

Júlio César Cavalcanti dos Santos

Ferramenta de Automação de PWM Vetorial para Sistemas Multidimensionais

Campina Grande, Brasil

14 de dezembro de 2015

Júlio César Cavalcanti dos Santos

Ferramenta de Automatização de PWM Vetorial para Sistemas Multidimensionais

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande - como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Orientador: Cursino Brandão Jacobina

Campina Grande, Brasil

14 de dezembro de 2015

Júlio César Cavalcanti dos Santos

Ferramenta de Automação de PWM Vetorial para Sistemas Multidimensionais

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande - como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Campina Grande, Brasil, 04 de dezembro de 2015:

Cursino Brandão Jacobina
Orientador

Professor
Convidado

Campina Grande, Brasil
14 de dezembro de 2015

*Ao Senhor,
pois tudo é dEle e para Ele.*

Agradecimentos

Agradeço ao Senhor, por guiar os meus passos e por sempre fazer muito mais do que peço ou penso.

Agradeço também à minha família, em quem sempre encontrei uma base sólida para me firmar. Aos meus pais, César e Eliete, cujo amor, esforço e dedicação sempre me fizeram buscar e alcançar os meus sonhos.

Agradeço ao professor Cursino pelo alto nível de orientação e disponibilidade.

Agradeço aos colegas e amigos que me ajudaram durante a minha caminhada. Dentre eles, destaco Ivan Silva, cuja ajuda foi de muita importância para a elaboração deste trabalho.

*"Oh profundidade da riqueza, tanto da sabedoria como do conhecimento de Deus!
Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis, os seus caminhos!
Quem, pois, conheceu a mente do Senhor? Ou quem foi o seu conselheiro?
Ou quem primeiro deu a Ele para que lhe venha a ser restituído?
Porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas.
A Ele, pois, a glória eternamente. Amém!"
(Bíblia Sagrada, Romanos 11:33-36)*

Resumo

Este trabalho apresenta uma ferramenta para automatização da técnica PWM vetorial em conversores estáticos numa abordagem que analisa o espaço multidimensional diretamente. A estratégia permite a escolha automática de um grupo adequado de vetores espaciais que possa sintetizar um dado vetor de referência. A ferramenta se baseia em critérios numéricos para a eleição do grupo de vetores adequado e se aplica a sistemas de três e quatro dimensões. As etapas de implementação do algoritmo de simulação e as estratégias adotadas para a redução do esforço computacional da mesma também são mencionadas.

A comprovação da eficácia da ferramenta é feita pela sua aplicação em dois sistemas. O primeiro consiste em uma topologia de um conversor de oito braços a quatro fios, representado em um espaço tridimensional. O segundo é uma topologia de um conversor de nove braços, cuja representação se dá em quatro dimensões. Ambos os sistemas são descritos e os resultados de suas simulações são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: conversores estáticos, PWM vetorial, sistemas multidimensionais, Ferramenta de Automatização de Técnica PWM Vetorial.

Abstract

This work presents a tool for the automation of space-vector PWM technique in static converters, directly applied to multi-dimensional vector spaces. The strategy permits an automatic choice of a group of voltage space vectors destined to synthesize a given reference voltage vector. Based in numeric criteria, the tool elects a group of appropriate vectors. The tool can be applied in three-dimensional and four-dimensional systems. The steps for the implementation of the simulation algorithm and the strategies adopted for the reduction of the computational effort are mentioned as well.

The effectiveness of the tool is proved by its application in two systems. The first one consists in a topology of a four-wire converter, represented by a three-dimensional space. The second one is a topology of a nine-leg converter, represented by a four-dimensional space. Both systems are described and the simulation results are presented and discussed.

Keywords: static converter, space-vector PWM, multi-dimensional systems, SVPWM Automation Tool, .

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma de ferramenta de Automatização de Técnica PWM Vetorial	6
Figura 2 – Espaço vetorial com seis vetores espaciais e um vetor de referência . . .	7
Figura 3 – Espaço vetorial com região triangular formada pelos vetores V_3 , V_4 e V_1	9
Figura 4 – Espaço vetorial com região triangular formada pelos vetores V_3 , V_4 e V_2	10
Figura 5 – Espaço vetorial com região triangular formada pelos vetores V_1 , V_2 e V_3	13
Figura 6 – Circuito de topologia de Conversor CC-CA Tipo Trifásico a Quatro Fios	18
Figura 7 – Circuito equivalente de topologia de Conversor CC-CA Tipo Trifásico a Quatro Fios	19
Figura 8 – Vetores espaciais para Conversor a Quatro Fios com $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$	23
Figura 9 – Conversor Trifásico de Nove Braços	25
Figura 10 – Conversor Trifásico - Topologia convencional	26
Figura 11 – Conversor Trifásico de Nove Braços	27
Figura 12 – Constelação v_{135_d} versus v_{135_q}	29
Figura 13 – Constelação v_{135_d} versus v_{246_d}	30
Figura 14 – Constelação v_{135_d} versus v_{246_q}	30
Figura 15 – Constelação v_{135_q} versus v_{246_d}	31
Figura 16 – Constelação v_{135_q} versus v_{246_q}	31
Figura 17 – Constelação v_{246_d} versus v_{246_q}	32
Figura 18 – Espaço vetorial com $\frac{v_{Ca}}{2} = \frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ para conversor a quatro fios. Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho.	39
Figura 19 – Tensão v_{g1} resultante dos chaveamentos (expressão (3.2)) para conversor a quatro fios.	39
Figura 20 – Tensão v_{g2} resultante dos chaveamentos (expressão (3.2)) para conversor a quatro fios.	40
Figura 21 – Tensão v_{g3} resultante dos chaveamentos (expressão (3.2)) para conversor a quatro fios.	40
Figura 22 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.	41
Figura 23 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_2 = A\angle 120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.	41
Figura 24 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_3 = A\angle -120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.	42

Figura 25 – Comparação entre tensão resultante v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.	42
Figura 26 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.	43
Figura 27 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.	43
Figura 28 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.	44
Figura 29 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.	44
Figura 30 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.	45
Figura 31 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor a quatro fios.	45
Figura 32 – Constelação de vetores espaciais (em azul) e vetores de referência (em vermelho) para conversor a quatro fios.	46
Figura 33 – Tensão v_{g1} resultante dos chaveamentos (expressão (3.3)) para conversor a quatro fios.	47
Figura 34 – Tensão v_{g2} resultante dos chaveamentos (expressão (3.3)) para conversor a quatro fios.	47
Figura 35 – Tensão v_{g3} resultante dos chaveamentos (expressão (3.3)) para conversor a quatro fios.	48
Figura 36 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.	48
Figura 37 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_2 = A\angle 120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.	49
Figura 38 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_3 = A\angle -120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.	49
Figura 39 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.	50

Figura 40 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.	50
Figura 41 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.	51
Figura 42 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.	51
Figura 43 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.	52
Figura 44 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.	52
Figura 45 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor a quatro fios.	53
Figura 46 – Plano v_{135_d} versus v_{135_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.	53
Figura 47 – Plano v_{135_d} versus v_{246_d} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.	54
Figura 48 – Plano v_{135_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.	54
Figura 49 – Plano v_{135_q} versus v_{246_d} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.	55
Figura 50 – Plano v_{135_q} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.	55
Figura 51 – Plano v_{246_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.	56
Figura 52 – Tensão v_{nha} para conversor de nove braços.	56
Figura 53 – Tensão v_{nhb} para conversor de nove braços.	57
Figura 54 – Tensão v_{nhc} para conversor de nove braços.	57
Figura 55 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços.	58
Figura 56 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_3 = A\angle 120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços.	58
Figura 57 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_5 = A\angle -120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços.	59

