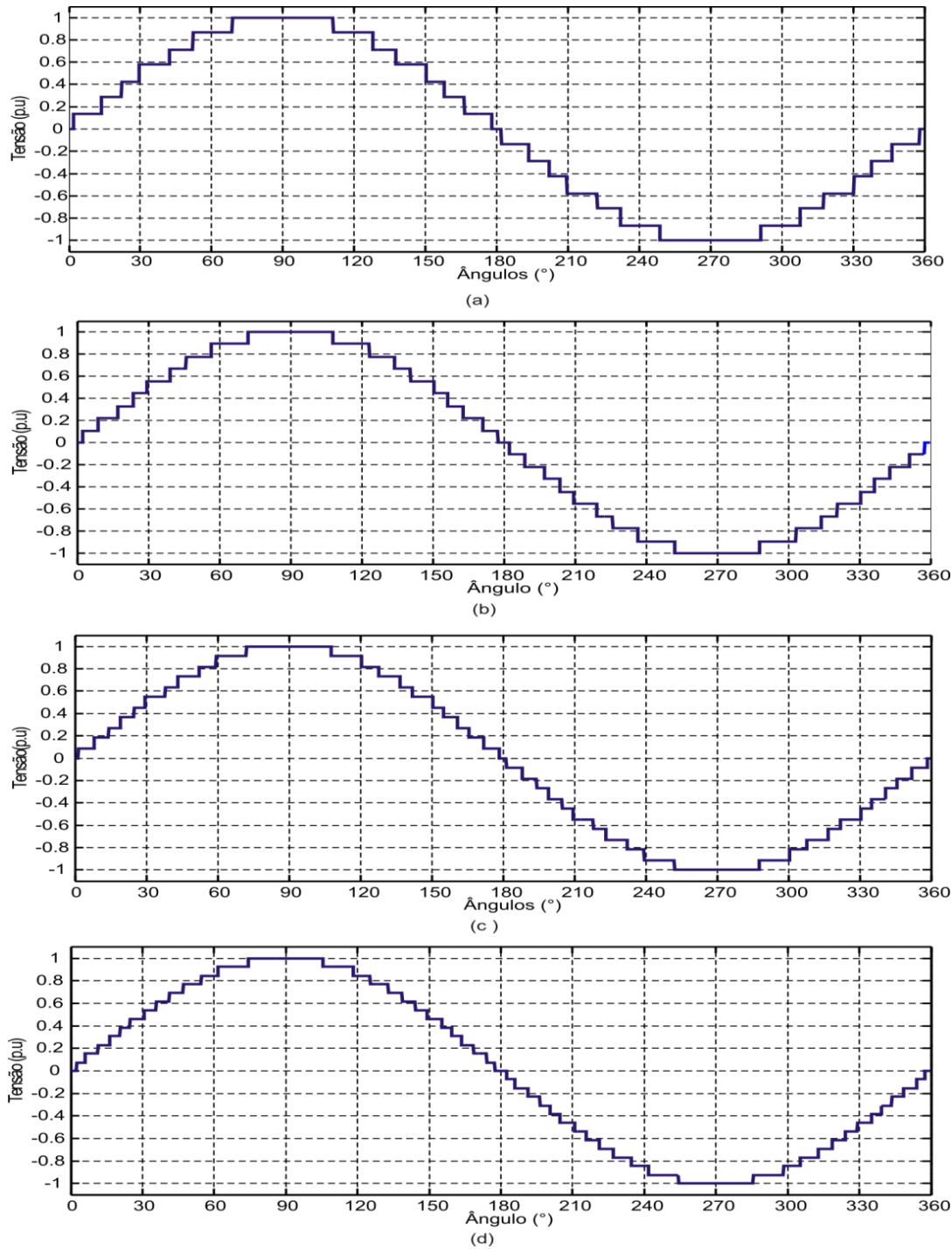


Figura 6.11 Tensões para as combinações apresentadas na Tabela 6.2. (a) sistema 15 níveis; (b) sistema 19 níveis; (c) sistema 23 níveis; (d) sistema 27 níveis