Figura 58 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor de nove braços.	59
Figura 59 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor de nove braços.	60
Figura 60 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g5} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_5 (em verde) para conversor de nove braços.	60
Figura 61 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor de nove braços.	61
Figura 62 – Plano v_{135_d} versus v_{135_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços. . . .	61
Figura 63 – Plano v_{135_d} versus v_{246_d} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços. . . .	62
Figura 64 – Plano v_{135_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços. . . .	62
Figura 65 – Plano v_{135_q} versus v_{246_d} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho.	63
Figura 66 – Plano v_{135_q} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços. . . .	63
Figura 67 – Plano v_{246_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços. . . .	64
Figura 68 – Tensão v_{nha} para conversor de nove braços.	64
Figura 69 – Tensão v_{nhb} para conversor de nove braços.	65
Figura 70 – Tensão v_{nhc} para conversor de nove braços.	65
Figura 71 – Tensão v_{mha} para conversor de nove braços.	66
Figura 72 – Tensão v_{mhb} para conversor de nove braços.	66
Figura 73 – Tensão v_{mhc} para conversor de nove braços.	67
Figura 74 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_2 = A\angle 30^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços. . . .	67
Figura 75 – Comparação entre média resultante dos chaveamentos (azul) e tensão de referência $\hat{E}_4 = A\angle 150^\circ$ (verde) para conversor de nove braços. . . .	68
Figura 76 – Comparação entre média resultante dos chaveamentos (azul) e tensão de referência $\hat{E}_6 = A\angle -90^\circ$ (verde) para conversor de nove braços. . . .	68
Figura 77 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor de nove braços.	69

Figura 78 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor de nove braços.	69
Figura 79 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g5} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_5 (em verde) para conversor de nove braços.	70
Figura 80 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor de nove braços.	70
Figura 81 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g4} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_4 (em verde) para conversor de nove braços.	71
Figura 82 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g6} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_6 (em verde) para conversor de nove braços.	71
Figura 83 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor de nove braços.	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Vetores espaciais e suas respectivas distâncias ao vetor de referência, no exemplo da Fig. 2	7
Tabela 2 – Vetores espaciais ranqueados em ordem crescente de distâncias para o exemplo da Fig. 2	8
Tabela 3 – Varredura de combinações de distâncias para o exemplo da Fig. 2 . . .	16
Tabela 4 – Varredura para o exemplo da Fig. 2 com aplicação de estratégia para redução do número de combinações avaliadas	17
Tabela 5 – Vetores espaciais não repetidos para conversor a quatro fios com $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ - Parte A.	21
Tabela 6 – Vetores espaciais não repetidos para conversor a quatro fios com $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ - Parte B	22
Tabela 7 – Legenda dos Gráficos das Figs 12 a 17	33

Lista de abreviaturas e siglas

AC	Corrente Alternada (<i>Alternating current</i>)
DC	Corrente Contínua (<i>Direct current</i>)
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>).
LSPWM	(<i>Level-Shifted Pulsewidth Modulation</i>)
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>).
MOS	Metal Óxido Semicondutores (<i>Metal Oxide Semiconductors</i>).
PSPWM	(<i>Phase-Shifted Pulsewidth Modulation</i>)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>).
SHE	Eliminação Seletiva de Harmônicos (<i>Selective-Harmonic-Elimination</i>)
SVPWM	Modulação por Largura de Pulso Baseada em Portadora (<i>Space-vector Pulsewidth Modulation</i>)
VSD	Decomposição Espacial Vetorial (<i>Vectos Space Decomposition</i>)

Lista de símbolos

0_k	ponto médio do braço capacitivo k , com $k = \{a, b\}$.
A	amplitude de tensão de referência
a, b e c	termo que nomeia um conversor monofásico
d_{jk}^*	distância euclidiana no espaço n -dimensional entre o vetor de referência V_k^* e o vetor espacial V_j .
\hat{E}_j	tensão de referência j com $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$.
f	frequência da rede elétrica
gkj	tensão no ponto médio do braço j , com $k = \{a, b\}$ e $j = \{1, 2, 3, 4\}$.
h_g	passo de cálculo geral.
h_r	passo de cálculo para atualização de referências.
$\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}, \hat{l}$	vetores unitários que indicam a direção positiva de eixos ortogonais
i_{ha}, i_{hb}, i_{hc}	correntes do sistema
i_{sj}	correntes escalares, com $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
i_{gj}	corrente resultante, com $j = \{1, 2, 3, 4\}$.
L_g	valor de indutância no indutor.
n	número de dimensões do sistema.
n_f	número de fases do sistema.
n_k, m_k e h_k	pontos médios dos braços do conversor, com $k = \{a, b, c\}$.
n_v	número de vetores espaciais.
P	matriz de transformação entre sistemas 123 e odq
p_c	número de possibilidades de chaveamento.
q_{gkj}	estado da chave do lado k com $k = \{a, b\}$ e $j = \{1, 2, 3, 4\}$.
\mathbb{R}	conjunto dos números reais.
t_{on}	tempo em que chave semicondutora permanece em estado de condução.

t_{off}	tempo em que chave semicondutora permanece em estado de bloqueio.
t_c	período de chaveamento total.
t_j	tempo de chaveamento relativo a um dos vetores espaciais.
T_s	matriz de tempos de chaveamento t_j .
v_{0a0b}	tensão de neutro.
v_{Ck}	tensão do barramento CC k para $k = \{a, b, c\}$.
v_{gkj0k}	tensão de pólo entre ponto 0_k e ponto médio do braço k , com $k = \{a, b\}$ e $j = \{1, 2, 3\}$.
v_{gj}	tensão resultante, com $j = \{1, 2, 3\}$
V_j	vetor espacial.
v_{jx}	valores assumidos pelo vetor espacial em cada uma das dimensões do sistema.
V_k^*	vetor de referência.
v_{kx}	valores assumidos pelo vetor de referência em cada uma das dimensões do sistema.
v_{nhk}, v_{mhh}	tensões obtidas pela diferença entre as tensões de pólo de um mesmo conversor
$v_{nk0_k}, v_{mk0_k}, v_{hk0_k}$	tensões de pólo entre pontos médios dos braços e pontos médios dos barramentos capacitivos, com $k = \{a, b, c\}$.
v_{sj}	tensões resultantes dos chaveamentos
$v_{135_d}, v_{135_q}, v_{246_d}, v_{246_q}$	coordenadas no sistema dq
V_s	matriz composta pelas coordenadas dos vetores espaciais.
V_{vs}	matriz composta pelas coordenadas do vetor de referência.
ω	frequência angular da rede elétrica.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	FERRAMENTA DE AUTOMATIZAÇÃO DE TÉCNICA PWM VE- TORIAL	4
2.1	Etapa 1: Cálculo de distâncias em n dimensões	6
2.2	Etapa 2: Determinação do grupo de vetores que atende ao Critério 1	6
2.3	Etapa 3: Avaliação de Atendimento ao Critério 2	12
3	CONVERSOR DE OITO BRAÇOS A QUATRO FIOS	18
4	CONVERSOR DE NOVE BRAÇOS	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	Conversor de Oito Braços A Quatro Fios	34
5.1.1	Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ e $A = 1.1547pu$	34
5.1.2	Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ e $A = 2.3094pu$	35
5.2	Conversor de Nove Braços	36
5.2.1	Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$; $A = 1.1547pu$; $\theta = 0^\circ$.	36
5.2.2	Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$; $A = 1.1547pu$; $\theta = 30^\circ$	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	Referências	75

1 Introdução

A Eletrônica de Potência é uma ramificação da Engenharia Elétrica na qual se estuda o controle e o processamento do fluxo de energia elétrica das fontes de alimentação disponíveis (rede elétrica, geradores, baterias etc.) através de dispositivos semicondutores de potência de modo a fornecer tensões e correntes adequadas para as cargas. A área ganhou evidência a partir da invenção do tiristor, no final da década de 1950. O MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) inaugurou uma nova era na história dos semicondutores de potência a partir da década de 1970. A combinação das vantagens dos MOS (Metal Oxide Semiconductors) e de dispositivos bipolares permitiu o desenvolvimento de outro componente revolucionário nos anos 1980, o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Sistemas de acionamento de máquinas elétricas, por exemplo, puderam ser melhorados graças aos recentes avanços das técnicas de controle e da Eletrônica de Potência, assim como da Microeletrônica e dos sistemas microprocessados [1, 2, 3, 4].

Conversores estáticos, como retificadores e inversores, são utilizados na Eletrônica de Potência para realizar o controle da energia elétrica entre sistemas elétricos de potência. Em tais conversores, a tensão de saída deve ser controlada mediante alterações na tensão de entrada ou variações de carga. Isto é feito a partir do controle dos tempos em que as chaves semicondutoras estão ligadas (estado de condução) e desligadas (estado de bloqueio). Tais tempos são denominados de t_{on} e t_{off} , respectivamente. O método de controle que emprega uma frequência de comutação constante e controla o tempo de condução das chaves é denominado Modulação por Largura de Pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) [5]. Na implementação digital do PWM, tensões instantâneas são geradas pelo inversor de maneira que o valor médio das mesmas é igual à tensão de referência em um período de chaveamento t_c [6].

Dentre as técnicas de modulação existentes, destacam-se na literatura a eliminação seletiva de harmônicos (*Selective-harmonic-elimination*, SHE), a modulação por largura de pulso baseada em portadora (*Carrier-based Pulsewidth Modulation*) e a modulação por largura de pulso vetorial (*Space-vector Pulsewidth Modulation*, SVPWM). A técnica SHE permite determinar o chaveamento adequado em um conversor de potência de maneira que harmônicos de baixa ordem na saída do sistema sejam eliminados [7, 8]. Na modulação PWM baseada em portadora, os estados das chaves são definidos a partir da comparação de um sinal de referência e uma portadora triangular [9]. As técnicas Level-Shifted PWM (LSPWM) e Phase-Shifted PWM (PSPWM), amplamente utilizadas na indústria, são derivadas deste tipo de modulação [10].

A técnica SVPWM se tornou bastante popular devido à facilidade de sua imple-

mentação digital e por melhor utilizar os barramentos de tensão disponíveis dos conversores [11]. Nesta técnica, as tensões de saída são representadas por *vetores espaciais*, que são obtidos por meio das combinações de chaveamento do conversor utilizado. Qualquer *vetor de referência* localizado no espaço delimitado pelos vetores espaciais pode ser representado pela média ponderada destes. Assim, os estados das chaves podem ser determinados para a obtenção de uma saída desejada. Em outras palavras, os vetores espaciais delimitam regiões nas quais os vetores de referência podem ser localizados e descritos.

A escolha do melhor grupo de vetores espaciais para representar um vetor de referência é um dos principais desafios da técnica SVPWM. Num sistema trifásico, por exemplo, que apresenta um espaço bidimensional, este grupo é formado por três vetores espaciais que sejam os mais próximos possíveis do vetor de referência e que delimitem uma região triangular em que tal vetor possa ser localizado [12]. Portanto, a escolha dos melhores vetores neste caso é bastante simples. Entretanto, para sistemas multifásicos (com mais de três fases), tal análise não é trivial, devido ao crescimento exponencial da quantidade de vetores espaciais à medida que o número de fases aumenta: um sistema com n_f fases apresenta 2^{n_f} vetores espaciais¹[11]. O aumento do número de dimensões do sistema também torna a análise dos vetores mais dificultosa.

Uma técnica utilizada para superar a complexidade do método SVPWM em sistemas multidimensionais é denominada de *VSD* (*Vector Space Decomposition*) [13]. Nesta, o espaço vetorial é decomposto em subespaços vetoriais bidimensionais ortogonais entre si. A escolha de um grupo de vetores espaciais para a síntese da tensão de referência se dá pela análise dos planos obtidos de maneira a minimizar a quantidade de chaveamentos e obter um melhor aproveitamento do barramento CC. Apesar de eficaz, a técnica requer uma extensa análise visual de vetores e é, portanto, ainda bastante trabalhosa.

A literatura também apresenta técnicas para seleção de vetores espaciais que se baseiam diretamente no espaço multidimensional. Em [11], tais técnicas são divididas em dois grupos. No primeiro, os vetores são selecionados diretamente no espaço, como em [14]. Nesta, o que foi desenvolvido no espaço tridimensional é estendido para mais dimensões. Uma análise baseada em setores delimitados pelos vetores espaciais é sugerida. Entretanto, conclui-se que o número elevado de setores pode tornar tal solução inviável. O segundo grupo, apresentado em abordagens como [15, 16, 17], procura determinar vetores sem uma análise setorial. Critérios numéricos para a seleção de vetores espaciais podem ser encontrados em [15] e [18].

Este trabalho apresenta uma nova ferramenta computacional que seleciona, a partir de critérios numéricos, um grupo ótimo de vetores espaciais no espaço multidimensional

¹ Tal relação considera que a quantidade de fases do sistema é numericamente igual ao de braços do mesmo e que cada um destes braços apresenta dois estados, como os sistemas convencionais mostrados em [11]. Entretanto o número de vetores espaciais pode ser diferente em configurações não-convencionais, tais como as apresentadas no terceiro e quarto capítulos deste trabalho.

para cada vetor de referência desejado. Portanto, dispensa-se a necessidade de decomposição vetorial e da análise visual de vetores, já que os mesmos são examinados no próprio espaço vetorial do sistema em estudo. As entradas do sistema desenvolvido são os vetores espaciais do conversor utilizado, o vetor de referência que se deseja gerar na saída e o período de chaveamento do sistema. O algoritmo implementado aplica a técnica SVPWM e permite que os melhores vetores para representar a saída desejada e seus respectivos tempos de chaveamento sejam obtidos. Estratégias para a redução do custo computacional do algoritmo também foram desenvolvidas. No trabalho, a ferramenta se destina a problemas no espaço de três ou quatro dimensões, mas pode ser facilmente adaptada para dimensões maiores.