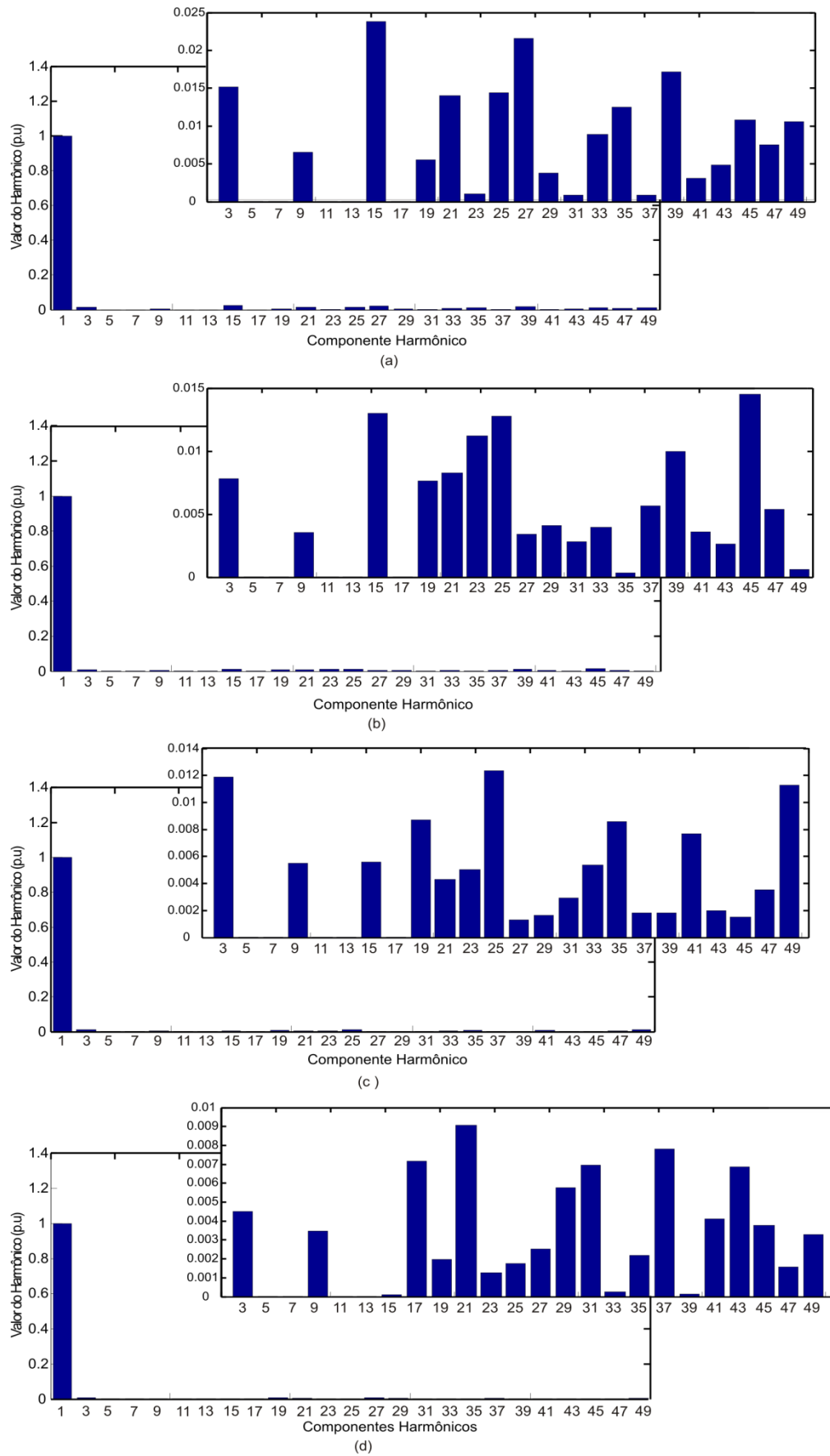


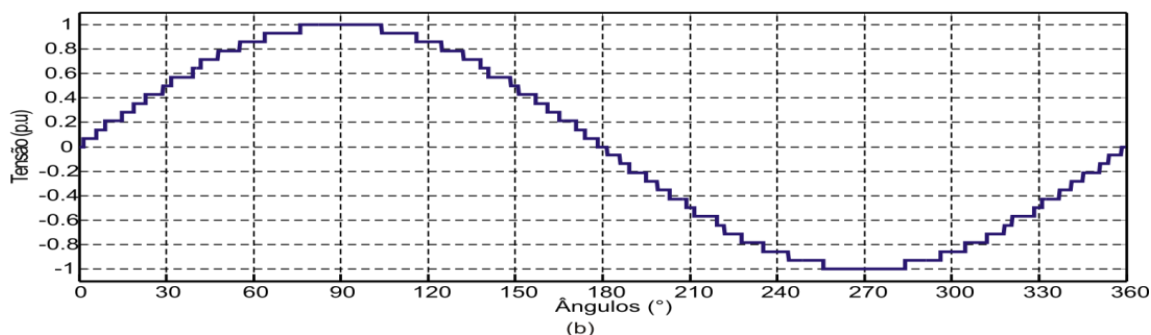
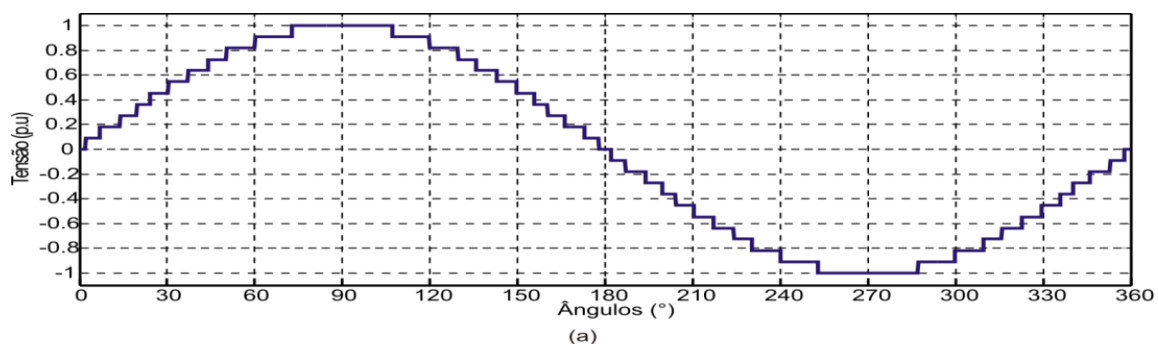
Figura 6.12 Espectro Harmônico para as combinações apresentadas na Tabela 6.3. (a) sistema 15 níveis; (b) sistema 19 níveis; (c) sistema 23 níveis; (d) sistema 27 níveis

Foi realizada a mesma análise para outros conjuntos de inversores. Sendo que foram alterados os inversores de menor número de níveis de tensão. Verifica-se que para todos os casos analisados a relação de tensão,  $\gamma$ , recebe um incremento de 2 a medida que o valor de inversor  $I_2$  eleva-se.

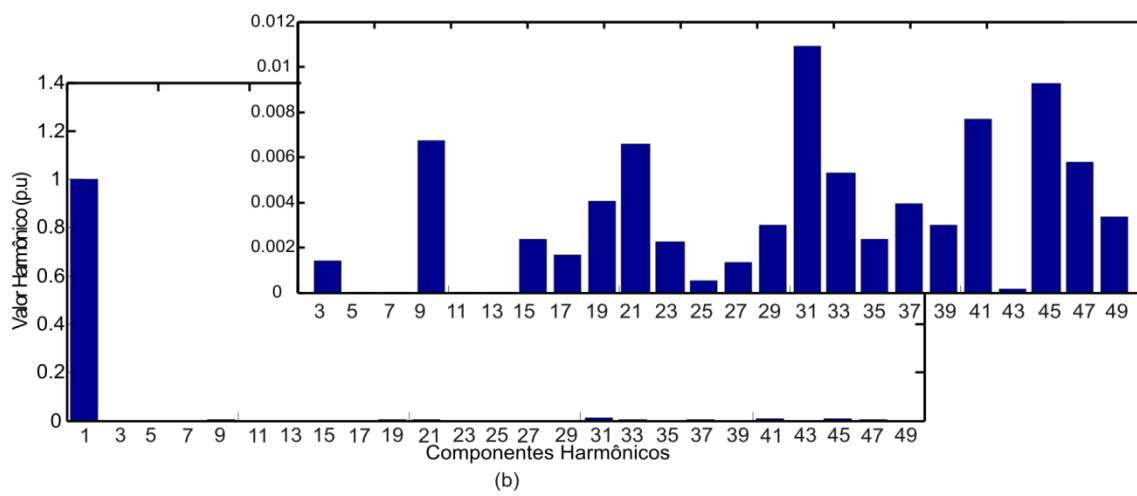
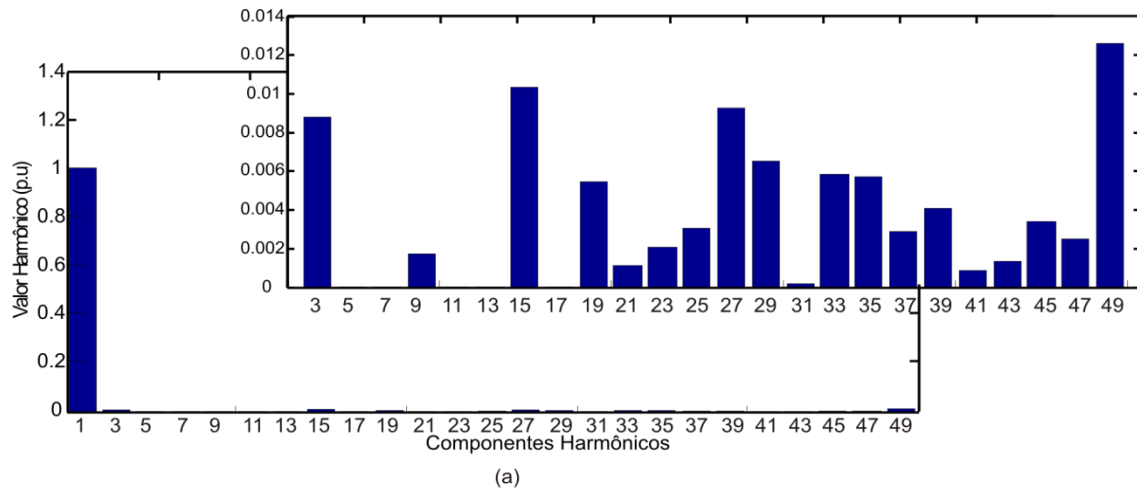
A Tabela 6.3 apresenta os valores obtidos para sistemas utilizando como base um conjunto de inversores multiníveis simétricos de 5 níveis. Já a Tabela 6.4 apresenta os valores obtidos para sistemas utilizando como base inversores multiníveis simétricos com 7 níveis de tensão.

**Tabela 6.3 Combinações assimétricas de conjuntos de inversores multiníveis simétricos – considerando o inversor cinco níveis como o inversor de menor tensão**

| Inversor 1 ( $I_1$ ) | Inversor 2 ( $I_2$ ) | Inversor equivalente ( $I_e$ ) | Harmônicas Eliminadas   | $\gamma(V_2/V_1)$ | THD <sub>e</sub> |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|---|-------------------|------------------|
| $I_{1\_5}$           | $I_{2\_7}$           | $I_{e\_23}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 4.6               | 3.21             |
| $I_{1\_5}$           | $I_{2\_9}$           | $I_{e\_29}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> e 13 <sup>a</sup>                   | 6.2               | 2.61             |
| $I_{1\_5}$           | $I_{2\_11}$          | $I_{e\_35}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 8.175             | 1.99             |
| $I_{1\_5}$           | $I_{2\_13}$          | $I_{e\_41}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 10.051            | 1.69             |