O documento é organizado em quatro capítulos. No primeiro, a ferramenta desenvolvida é descrita. O segundo capítulo apresenta uma topologia de um conversor de oito braços a quatro fios, circuito que exige uma representação em três dimensões. No terceiro capítulo, analisa-se uma topologia de um conversor trifásico de nove braços, que requer quatro dimensões para ser representado. Os resultados da aplicação da ferramenta nos circuitos tratados nos capítulos anteriores são apresentados e analisados no quarto e último capítulo.

2 Ferramenta de Automatização de Técnica PWM Vetorial

A modulação por largura de pulso vetorial é uma técnica bastante popular para o controle de chaves semicondutoras de um conversor, principalmente em sistemas trifásicos [12]. A literatura tem apresentado diversas abordagens que estendem o SVPWM para sistemas multifásicos, como a decomposição espacial vetorial (VSD) [13]. Nesta, o espaço vetorial original do sistema é decomposto em espaços vetoriais ortogonais bidimensionais. Diferentemente da VSD, outras estratégias lidam diretamente com o espaço multidimensional [14, 15, 16, 17, 18]. A ferramenta abordada neste trabalho é um destes casos. A mesma utiliza critérios matemáticos para a escolha do melhor grupo de vetores espaciais para a síntese de um vetor de referência, de maneira a automatizar a técnica SVPWM e evitar a extensa análise visual de vetores demandada por outras alternativas. Este capítulo tem por objetivo descrever tal ferramenta, incluindo as estratégias que reduzem o custo computacional da mesma. Para fins didáticos, o capítulo também aborda um exemplo de aplicação da ferramenta num caso bidimensional.

A técnica SVPWM requer o conhecimento de todos os vetores espaciais do sistema a ser analisado e precisa selecionar um grupo deles que possa representar uma saída desejada. A primeira alternativa de chaveamento ótimo¹ para a obtenção de um vetor de referência num sistema n -dimensional pode ser obtida com a utilização dos $n + 1$ vetores espaciais mais próximos a ele, ou seja, com o grupo de vetores cujo somatório de distâncias em relação ao vetor de referência seja o mínimo existente. Entretanto, é possível que o vetor de referência não esteja localizado no espaço delimitado pelos vetores espaciais e portanto, que tal grupo não forneça tempos de chaveamento não negativos, conforme abordado em [15] e [18]. Neste caso, o chaveamento do conversor é impraticável. Assim, deve-se recorrer a outro grupo de vetores que seja o mais próximo possível do vetor de referência e que resulte em tempos de chaveamento não negativos. A escolha dos vetores espaciais mais próximos ao vetor de referência permite uma melhor utilização dos barramentos CC do conversor em estudo e uma baixa ondulação (*ripple*) de corrente.

Em suma, pode-se estabelecer dois critérios para a escolha do grupo ótimo de vetores espaciais para a síntese de um dado vetor de referência:

- **Critério 1:** A soma das distâncias em n dimensões entre os vetores espaciais e o vetor de referência deve ser a *menor possível*.

¹ O termo “ótimo” é relativo, já que depende das características desejadas para o grupo de vetores. Neste trabalho, chamaremos de *grupo ótimo* ou *melhor grupo de vetores espaciais para a síntese de um dado vetor de referência* aquele que atender aos Critérios 1 e 2.

- **Critério 2:** Os tempos de chaveamento relativos aos vetores espaciais devem ser não negativos e seu somatório deve resultar no tempo de chaveamento total.

A Ferramenta de Automatização de Técnica PWM Vetorial se baseia nos dois critérios supracitados. A mesma deve receber como entradas o número de dimensões do sistema analisado (n), os vetores espaciais V_j não repetidos (as diversas possibilidades de chaveamento podem gerar vetores de mesmos valores), o vetor de referência V_k^* a ser representado, o período de chaveamento do conversor (t_c) e o número de possibilidades de chaveamento (p_c) para n_v vetores espaciais dados. Os grupos de vetores V_j e V_k^* e o termo p_c são descritos a partir das expressões (2.1) a (2.3) para um sistema n -dimensional. Os termos v_{jx} com $x = \{1, 2, \dots, n\}$ na expressão (2.1) indicam os valores assumidos por V_j em cada uma das dimensões do vetor. O mesmo ocorre com os termos v_{kx}^* na expressão (2.2). Nesta, n_s corresponde ao número total de vetores de referência. Como saídas, a ferramenta retorna os $n + 1$ melhores vetores espaciais e seus respectivos tempos de chaveamento.

$$V_j = (v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jn}), \quad j = \{1, \dots, n_v\} \quad (2.1)$$

$$V_k^* = (v_{k1}^*, v_{k2}^*, \dots, v_{kn}^*), \quad k = \{1, \dots, n_s\} \quad (2.2)$$

$$p_c = \binom{n_v}{n+1} = \frac{n_v!}{(n+1)!(n_v - (n+1))!}, \quad n_v \geq (n+1) \quad (2.3)$$

A ferramenta foi implementada em três etapas. A primeira delas é o cálculo de distâncias em n dimensões entre o vetor de referência e os vetores espaciais. A segunda é a determinação do grupo de vetores que atende ao Critério 1. Na terceira etapa, avalia-se se o grupo escolhido satisfaz ao Critério 2. As duas últimas etapas são realizadas por meio de iterações, que podem ocorrer p_c vezes. Caso a avaliação da terceira etapa indique que o Critério 2 não será obedecido, o algoritmo volta à segunda etapa e determina um novo grupo de vetores que satisfaça ao Critério 1. O processo se repete até que um conjunto de vetores espaciais obedeça aos dois critérios ou que se conclua que tal grupo não existe. A ferramenta pode ser expressa simplificada através do fluxograma apresentado na Fig. 1.

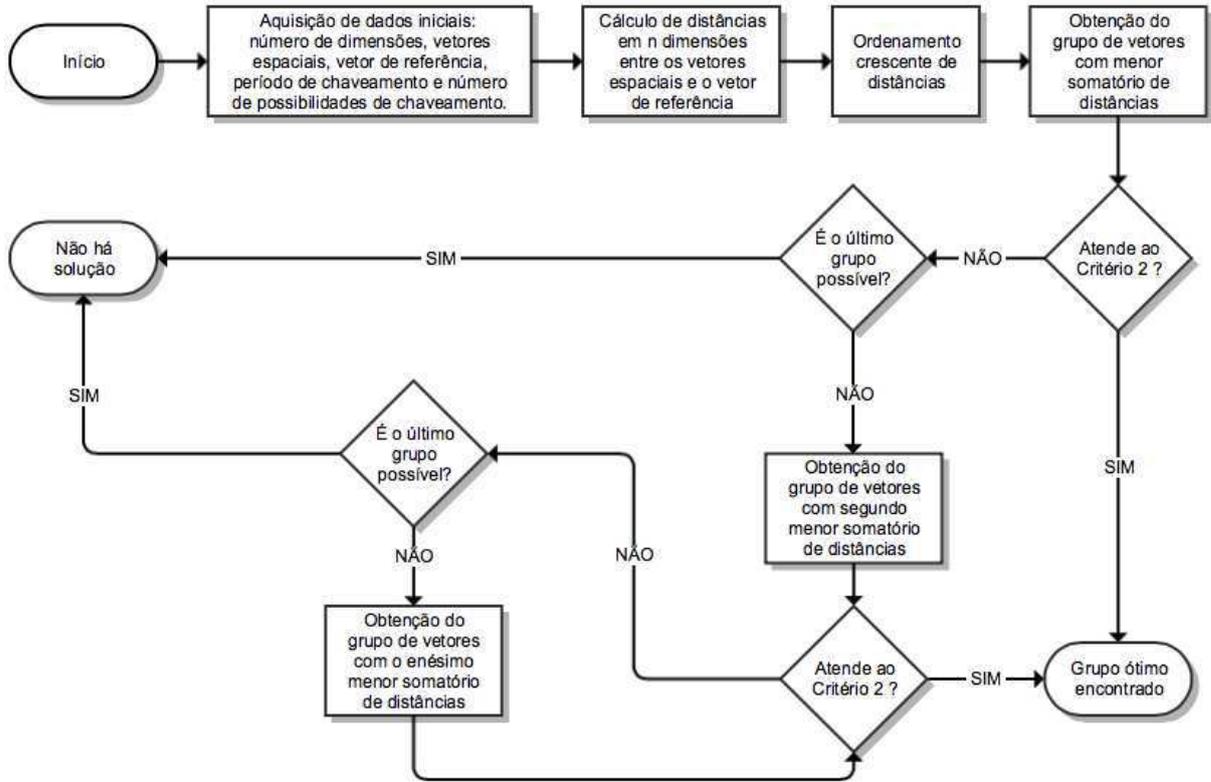


Figura 1 – Fluxograma de ferramenta de Automatização de Técnica PWM Vetorial

2.1 Etapa 1: Cálculo de distâncias em n dimensões

Inicialmente, calcula-se a distância euclidiana no espaço n -dimensional entre o vetor de referência V_k^* e cada um dos vetores espaciais V_j , dada pela expressão (2.4).

$$d_{jk^*} = \sqrt{(v_{k1}^* - v_{j1})^2 + (v_{k2}^* - v_{j2})^2 + \dots + (v_{kn}^* - v_{jn})^2} = \sqrt{\sum_{x=1}^n (v_{kx}^* - v_{jx})^2} \quad (2.4)$$

A Fig. 2 apresenta um espaço bidimensional com seis vetores espaciais representados pelo símbolo (*). São eles $V_1 = (0,0)$, $V_2 = (3.266,0)$, $V_3 = (1.633,1.633)$, $V_4 = (1.6330,2.8284)$, $V_5 = (1.6330,-2.8284)$ e $V_6 = (-3.266,0)$. O vetor de referência, $V_k^* = (1.6,1)$, é simbolizado por (o). A partir da expressão (2.4) é possível determinar as distâncias entre cada vetor espacial e o vetor de referência. As mesmas estão dispostas na Tab. 1.

2.2 Etapa 2: Determinação do grupo de vetores que atende ao Critério 1

A ferramenta ordena todos os vetores espaciais em uma lista de acordo com a ordem crescente das distâncias calculadas pela expressão (2.4). A Tab. 2 apresenta tal

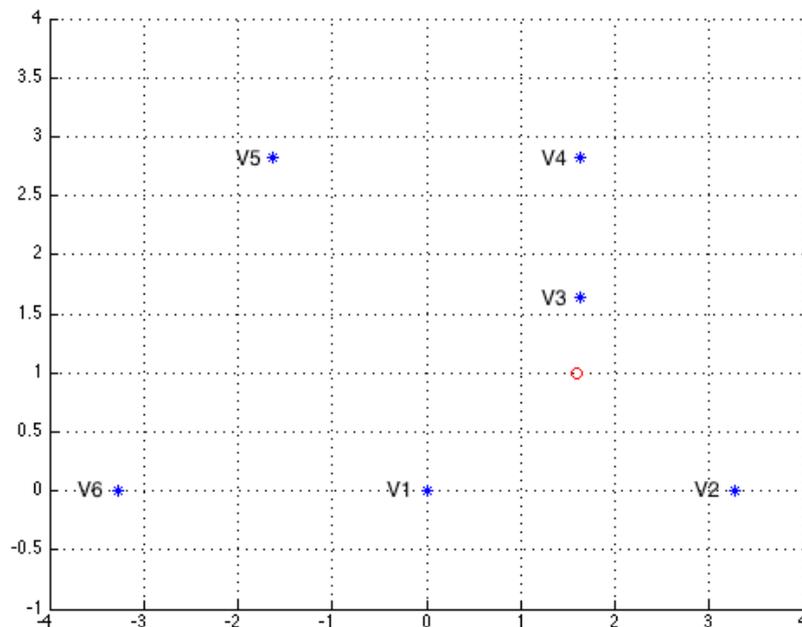


Figura 2 – Espaço vetorial com seis vetores espaciais e um vetor de referência

Tabela 1 – Vetores espaciais e suas respectivas distâncias ao vetor de referência, no exemplo da Fig. 2

Vetor espacial	Distância de $V_k^* = (1.6, 1)$
V_1	1.8868
V_2	1.9431
V_3	0.6339
V_4	1.8287
V_5	3.7142
V_6	4.9677

ordenamento para o exemplo da Fig. 2. O vetor $V_3 = (1.633, 1.633)$, por exemplo, apresenta a menor distância com relação ao vetor $V_k^* = (1.6, 1)$ e ocupa a primeira posição no ordenamento.

A partir do ordenamento das distâncias, busca-se encontrar um grupo de $n + 1$ vetores espaciais cujo somatório de distâncias seja o mínimo possível (Critério 1). A solução do problema é trivial: o menor somatório é composto pelos $n + 1$ primeiros vetores da lista ordenada. Se tal grupo atender ao Critério 2, esta é a resposta procurada. Em caso negativo, a ferramenta deverá encontrar o conjunto de vetores espaciais que apresenta um somatório de distâncias com o mesmo valor que o anterior ou, no caso de tal conjunto não existir, o grupo com o *segundo* menor somatório de distâncias. Este grupo é composto

Tabela 2 – Vetores espaciais ranqueados em ordem crescente de distâncias para o exemplo da Fig. 2

Posição	Vetor espacial	Distância de $V_k^* = (1.6, 1)$
1 ^a	V_3	0.6339
2 ^a	V_4	1.8287
3 ^a	V_1	1.8868
4 ^a	V_2	1.9431
5 ^a	V_5	3.7142
6 ^a	V_6	4.9677

pelos n primeiros termos da lista e pelo $(n + 2)$ -ésimo elemento dela. Por simplicidade, tal fato é atestado apenas para o caso bidimensional na Demonstração 2.1, mas um raciocínio análogo pode ser utilizado para casos com três ou mais dimensões.

Demonstração 2.1. *Num espaço vetorial bidimensional, para um grupo de vetores espaciais ordenados em uma lista de acordo com a ordem crescente das distâncias entre eles e um dado vetor de referência, a segunda melhor alternativa de grupo ótimo, em obediência ao Critério 1, será dada pelo primeiro, segundo e quarto elementos da lista.*

Para cada vetor espacial, associa-se uma distância ao vetor de referência dada por $d_x \in \mathbb{R}$, em que $x = \{1, 2, \dots, n_v\}$. Assume-se que $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_{n_v}$. Deve-se escolher o conjunto de três distâncias cujo somatório seja maior ou igual que $d_1 + d_2 + d_3$ e menor ou igual que todos as outras somas possíveis. A quantidade total de somas existentes é dada por $p_c = \binom{n_v}{3}$, de acordo com a expressão (2.3).