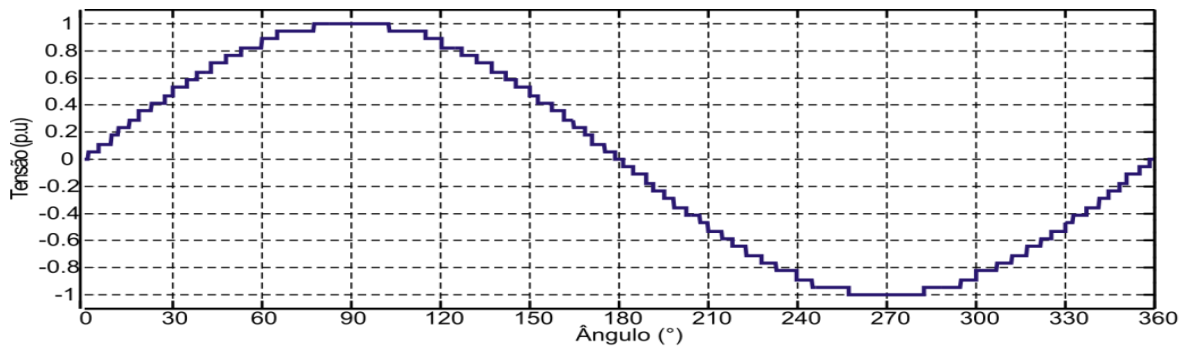


**Figura 6.13 Tensões para os sistemas multiníveis com 23 níveis de saída (a) e 29 níveis de saída (b)**

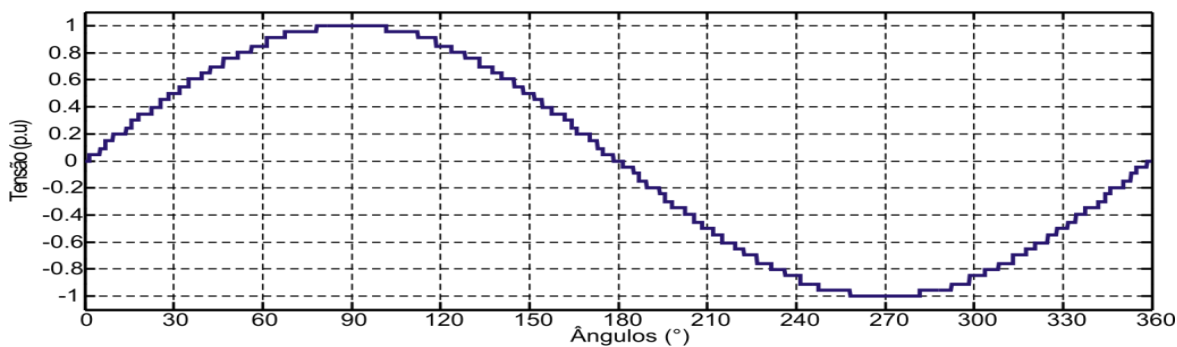


**Figura 6.14 Espectro Harmônico para as tensões de saída dos sistemas multiníveis com 23 níveis (a) e 29 níveis (b)**



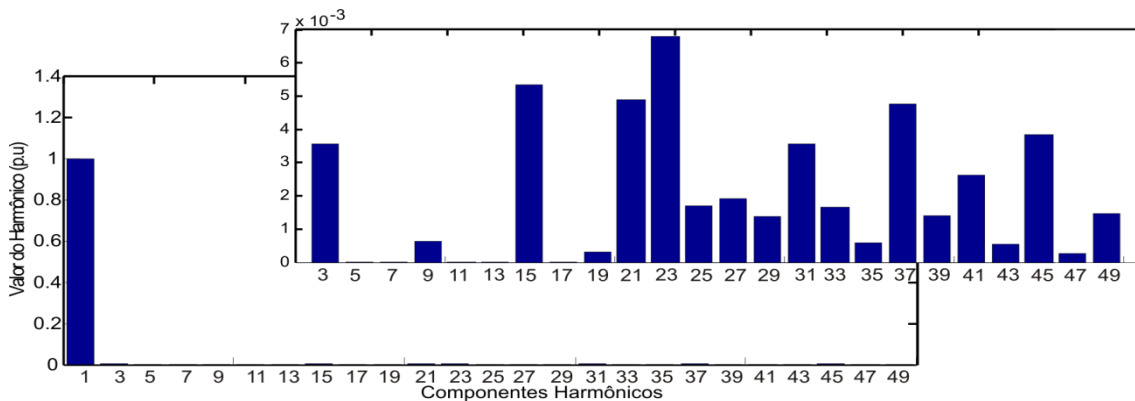


(a)

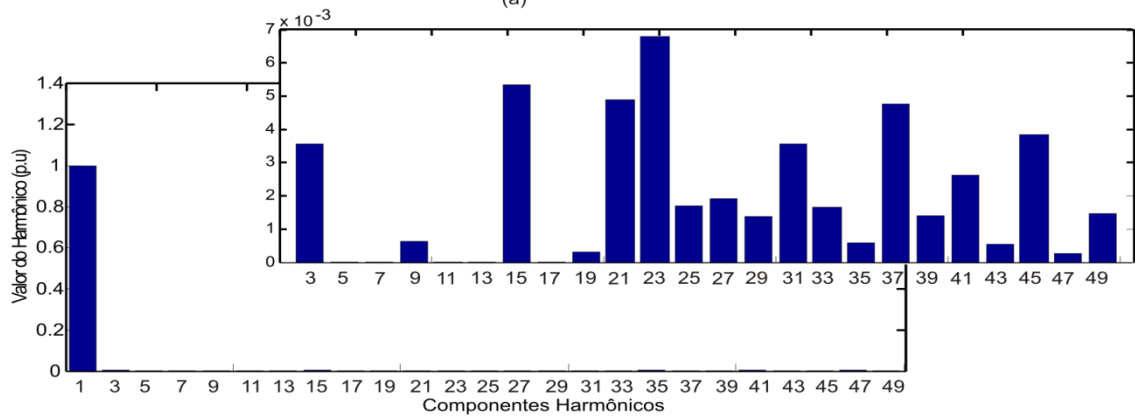


(b)

**Figura 6.15 Tensões para os sistemas multiníveis com 35 níveis de saída (a) e 41 níveis de saída (b)**



(a)

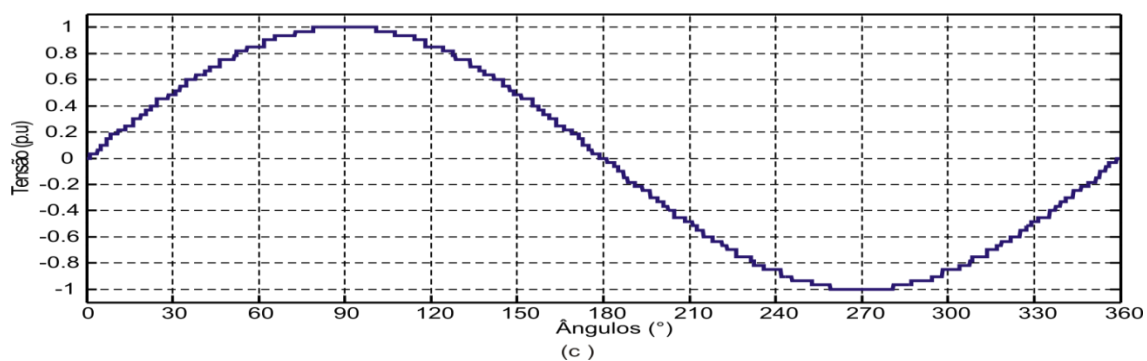
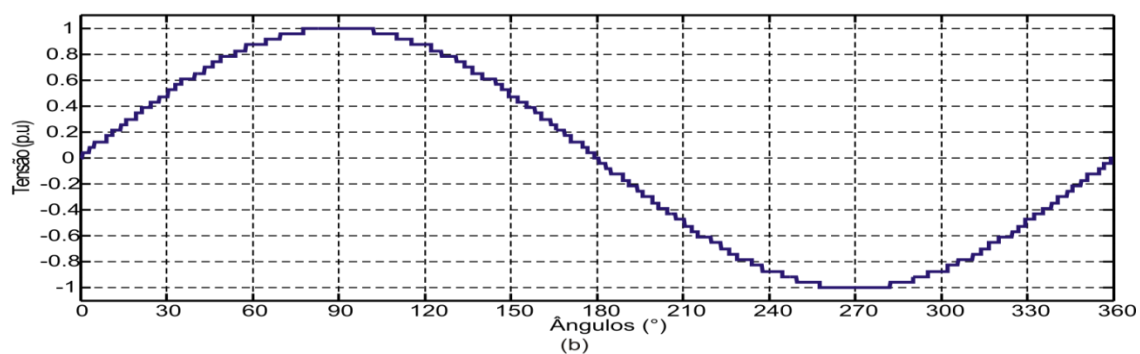
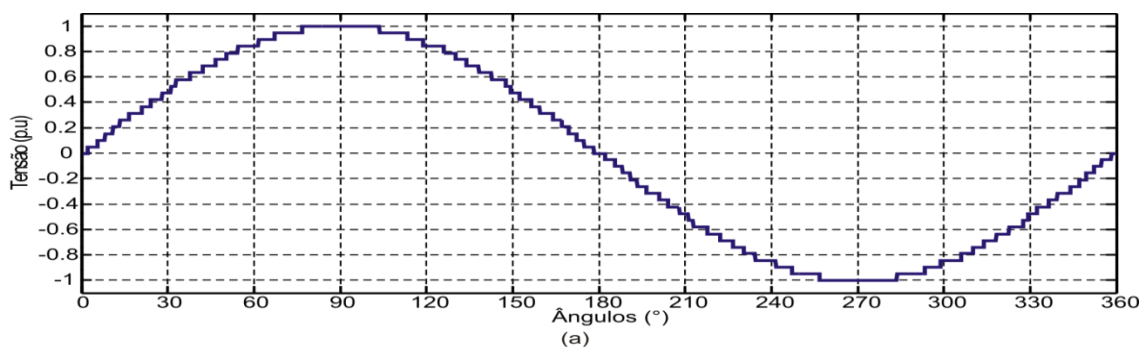