Como $d_4 \geq d_3$, temos que $d_1 + d_2 + d_4 \geq d_1 + d_2 + d_3$. Todos os somatórios possíveis, com exceção de $d_1 + d_2 + d_3$ e $d_1 + d_2 + d_4$, podem ser expressos por $d_j + d_k + d_l$, com $l > k > j$ e $j = \{1, \dots, (n_v - 2)\}$, $k = \{2, \dots, (n_v - 1)\}$ e $l = \{4, \dots, n_v\}$. Para $a, b, c \in \mathbb{R}$ e $a \geq 0, b \geq 0$ e $c \geq 0$, assume-se que:

$$d_j = d_1 + a$$

$$d_k = d_2 + b$$

$$d_l = d_4 + c$$

Assim, tem-se que:

$$d_j + d_k + d_l = d_1 + a + d_2 + b + d_4 + c \geq d_1 + d_2 + d_4$$

Conclui-se que somatório $d_1 + d_2 + d_4$ é a resposta procurada, de maneira que o primeiro, segundo e quarto elementos da lista de vetores espaciais ordenada em ordem crescente é a segunda melhor alternativa de grupo ótimo.

No exemplo da Fig. 2, o primeiro candidato a grupo ótimo de vetores é composto por V_3 , V_4 e V_1 , que correspondem aos três primeiros vetores da Tab. 2. A soma $d_{3n^*} + d_{4n^*} + d_{1n^*} = 0.6339 + 1.8287 + 1.8868$ resulta no mínimo somatório possível entre três distâncias da Tab. 2, que é 4.3494. Os vetores V_3 , V_4 e V_1 descrevem a região triangular apresentada na Fig. 3. Todavia, tais vetores não satisfazem ao Critério 2, por razões apontadas na seção 2.3. Portanto, um novo conjunto deve ser testado. Tal grupo é formado pelo primeiro, segundo e quarto vetores ordenados da Tab. 2, que são V_3 , V_4 e V_2 . Estes determinam o segundo menor somatório de distâncias do exemplo, dado por $d_{3n^*} + d_{4n^*} + d_{2n^*} = 0.6339 + 1.8287 + 1.9431 = 4.4057$. A região determinada pelos vetores V_3 , V_4 e V_2 é apresentada na Fig. 4. Pela seção 2.3, conclui-se que tais vetores também não satisfazem ao Critério 2.

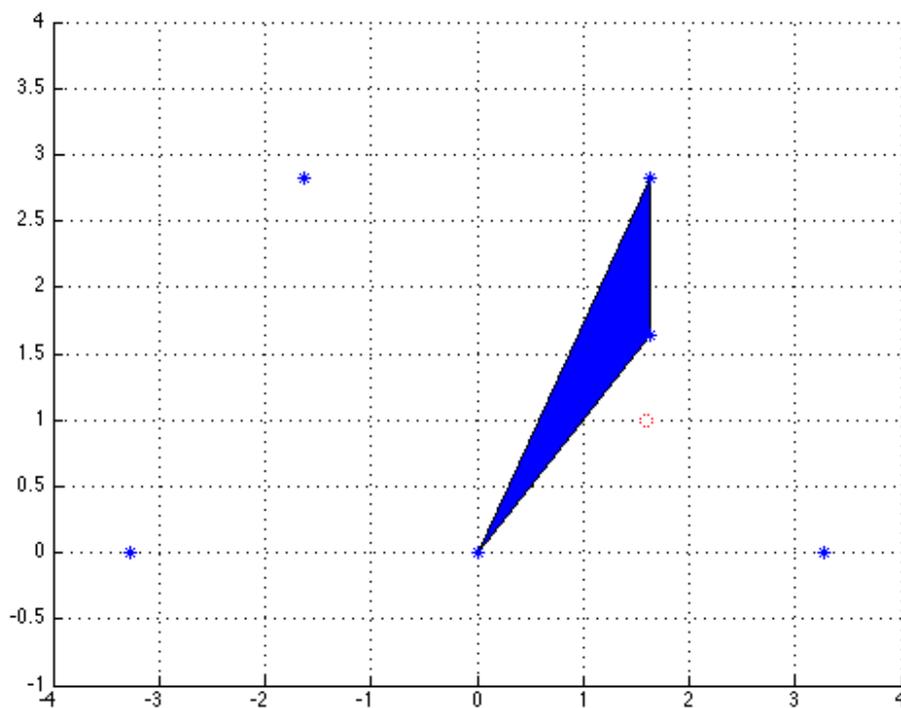


Figura 3 – Espaço vetorial com região triangular formada pelos vetores V_3 , V_4 e V_1

Se o segundo melhor candidato à combinação ótima de vetores espaciais não satisfizer ao Critério 2, a ferramenta deve encontrar uma terceira alternativa. A determinação dos melhores candidatos, a partir do terceiro, envolve uma complexidade bem maior que nos casos anteriores. Dentre os diversos grupos existentes, faz-se necessário identificar aquele cujo somatório de distâncias seja igual ou maior² que os últimos candidatos analisados e menor que todos os outros restantes. A terceira alternativa, por exemplo, deve apresentar uma somatório de distâncias que seja maior ou igual que a primeira e a segunda

² Entre um candidato com somatório igual aos anteriores e um com soma maior que os antecessores, dá-se prioridade ao primeiro.

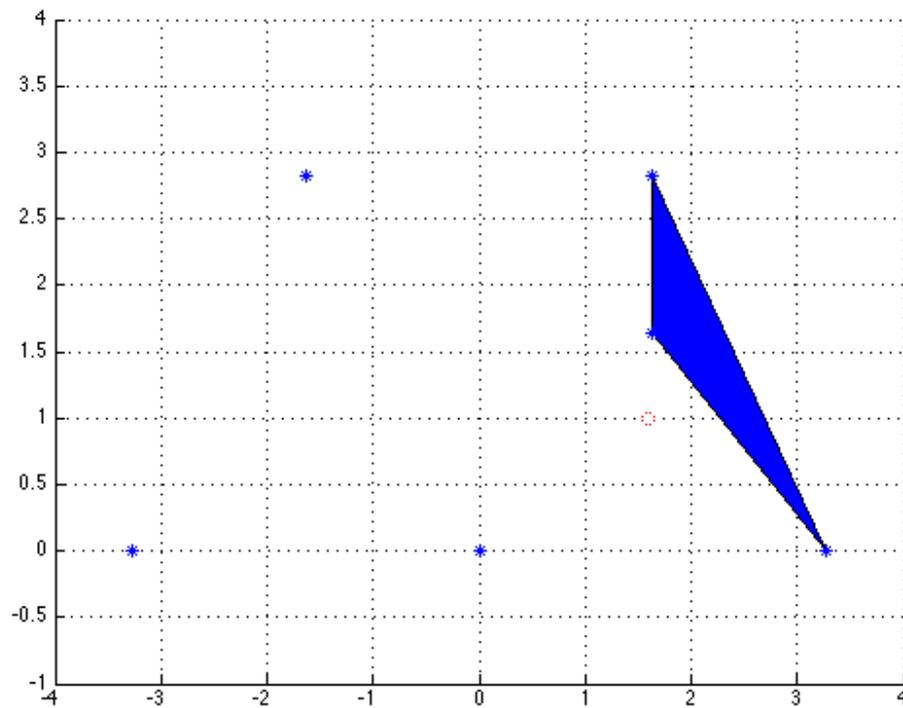


Figura 4 – Espaço vetorial com região triangular formada pelos vetores V_3 , V_4 e V_2

opções e que seja menor ou igual que todos os somatórios relativos às outras combinações possíveis.