(b)

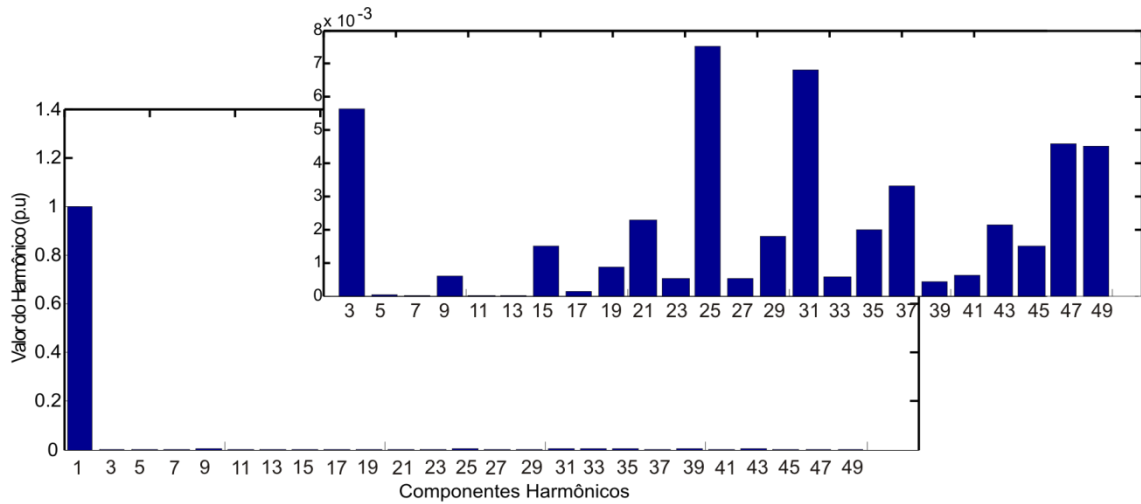
**Figura 6.16 Espectro Harmônico para as tensões de saída dos sistemas multiníveis com 35 níveis (a) e 41 níveis (b)**

**Tabela 6.4** Combinações assimétricas de conjuntos de inversores multiníveis simétricos – considerando o inversor sete níveis como o inversor de menor tensão

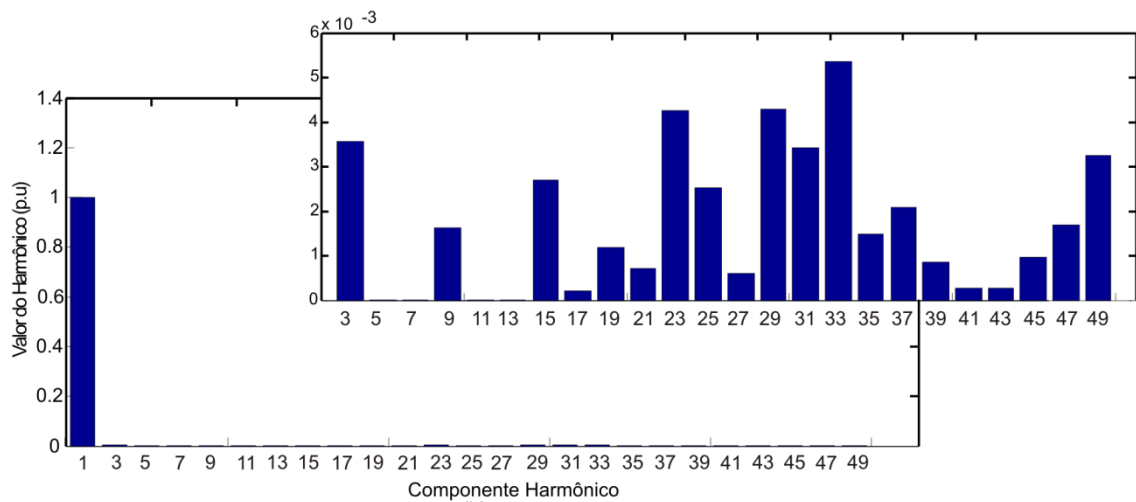
| Inversor 1 ( $I_1$ ) | Inversor 2 ( $I_2$ ) | Inversor equivalente ( $I_e$ ) | Harmônicas Eliminadas   | $\gamma(V_2/V_1)$ | THD <sub>e</sub> |
|----------------------|----------------------|--------------------------------|---|-------------------|------------------|
| $I_{1\_7}$           | $I_{2\_9}$           | $I_{e\_39}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> e 13 <sup>a</sup>                   | 5.48              | 1.68             |
| $I_{1\_7}$           | $I_{2\_11}$          | $I_{e\_47}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> e 13 <sup>a</sup>                   | 7.184             | 1.4641           |
| $I_{1\_7}$           | $I_{2\_13}$          | $I_{e\_55}$                    | 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup> e 17 <sup>a</sup> | 9.34              | 1.377            |



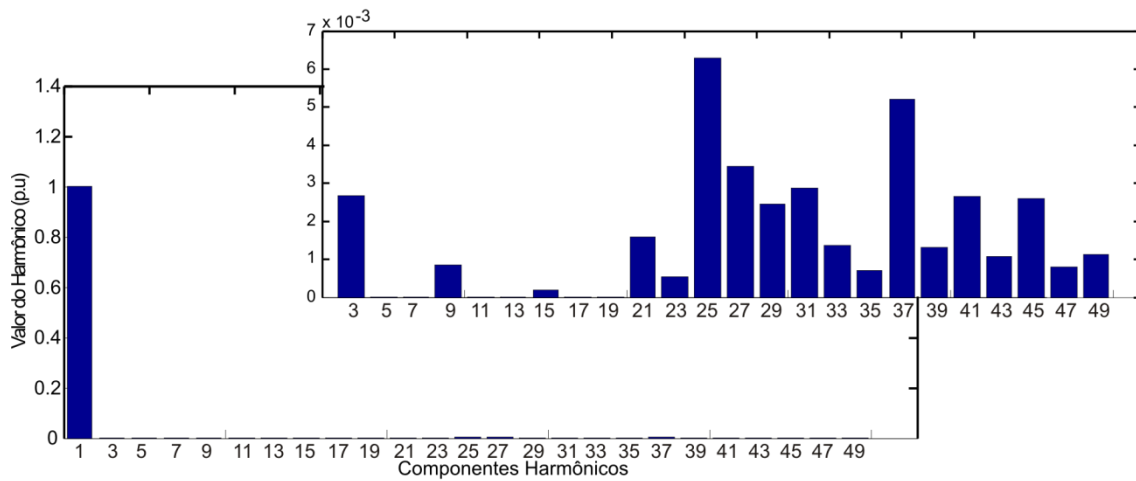
**Figura 6.17** Tensões para os sistemas multiníveis com 39 níveis de saída (a), 47 níveis de saída (b) e 55 níveis de saída (c)



(a)



(b)



(c)

Figura 6.18 Espectro harmônico para as tensões de saída dos sistemas multiníveis com 39 níveis (a), 47 níveis (b) e 55 níveis (c)

### 6.3 Conclusões

Neste capítulo foi realizada uma análise de sistemas multiníveis utilizando conjuntos de inversores multiníveis simétricos conectados de forma assimétrica. Foi realizado o equacionamento permitindo obter o número de níveis gerados a partir de qualquer combinação de dois conjuntos de inversores multiníveis simétricos.

São apresentadas as tensões de saída dos sistemas analisados e os espectros harmônicos destas tensões. É possível visualizar nos espectros harmônicos a eliminação das componentes de baixa ordem que foram previamente especificados no algoritmo. Também é possível observar que, com o mesmo número de inversores três níveis é possível obter diferentes níveis de tensão na saída do sistema. Para isto basta arranjar os inversores de forma diferente entre os conjuntos.

## CONCLUSÃO

Esta dissertação realizou uma revisão sobre inversores multiníveis. Foram considerados inversores com dois e três níveis de tensão de saída conectados em cascata. O estudo priorizou a obtenção de uma relação ótima entre as tensões de entrada dos inversores de forma a obter uma THD mínima para o ponto de operação desejado.

Para obter estes resultados, foi necessário obter equações generalizadas, possibilitando comparar diversos inversores conectados em cascata. Para os arranjos utilizando inversores três níveis, foram realizadas duas hipóteses, uma considerando todas as combinações possíveis entre as fontes e outra considerando somente as combinações formadas a partir da soma das tensões dos inversores. No primeiro caso, foi obtido que a melhor relação de tensão aproxima-se da relação trinária. Já para o segundo caso, a relação binária gera a menor THD, sendo esta a mesma relação quando considerado inversores dois níveis em cascata.

Observou-se também que, à medida que o número de inversores em cascata aumenta, o esforço computacional para obter o melhor valor de  $\gamma$  eleva-se consideravelmente. Isto ocorre, pois o número de ângulos a serem obtidos eleva-se na mesma proporção que o número de níveis do sistema considerado. Para contornar esta limitação foi proposto um método baseado em algoritmos genéticos que, além de reduzir consideravelmente o tempo para obtenção das variáveis de interesse, é capaz de eliminar componentes harmônicas desejadas.

Além de sistemas multiníveis assimétricos clássicos, foram realizados estudos considerando conjuntos de inversores multiníveis simétricos conectados de forma assimétrica. Realizando este procedimento, é possível utilizar inversores de menor tensão formando conjuntos de inversores multiníveis simétricos e conectar estes sistemas de forma assimétrica, garantindo assim um maior número de níveis.

Propostas para trabalhos futuros:

- Realizar análise de potência nos sistemas multiníveis analisados;

- Estudo de métodos de geração e controle das tensões de entrada dos inversores;
- Analisar parâmetros como DF1 e DF2 para os sistemas analisados;
- Estudo de métodos de modulação buscando maior redução dos níveis de THD;

## BIBLIOGRAFIA

- [1] BAKER, R. H. Switching circuit. U.S. Patent 4 210 826, 1980;
- [2] Nabae, Akira; Takahashi, Isao; Akagi, Hirofumi; "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.IA-17, no.5, pp.518-523, Setembro. 1981
- [3] Rodriguez, J.; Jih-Sheng Lai; Fang Zheng Peng; , "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.49, no.4, pp. 724- 738, Agosto 2002
- [4] Franquelo, L.G.; Rodriguez, J.; Leon, J.I.; Kouro, S.; Portillo, R.; Prats, M.A.M.; , "The age of multilevel converters arrives," *Industrial Electronics Magazine, IEEE* , vol.2, no.2, pp.28-39, Junho 2008
- [5] Malinowski, M.; Gopakumar, K.; Rodriguez, J.; Pérez, M.A.; , "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.57, no.7, pp.2197-2206, Julho 2010
- [6]Castro, R. E. "Otimização de estruturas, com multiobjetivos via algoritmo genético de Pareto". 2001. 202f. Tese de Doutorado, Programas de Pós Graduação de Engenharia, - UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- [7] Azli, N.A.; Choong, Y.C.; , "Analysis on the Performance of a Three-phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter," *Power and Energy Conference, 2006. PECon '06. IEEE International* , vol., no., pp.405-410, 28-29 Novembro. 2006
- [8] Rodriguez, J.; Bernet, S.; Bin Wu; Pontt, J.O.; Kouro, S.; , "Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.54, no.6, pp.2930-2945, Dezembro. 2007
- [9] Braga, H. A. C. and Barbi, I., "CONVERSORES ESTÁTICOS MULTINÍVEIS – UMA REVISÃO," vol. 11, no. 1, pp. 20-28, 2000.
- [10]Zambra, D. A. B., "Análise Comparativa de Inversores Multiníveis com Células H-Bridge Conectadas em Série", Dissertação de Mestrado, PPGEE – UFSM, 2006.
- [11]Manjrekar, M.D.; Steimer, P.K.; Lipo, T.A.; , "Hybrid multilevel power conversion system: a competitive solution for high-power applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.36, no.3, pp.834-841, Maio/Junho 2000

- [12] Rech, C.; Pinheiro, J.R.; , "Hybrid Multilevel Converters: Unified Analysis and Design Considerations," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.54, no.2, pp.1092-1104, Abril 2007
- [13] Rech, C.; Pinheiro, J.R.; , "Impact of Hybrid Multilevel Modulation Strategies on Input and Output Harmonic Performances," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.22, no.3, pp.967-977, Maio 2007
- [14] Zambra, D.A.B.; Rech, C.; Pinheiro, J.R.; , "Comparison of Neutral-Point-Clamped, Symmetrical, and Hybrid Asymmetrical Multilevel Inverters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.57, no.7, pp.2297-2306, Julho 2010
- [15] Dahidah, M.S.A.; Agelidis, V.G.; , "A Hybrid Genetic Algorithm for Selective Harmonic Elimination Control of a Multilevel Inverter with Non-Equal DC Sources," *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on* , vol.2, no., pp.1205-1210
- [16] Al-Othman, A.K.; Abdelhamid, T.H.; , "Elimination of harmonics in multilevel inverters with non-equal DC sources using PSO," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th* , vol., no., pp.606-613, 1-3 Setembro. 2008
- [17] Pereda, J.; Dixon, J.; , "High-Frequency Link: A Solution for Using Only One DC Source in Asymmetric Cascaded Multilevel Inverters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.58, no.9, pp.3884-3892, Setembro. 2011
- [18] Lu, S.; Corzine, K.A.; , "Cascaded Multilevel Converters with Non-Integer or Dynamically Changing DC Voltage Ratios," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International* , vol.1, no., pp.1-5, 14-16 Agosto. 2006
- [19] Yu Liu; Hoon Hong; Huang, A.Q.; , "Real-Time Algorithm for Minimizing THD in Multilevel Inverters With Unequal or Varying Voltage Steps Under Staircase Modulation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.56, no.6, pp.2249-2258, Junho 2009
- [20] Yu Liu; Hoon Hong; Huang, A.Q.; , "Real-Time Calculation of Switching Angles Minimizing THD for Multilevel Inverters With Step Modulation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.56, no.2, pp.285-293, Fevereiro. 2009
- [21] F. H. Dupont, "Múltiplos controladores aplicados ao conversor boost cc-cc operando com larga faixa de carga: uma abordagem baseada em algoritmo genético e lógica fuzzy," Dissertação de mestrado, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica – FURB- Blumenau-SC 2010.