Neste trabalho, um algoritmo foi desenvolvido para a determinação dos melhores candidatos a grupo ótimo de vetores espaciais quando a primeira e a segunda alternativas não atenderem ao Critério 2. O mesmo foi idealizado de maneira que não seja necessária a análise de todas as combinações possíveis de vetores, reduzindo o esforço computacional.

Como há uma distância associada a cada um dos n_v vetores espaciais e o vetor de referência, é possível fazer uma análise sob o ponto de vista de combinações de distâncias. Para que o algoritmo funcione corretamente, é necessário que tais combinações sejam avaliadas. O mesmo deve realizar o somatório relativo a cada uma delas e identificar se tal soma corresponde à enésima menor, o que significa que os vetores que apresentam tais distâncias formam o enésimo melhor candidato a grupo ótimo de vetores.

A varredura das combinações de distâncias, ranqueadas em uma sequência crescente, acontece em uma ordem determinada. Tal varredura ocorre em etapas, nas quais são analisados grupos de combinações seguidas cujos n primeiros termos permanecem iguais (apenas o último elemento varia). Assim, no exemplo da Fig. 2, cada etapa da varredura corresponde ao grupo de combinações cujos dois primeiros termos são iguais, pois neste caso o sistema é bidimensional ($n = 2$). A Tab. 3 apresenta a ordem de varredura para este exemplo. Os seis elementos em cada linha de sua terceira coluna correspondem às dis-

tâncias em ordem crescente dadas pela Tab. 2. Os quadros pretos destacam as distâncias que compõem a combinação em análise. Conforme a expressão (2.3), há $p_c = \binom{6}{3} = 20$ combinações possíveis. Pela Tab. 3, a primeira etapa de varredura é composta pelas quatro primeiras combinações, que apresentam os termos 0.6339 e 1.8287 em comum. A segunda etapa é composta pelas quinta, sexta e sétima combinações, que apresentam os termos 0.6339 e 1.8868 em comum. As etapas prosseguem até a décima e última. A mesma é composta apenas pela vigésima combinação, cujos dois primeiros elementos não são comuns à anterior.

Para sistemas multidimensionais, de maneira generalizada, a primeira combinação avaliada será composta pelos $n + 1$ primeiros termos da lista de distâncias ordenadas em ordem crescente. A segunda, pelos n primeiros termos e o $(n + 2)$ -ésimo elemento dela. A terceira, pelos n primeiros termos e o $(n + 3)$ -ésimo elemento. Segue-se até o fim da primeira etapa, finalizada com os n primeiros termos e o n_v -ésimo elemento. A varredura prossegue na segunda etapa, cuja combinação inicial é formada pelas $n - 1$ primeiros termos, o $(n + 1)$ -ésimo e o $(n + 2)$ -ésimo elementos. A varredura segue até que se chegue à última combinação da última etapa, que consiste nos $n + 1$ últimos termos da lista.

No algoritmo da ferramenta, a primeira estratégia utilizada para a diminuição do número de combinações de distâncias analisadas é a *redução por etapas*. A identificação do p -ésimo melhor candidato a grupo ótimo de distâncias, com $1 \leq p \leq p_c$, se dá quando o $(p - 1)$ -ésimo grupo já foi identificado e o somatório relativo a este grupo já foi calculado. Logo, para a identificação do p -ésimo melhor candidato deve-se buscar um grupo de distâncias cujo somatório seja maior ou igual que os $p - 1$ somatórios anteriores e menor ou igual que as somas restantes. Se na varredura de uma das etapas uma alternativa for encontrada, todas as combinações posteriores da mesma etapa não precisarão ser analisadas, pois seus somatórios serão maiores que o da alternativa.

Na Tab. 3, por exemplo, se o terceiro melhor candidato a grupo ótimo de distâncias é desejado, deve-se encontrar aquele cujo somatório seja maior ou igual a 4.4056, segunda menor soma, e menor ou igual que os restantes. Na varredura de combinações, a primeira será descartada por ser menor que 4.4056. A segunda será descartada por ser exatamente a segunda melhor combinação. A terceira, em contrapartida, é uma candidata, pois $6.1718 > 4.4056$ (ver Tab. 3). O algoritmo não precisa analisar as outras combinações da primeira etapa (ou seja, a da quarta posição na varredura) e já pode pular para a avaliação da segunda.

Outra estratégia para a redução da quantidade de combinações avaliadas é a *diminuição por sequência de combinações com termos adjacentes*. Na Tab. 3 estas combinações são a primeira, a décima primeira, a décima sétima e a vigésima. Pode-se afirmar que se uma alternativa a p -ésimo candidato apresentar todos os seus termos vizinhos

e seu somatório é maior ou igual que o $(p - 1)$ -ésimo candidato, todas as combinações posteriores não precisam ser avaliadas, pois apresentarão somatórios maiores que o da alternativa. Na determinação do terceiro melhor candidato a grupo ótimo de distâncias no exemplo da Tab. 3, como a décima primeira combinação apresenta o somatório $1.8287 + 1.8868 + 1.9431 = 5.6586$, que é maior que o segundo menor somatório (4.4056), todas as combinações posteriores, da décima segunda à vigésima, não precisarão ser analisadas.

A junção das estratégias anteriores reduz significativamente o número total de combinações analisadas. De tais combinações remanescentes, a melhor será aquela que apresenta o menor somatório. Após a aplicação das estratégias, das 20 combinações da Tab. 3, apenas 7 precisam ser avaliadas (Tab. 4), o que constitui uma redução de 65% das análises.

A determinação do terceiro melhor candidato a grupo ótimo de vetores espaciais pode ser realizada a partir da Tab. 4. Como o somatório $0.6339 + 1.8868 + 1.9431 = 4.4637$ é maior que as somas relativas ao primeiro e segundo melhores candidatos e é inferior a todos os outros somatórios da tabela, conclui-se que esta é a combinação procurada. Pela Tab. 2, verifica-se que as distâncias que compõem tal somatório estão associadas aos vetores V_3 , V_1 e V_2 . Estes, portanto, são os elementos do terceiro melhor conjunto de vetores espaciais. A região determinada por eles é apresentada na Fig. 5. Pela seção 2.3, verifica-se que o grupo atende ao Critério 2. Conclui-se, assim, que este é o melhor conjunto de vetores espaciais para descrever o vetor de referência $V_k^* = (1.6, 1)$ no espaço apresentado na Fig. 2. Se não fosse, um quarto candidato deveria ser extraído da Tab. 3, num processo semelhante à escolha do terceiro.

No caso de haverem duas ou mais combinações alternativas com mesmo somatório de distâncias, tais combinações são agrupadas e o Critério 2 é testado uma a uma. A primeira que atender a tal Critério é selecionada como melhor candidata.