- [22] R. L. Haupt and D. H. Werner, Genetic algorithms in electromagnetics. Hoboken, NJ: IEEE Press, 2007.
- [23] R. L. Haupt and S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, 2<sup>nd</sup> ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2004.
- [24] AFFENZELLER, M., et al. *Genetic algorithms and genetic programming: modern concepts and practical applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [25] Jin Wang; Yi Huang; Peng, F.Z.; , "A practical harmonics elimination method for multilevel inverters," *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* , vol.3, no., pp. 1665- 1670 Vol. 3, 2-6 Outubro. 2005
- [26] Sabahi, M.; Iranaq, A.R.M.; Bahrami, K.M.; Bahrami, K.M.; Sharifian, M.B.B.; , "Harmonics elimination in a multilevel inverter with unequal DC sources using genetic algorithm," *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on* , vol., no., pp.1-5, 20-23 Agosto. 2011
- [27] Ozpineci, B.; Tolbert, L.M.; Chiasson, J.N.; , "Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms," *Power Electronics Letters, IEEE* , vol.3, no.3, pp. 92- 95, Setembro. 2005
- [28] Filho, F.J.T.; Mateus, T.H.A.; Maia, H.Z.; Ozpineci, B.; Pinto, J.O.P.; Tolbert, L.M.; , "Real-time selective harmonic minimization in cascaded multilevel inverters with varying DC sources," *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE* , vol., no., pp.4302-4306, 15-19 Junho 2008
- [29] Farokhnia, N.; Fathi, S.H.; Yousefpoor, N.; Bakhshizadeh, M.K.; , "Minimisation of total harmonic distortion in a cascaded multilevel inverter by regulating voltages of dc sources," *Power Electronics, IET* , vol.5, no.1, pp.106-114, Janeiro 2012
- [30] Hochgraf, C.; Lasseter, R.; Divan, D.; Lipo, T.A.; , "Comparison of multilevel inverters for static VAR compensation," *Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE* , vol., no., pp.921-928 vol.2, 2-6 Outubro 1994
- [31] Jih-Sheng Lai; Fang Zheng Peng; , "Multilevel converters-a new breed of power converters," *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE* , vol.3, no., pp.2348-2356 vol.3, 8-12 Outubro 1995

- [32] Meynard, T.A.; Foch, H.; , "Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters," *Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE* , vol., no., pp.397-403 vol.1, 29 Junho-3 Julho 1992
- [33] Rech, C.; Pinheiro, H.; Grundling, H.A.; Hey, H.L.; Pinheiro, J.R.; , "Analysis and comparison of hybrid multilevel voltage source inverters," *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual* , vol.2, no., pp. 491- 496 vol.2, 2002
- [34] Rech, C.; Pinheiro, J.R.; , "Impact of Hybrid Multilevel Modulation Strategies on Input and Output Harmonic Performances," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.22, no.3, pp.967-977, Maio 2007
- [35] C. Rech " Análise, Projeto e Desenvolvimento de Sistemas Multiníveis Híbridos" Tese de Doutorado, PPGEE – UFSM 2005
- [36] Damiano, A.; Marchesoni, M.; Marongiu, I.; Taffone, A.; , "Optimization of harmonic performances in multilevel converter structures," *Industrial Electronics, 1997. ISIE '97., Proceedings of the IEEE International Symposium on* , vol.2, no., pp.341-346 vol.2, 7-11 Julho 1997
- [37] Patil, K.V.; Mathur, R.M.; Jiang, J.; Hosseini, S.H.; , "Distribution system compensation using a new binary multilevel voltage source inverter," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.14, no.2, pp.459-464, Abril 1999
- [38] Lopez, M.G.; Moran, L.T.; Espinoza, J.C.; Dixon, J.R.; , "Performance analysis of a hybrid asymmetric multilevel inverter for high voltage active power filter applications," *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE* , vol.2, no., pp. 1050- 1055 Vol.2, 2-6 Novembro. 2003
- [39] Miranda, H.; Cardenas, V.; Perez, J.; , "A comparative development for the modulation techniques to multilevel trinary inverter applied to current active filters," *Power Electronics Congress, 2004. CIEP 2004. 9th IEEE International* , vol., no., pp. 171- 176, 17-22 Outubro. 2004
- [40] Dixon, J.; Pereda, J.; Castillo, C.; Bosch, S.; , "Asymmetrical Multilevel Inverter for Traction Drives Using Only One DC Supply," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.59, no.8, pp.3736-3743, Outubro 2010
- [41] Jimenez, O.L.; Vargas, R.A.; Aguayo, J.; Arau, J.E.; Vela, G.; Claudio, A.; , "THD in Cascade Multilevel Inverter Symmetric and Asymmetric," *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), 2011 IEEE* , vol., no., pp.289-295, 15-18 Novembro 2011

- [42] Gonzalez, S.A.; Valla, M.I.; Christiansen, C.F.; , "Five-level cascade asymmetric multilevel converter," *Power Electronics, IET*, vol.3, no.1, pp.120-128, Janeiro 2010
- [43] Novaes, Y. R., "Estudo de um snubber para inversor de três níveis com neutro grampeado". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [44] Somasekhar, V.T.; Gopakumar, K.; "Three-level inverter configuration cascading two two-level inverters," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol.150, no.3, pp. 245- 254, Maio 2003
- [45] Holmes, D.G.; McGrath, B.P.; , "Opportunities for harmonic cancellation with carrier-based PWM for a two-level and multilevel cascaded inverters," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.37, no.2, pp.574-582, Março/Abril 2001
- [46] INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções, p.65. São Paulo, 2001;
- [47] Wells, J.R.; Nee, B.M.; Chapman, P.L.; Krein, P.T.;, "Selective harmonic control: a general problem formulation and selected solutions,"*Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.20, no.6, pp. 1337- 1345, Novembro 2005
- [48] Hoppen, H.; Rech, C.; Pinheiro, J.R.; "Análise harmônica de inversores multiníveis assimétricos com variação das fontes de tensão." Congresso Brasileiro de Automática, CBA, 2010.
- [49] Erickson, R. e Maksimovic, D., *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd Edition, Boulder: University Colorado Press, 2001.
- [50] Linden, R. Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional. Rio de Janeiro: Brasport, 2006.
- [51] Zini, E. O. C, "Algoritmo genético especializado na resolução de problemas com variáveis contínuas e altamente restritos.", Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UNESP – Ilha Solteira – SP, 2009.

## ANEXO 1

No ANEXO A são apresentados os algoritmos utilizados para obter as relações de tensões das fontes de cada inversor utilizado. Também são obtidos os ângulos de comutação. Neste caso, é apresentada, para fins de exemplificação, o sistema multinível assimétrico mais simples. Contudo, pode ser expandido para  $n$  inversores em cascata.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               INVERSOR MULTINIVEL 27 NÍVEIS                               %
% versao 2                       Hueslei Hoppen                               13/07/2010 %
%                               varredura dos gama e ma                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
k = 0;
y= 1:2:99;
MaxTensao = 1;
for t=1;
for m = 1;
for gama1 = 1:0.01:10;
disp(gama1)
for gama2 = gama1:0.01:15;
V1 = (MaxTensao*m)./(1 + gama1+gama2);
V2 = (gama1*MaxTensao*m)./(1 + gama1+gama2);
V3 = (gama2*MaxTensao*m)./(1 + gama1+gama2);
res_ga = ga_she_3n_3f(gama1,gama2, m, 60, .4, .7, true);
k = k+1;
gamav1(k) = gama1;
gamav2(k) = gama2;

THDv(k) = res_ga.THd;
ang(k,:) = res_ga.alfas;
alfa1(k) = res_ga.alfas(1);
alfa2(k) = res_ga.alfas(2);
alfa3(k) = res_ga.alfas(3);
alfa4(k) = res_ga.alfas(4);
alfa5(k) = res_ga.alfas(5);
alfa6(k) = res_ga.alfas(6);
alfa7(k) = res_ga.alfas(7);
alfa8(k) = res_ga.alfas(8);
alfa9(k) = res_ga.alfas(9);
alfa10(k) = res_ga.alfas(10);
alfa11(k) = res_ga.alfas(11);
alfa12(k) = res_ga.alfas(12);
alfa13(k) = res_ga.alfas(13);
H(k,:) = res_ga.H;
V1v(k) = V1;
V2v(k) = V2;
V3v(k) = V3;
mv(k) = m;
end
end
end

```

```

end
M = [mv; V1v; V2v; V3v; (alfa1.*180)./pi; (alfa2.*180)/pi;...
     (alfa3.*180)./pi; (alfa4.*180)/pi;(alfa5.*180)./pi;...
     (alfa6.*180)./pi;(alfa7.*180)/pi; (alfa8.*180)/pi;...
     (alfa9.*180)./pi; (alfa10.*180)/pi;(alfa11.*180)./pi;...
     (alfa12.*180)./pi;(alfa13.*180)/pi; gamav1; gamav2; THDv];
end
save M3_3f_27.dat M -ascii
save H3_3f_27.dat H -ascii

function res_ga = ga_she_3n_3f(gama1, gama2, m, npop, natselrate,
mutrate, graf)

% Algoritmo genético para a determinação dos ângulos de comutação para
a
% eliminação seletiva de harmônicas
% Adição de filtros para eliminar resultados inexistentes
% Parâmetros da função
% gama: relação entre as fontes
% m: índice de modulação
% npop: número de cromossomos (valor sugerido: 30)
% natselrate: taxa da seleção natural (valor sugerido: 0.4)
% mutrate: taxa de mutação (valor sugerido: 0.7)
% graf: "true" para exibir o progresso na linha de comando e um
gráfico ao
%       final da otimização, "false" para apenas executar o GA e
salvar o
%       resultado na estrutura
%
% Verifica se deve plotar ou não os resultados
if nargin < 6
    graf = true;
end
%-----
% CONFIGURAÇÕES INICIAIS DO ALGORITMO GENÉTICO
%-----
% Vetor de transição
% vt = [1 1 1 1]';
% Vetor de harmônicas a serem eliminadas
vh = [5 7 11]';
% Harmônicas a serem analisadas no cálculo da THD e da SHE
y= 1:2:99;
he = ([5 7 11]+1)/2;    % Indexador das harmônicas
% Valor máximo do barramento CC
MaxTensao = 1;

V1 = (MaxTensao*m)./(1+gama1+gama2);
V2 = (gama1*MaxTensao*m)./(1+gama1+gama2);
V3 = (gama2*MaxTensao*m)./(1+gama1+gama2);

% Níveis de tensões sintetizáveis
Vdc = zeros(1,13);
Vdc(1) = V1;
Vdc(2) = V2;
Vdc(3) = V3;
Vdc(4) = V1 + V2;
Vdc(5) = V1 + V3;

```

```

Vdc(6) = V2 + V3;
Vdc(7) = V2 - V1;
Vdc(8) = V3 - V2;
Vdc(9) = V3 - V1;
Vdc(10) = V3 - V2 - V1;
Vdc(11) = V3 - V2 + V1;
Vdc(12) = V3 + V2 - V1;
Vdc(13) = V3 + V2 + V1;

% Ordena os níveis de tensão
Vdc = sort(Vdc)';
vt = zeros(13,1);
vt(1) = Vdc(1);
vt(2) = Vdc(2) - Vdc(1);
vt(3) = Vdc(3) - Vdc(2);
vt(4) = Vdc(4) - Vdc(3);
vt(5) = Vdc(5) - Vdc(4);
vt(6) = Vdc(6) - Vdc(5);
vt(7) = Vdc(7) - Vdc(6);
vt(8) = Vdc(8) - Vdc(7);
vt(9) = Vdc(9) - Vdc(8);
vt(10) = Vdc(10) - Vdc(9);
vt(11) = Vdc(11) - Vdc(10);
vt(12) = Vdc(12) - Vdc(11);
vt(13) = Vdc(13) - Vdc(12);

% Valor desejado para a componente fundamental
H1 = m * MaxTensao;
% --- Parâmetros do algoritmo genético -----
% Definição da função custo
ff = 'fobjj';
% Número de variáveis (genes) - ângulos a serem determinados
nvar = 13;

% Elitismo
el = 1;

%--- Incluindo alfan ---
A = eye(length(vt));
for ii = 1:size(A,1)-1
    A(ii,ii+1) = -1;
end
B = [zeros(1,length(vt)-1) pi/2]';

% --- Critérios de parada -----
% Número máximo de gerações
maxgen = 100;
% Tolerância do custo
costtol = 1e-7;
% Numero máximo de gerações sem evolução significativa
stallmax = 30;
% Custo aceitável
mincost = -inf;

%-----
% CONFIGURAÇÕES DO FMINCON
%-----
% Configurações do algoritmo
setup = optimset(...

```

```

'FunValCheck', 'on',...
'Algorithm', 'active-set',...
'MaxFunEvals', 100,...
'MaxIter', 100,...
'TolFun', 1e-17,...
'TolX', 1e-17,...
'TolCon', 1e-17,...
'LargeScale', 'on',...
'Display', 'off',...
'UseParallel', 'always');

if graf
    disp(' ')
    disp(' ')

disp('=====')
end

%-----
% EXECUÇÃO DO ALGORITMO
%-----
tic
% Número de cromossomos a serem mantidos pela seleção natural
natsel = ceil(npop*natselrate/2)*2;
% Número de cromossomos a serem descartados
M = npop - natsel;
% Número de mutações: número de genes que serão modificados em toda a
% população (exceto elitismo)
Nmut = ceil(mutrate*((npop-el)*nvar));

% Criação da roleta para cruzamento
% Indexadores dos pais
parents = 1:natsel;
% Probabilidade de seleção atribuída aos pais
prob = parents/sum(parents);
% Probabilidade cumulativa (comparada com o número randômico utilizado
na
% seleção do futuro casamento)
odds = [0 cumsum(prob)];

% Cria a população inicial assumindo a restrição
%  $0 < \alpha_0 < \dots < \alpha_n < \pi/2$ 
P = zeros(npop, nvar);
for idxp = 1:npop
    while 1
        G = rand(1,nvar)/pi;
        P(idxp,:) = cumsum(G)/14*pi;
        if (A*P(idxp,:)') < B) == 1
            break
        end
    end
end
end

% Calcula o custo da população inicial
cost = zeros(1, npop);
for idxp = 1:size(P,1)
    cost(idxp) = fobj(P(idxp,:));
end
end
% Copia o custo da população inicial

```

```

costs = cost;

% Contador de gerações sem evolução significativa
stallcount = 0;

% Executa a seleção natural: ordena os cromossomos por ordem
crescente.
% Mais informações em [p.34]
[cost ind] = sort(cost);
% Recria a população mantendo os melhores cromossomos
P = P(ind(1:natsel),:);
% Ordena os custos de acordo com os melhores cromossomos
cost = cost(1:natsel);
% Estatística de custo da população
stats = [min(cost) mean(cost) max(cost)];

for gen = 1:maxgen
% Cria a lista de candidatos a pais
for ic = 1:2:M
% Seleciona a mãe com base na probabilidade gerada aleatoriamente
r = rand;
ma = find(odds<r, 1, 'last');
% Seleciona o pai com base na probabilidade gerada aleatoriamente
while 1
r = rand;
pa = find(odds<r, 1, 'last');
if pa ~= ma
break
end
end
% Efetua o cruzamento dos dois cromossomos (natsel serve como um
% offset para separar os cromossomos separados pela seleção natural)
P(natsel+ic:natsel+ic+1,:) = crossfun(P(ma,:), P(pa,:));
end

% Mutação
% Uma vez que a população já está ordenada, o melhor cromossomo
% encontra-se na primeira posição da população. Os únicos cromossomos
% que não sofrerão mutação são os eleitos para o elitismo.
% Extrai os cromossomos que farão parte do processo de mutação

elP = P(el+1:npop, :);
% Vetor de genes que sofrerão mutação

vetmut = ceil((npop-el)*nvar*rand(1,Nmut));
% Efetua as mutações em todos os genes indicados pelo vetor,
obedecendo
% a faixa de valores estabelecida para cada gene para os genes gama e
% ma.
for idx = 1:length(vetmut)
% Indexador do gene que será modificado
idxgen = ceil(vetmut(idx)/npop);
idxcrom = mod(vetmut(idx), npop-el);
if not(idxcrom)
idxcrom = size(elP, 1);
end

% Caso o gene a ser modificado corresponda a um dos ângulos,
% efetua a mutação dentro do intervalo permitido, ou seja,

```



```

% 0 < a0 < a1 < a2 < a3 < a4 < pi/2
% Maiores informações sobre a estratégia empregada: Hinterding1995

    if idxgen == 1
% Provoca uma mutação no intervalo entre 0 < a0
% Aplica uma perturbação Gaussiana no valor original
        elP(idxcrom,idxgen) = .1*randn.*elP(idxcrom,idxgen+1) +...
elP(idxcrom,idxgen);

% Caso a mutação seja menor que zero, soma o valor do intervalo
        while elP(idxcrom,idxgen) < 0
            elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) + ...
            elP(idxcrom,idxgen+1);
        end
% Caso a mutação tenha ultrapassado o limite superior, subtrai
% o valor do intervalo

        while elP(idxcrom,idxgen) > elP(idxcrom,idxgen+1)
            elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) - elP(idxcrom,idxgen+1);
        end
        elseif idxgen == nvar

% Provoca uma mutação no intervalo entre a3 e pi/2
% Aplica uma perturbação Gaussiana no valor original
        elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) + .1*randn*(pi/2-
elP(idxcrom,idxgen-1));

% Caso a mutação tenha ultrapassado o limite inferior, soma o
% valor do intervalo
        while elP(idxcrom,idxgen) < elP(idxcrom,idxgen-1)
            elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) + ...
            (pi/2-elP(idxcrom,idxgen-1));
        end
% Caso a mutação tenha ultrapassado pi/2, subtrai o valor do intervalo
        while elP(idxcrom,idxgen) > pi/2
            elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) - ...
            (pi/2-elP(idxcrom,idxgen-1));
        end
    else
% Provoca uma mutação no intervalo entre a0 < a1 < a2 < a3 < a4
% Aplica uma perturbação Gaussiana no valor original
        elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) + ...
        .1*randn*(elP(idxcrom,idxgen+1)-elP(idxcrom,idxgen-1));
% Caso a mutação tenha ultrapassado o limite inferior, soma o
% valor do intervalo
        while elP(idxcrom,idxgen) < elP(idxcrom,idxgen-1)
            elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) + ...
            (elP(idxcrom,idxgen+1)-elP(idxcrom,idxgen-1));
        end
        % Caso a mutação tenha ultrapassado o limite superior,
subtrai
        % o valor do intervalo
        while elP(idxcrom,idxgen) > elP(idxcrom,idxgen+1)
            elP(idxcrom,idxgen) = elP(idxcrom,idxgen) - ...
            (elP(idxcrom,idxgen+1)-elP(idxcrom,idxgen-1));
        end

    end
end
end
% Grava a população que sofreu mutação de volta na população do

```

```

% algoritmo
P(e1+1:npop, :) = e1P;
% Calcula o custo da população
cost = zeros(1, npop);
for idxp = 1:size(P,1)
    cost(idxp) = fobj(P(idxp,:));
end
% Copia o custo da nova população
costs(gen+1,:) = cost;
% Estatística da geração
stats(gen+1,:) = [min(cost) mean(cost) max(cost)];
if graf
    disp([gen stats(gen+1,1:2)])
end

% Efetua a seleção natural
[and, ind] = sort(cost);
P = P(ind(1:natsel), :);
%cost = cost(1:natsel);

% Verifica se houve evolução na geração atual
if abs(stats(gen+1,1) - stats(gen,1)) < costtol
    stallcount = stallcount + 1;
else
    stallcount = 0;
end

% Verifica a convergência do algoritmo
if gen>maxgen || stats(gen+1,1)<mincost || stallcount>stallmax
    break
end
end

% Executa a otimização numérica para obter o resultado preciso
[res_ga.alfas err flg] = she(vt, vh, m, P(1,:));
[vtemp(1) vtemp(2)] = fobj(res_ga.alfas);
res_ga.erro = err;
res_ga.flag = flg;
res_ga.THG = vtemp(2);

% Caso o erro em ma seja maior que 0,1% ou os ângulos não satisfaçam
as
% restrições, atribui NaN para destacar a inexistência de solução
if ((res_ga.erro > 1e-3) || ...
    (res_ga.alfas(1) < 1e-3) || ...
    (res_ga.alfas(2) - res_ga.alfas(1) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(3) - res_ga.alfas(2) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(4) - res_ga.alfas(3) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(5) - res_ga.alfas(4) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(6) - res_ga.alfas(5) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(7) - res_ga.alfas(6) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(8) - res_ga.alfas(7) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(9) - res_ga.alfas(8) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(10) - res_ga.alfas(9) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(11) - res_ga.alfas(10) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(12) - res_ga.alfas(11) < 1e-3) ||...
    (res_ga.alfas(13) >= 90))

res_ga.alfas = NaN*ones(size(res_ga.alfas));

```

```

    res_ga.THHD = NaN;
end
% Caso o resultado seja válido, salva os resultados em uma estrutura
res_ga.evtime = toc;
res_ga.stats = stats;
res_ga.costs = costs;
res_ga.npop = npop;
res_ga.P = P;
res_ga.el = el;
res_ga.natselrate = natselrate;
res_ga.mutrate = mutrate;
res_ga.gama1 = gama1;
res_ga.gama2 = gama2;
res_ga.m = m;
res_ga.H = H;

if graf
    plotapadrao(structpwm(...
        [rad2deg(res_ga.alfas) 180-fliplr(rad2deg(res_ga.alfas))], ...
        cumsum([vt' fliplr(-vt')])), 4, m);
    % Traça os níveis de tensão sintetizáveis
    subplot(3,1,1);
    line([0 90], [Vdc(1) Vdc(1)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(2) Vdc(2)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(3) Vdc(3)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(4) Vdc(4)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(5) Vdc(5)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(6) Vdc(6)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(7) Vdc(7)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(8) Vdc(8)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(9) Vdc(9)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(10) Vdc(10)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(11) Vdc(11)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(12) Vdc(12)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    line([0 90], [Vdc(13) Vdc(13)], 'color', 'k', 'linestyle', ':')
    % Apresenta os resultados
    disp(['Tempo de execução: ' num2str(res_ga.evtime)])
    disp(['Custo mínimo = ' num2str(stats(gen+1,1))])
    disp(['Melhor cromossomo = ' num2str(rad2deg(P(1,:)))]])
    disp(['Resultado preciso = ' num2str(rad2deg(res_ga.alfas))])
    disp(['THD ótimo = ' num2str(res_ga.THHD)])

disp('=====')
)
    disp(' ')
    disp(' ')
end

%=====
% FUNÇÃO OBJETIVO
%=====
function [cost THD fshe] = fobj(x)
% Determina as magnitudes de cada harmônica
H = (4./(pi*y)).*(cos(y'*x)*vt)';

% Determina o custo da eliminação seletiva de harmônicas
fshe = sum(abs([H(1)-H1 H(he)]./H(1)).^2);

% Cálculo da THD

```

```

THD = 100*sqrt(sum(H(2:end).^2)/abs(H(1)));

% Calcula o custo do cromossomo
cost = fshe * THD^2;

end % Função objetivo

%=====
% OPERADOR DE CRUZAMENTO
%=====
function desc = crossfun(ma, pa)
% Função de cruzamento aritmética.
% ma e pa são cromossomos que originarão os descendentes

% Determina o fator de combinação
a = rand;
% Gera os descendentes combinando o cromossomo pai e mãe
desc = [a*ma + (1-a)*pa; a*pa + (1-a)*ma];

end % Função de cruzamento

%=====
% ELIMINAÇÃO SELETIVA DE HARMÔNICAS
%=====

function [alfas fval exitflag] = she(vt, vh, m, x0)
% Função para resolver o problema da eliminação seletiva de harmônicas
% Dados os parâmetros iniciais, a função retorna o vetor de ângulos de
% comutação que elimina as harmônicas desejadas e garante o índice de
% modulação especificado.

% Função objetivo para eliminação das harmônicas: a magnitude da
% fundamental deve ser igual ao índice de modulação desejado
sheprob = @(x) abs((4/pi*(cos(x)*vt)) - m);

% Restrições não lineares
% Desigualdades: não há
% Igualdades: as harmônicas que devem ser canceladas
restricnl = @(x) deal([], 4./(pi*vh).*(cos(vh*x)*vt));

% Resolve o sistema
[alfas fval exitflag] = fmincon(sheprob, x0, A, B, [], [], 0, pi/2,
restricnl, setup);

end % Eliminação seletiva de harmônicas

end % GA

```