2.3 Etapa 3: Avaliação de Atendimento ao Critério 2

Depois de um grupo de $(n + 1)$ vetores num sistema n -dimensional passar pelo Critério 1, deve-se avaliar se o mesmo está associado a tempos de chaveamento $t_j \geq 0$ com $j = \{1, \dots, (n + 1)\}$ e se o somatório destes resulta no tempo de chaveamento total, t_c (expressão (2.5)).

$$\sum_{j=1}^{n+1} t_j = t_c \quad (2.5)$$

A determinação dos tempos de chaveamento é realizada a partir da expressão (2.6). Nesta, T_s (expressão (2.7)) corresponde à matriz de tais tempos. A matriz quadrada V_s

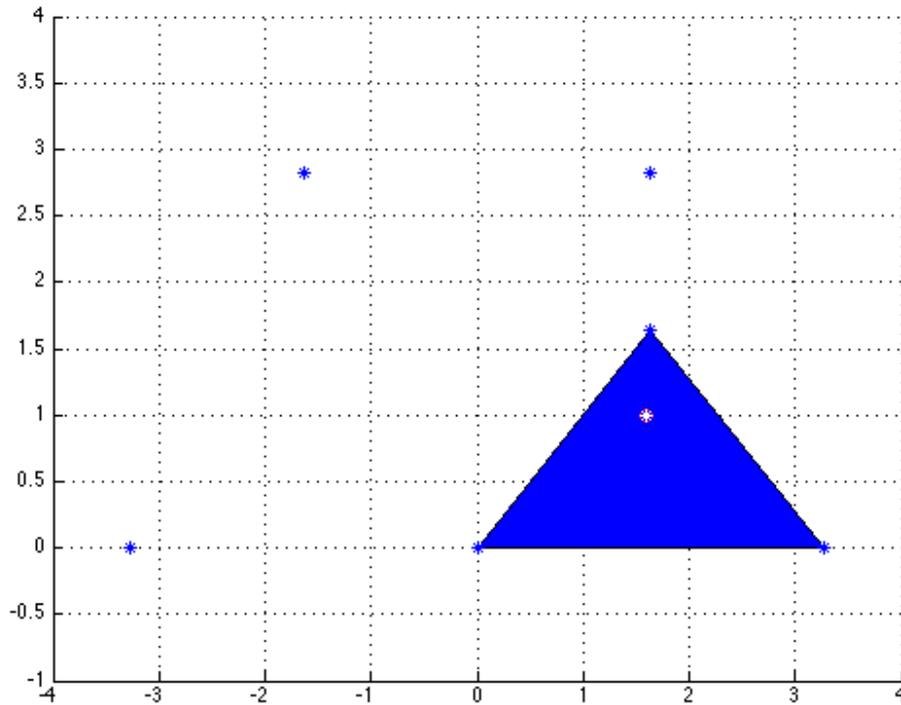


Figura 5 – Espaço vetorial com região triangular formada pelos vetores V_1 , V_2 e V_3

(expressão (2.8)), do tipo $(n + 1)$ por $(n + 1)$, é composta pelas coordenadas dos vetores espaciais e por uma linha de uns, necessária para que a expressão (2.6) seja satisfeita. Cada uma de suas colunas apresenta as coordenadas de um dos vetores espaciais, enquanto cada linha estabelece as coordenadas em cada dimensão. As coordenadas do vetor de referência estão dispostas na matriz V_{vs} (expressão (2.9)). A versão estendida da expressão (2.6) é apresentada em (2.10). Se ao menos um dos termos da matriz T_s for negativo, isso significa que o Critério 2 não foi satisfeito.

$$T_s = V_s^{-1}V_{vs}t_c \quad (2.6)$$

$$T_s = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_{n+1} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$V_s = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{(n+1)1} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{(n+1)2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1n} & v_{2n} & \dots & v_{(n+1)n} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$V_{vs} = \begin{bmatrix} v_{k1}^* \\ v_{k2}^* \\ \vdots \\ v_{kn}^* \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{(n+1)1} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{(n+1)2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1n} & v_{2n} & \dots & v_{(n+1)n} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{k1}^* \\ v_{k2}^* \\ \vdots \\ v_{kn}^* \\ 1 \end{bmatrix} t_c \quad (2.10)$$

Para o exemplo da Fig. 2, pode-se justificar o fato de o grupo de vetores V_3 , V_4 e V_1 não atender ao Critério 2 pela aplicação da expressão (2.10). Em (2.11), observa-se que um dos termos da matriz T_s relativa ao exemplo apresenta um termo negativo. Considera-se que o tempo de chaveamento é igual a uma unidade de tempo.

$$\begin{bmatrix} t_3 \\ t_4 \\ t_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.633 & 1.633 & 0 \\ 1.633 & 2.8284 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1.6 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} 1 = \begin{bmatrix} 1.4817 \\ -0.5019 \\ 0.0202 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A expressão (2.6) também pode ser escrita na forma da expressão (2.12), um sistema que pode ser impossível, possível e determinado ou possível e indeterminado. Se este for impossível, isso significa que o mesmo não apresentará soluções. Qualquer sistema desse tipo não passará pelo teste do Critério 2.

$$V_s T_s = V_{vs} t_c \quad (2.12)$$

Caso o sistema seja possível e determinado, o mesmo apresenta uma solução única, que pode ou não atender ao Critério 2. Se o sistema for possível e indeterminado, este terá infinitas soluções. Uma que atenda ao Critério 2 (se possível) poderá ser escolhida dentre elas. No último caso, o processo de escolha da solução se dá a partir de programação linear. Assumindo-se a forma $AT_s = B$, em que A e B são as matrizes resultantes do

sistema $V_s T_s = V_{vs} t_c$ colocado no formato em escada, a formulação da programação linear na ferramenta é dada por:

Minimize a soma dos termos do produto AT_s

Sujeito a:

$$AT_s = B$$

$$t_x \geq 0, x = \{1, 2, \dots, (n + 1)\}$$

Na ferramenta, valores de tempos entre $-\frac{t_c}{1000}$ e 0, calculados pela expressão (2.10), são considerados irrisórios e portanto, são aproximados para zero, já que sua interferência é mínima no tempo de chaveamento total. Os mesmos podem ser ocasionados por propagação de erros e poderiam fazer com que uma alternativa a grupo ótimo de vetores fosse descartada desnecessariamente.

Tabela 3 – Varredura de combinações de distâncias para o exemplo da Fig. 2

Etapa	Posição	Combinação de distâncias						Soma de distâncias
1 ^a	1 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	4.3494
	2 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	4.4056
	3 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	6.1718
	4 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	7.4302
2 ^a	5 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	4.4637
	6 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	6.2349
	7 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	7.4883
3 ^a	8 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	6.2911
	9 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	7.5446
4 ^a	10 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	9.5138
5 ^a	11 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	5.6586
	12 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	7.4297
	13 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	8.6832
6 ^a	14 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	7.4860
	15 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	8.7395
7 ^a	16 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	10.5106
8 ^a	17 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	7.5441
	18 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	8.7976
9 ^a	19 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	10.5687
10 ^a	20 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	10.6250

Tabela 4 – Varredura para o exemplo da Fig. 2 com aplicação de estratégia para redução do número de combinações avaliadas

Posição Tab. 3	Combinação de distâncias						Soma
1 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	4.3494
2 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	4.4056
3 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	6.1718
5 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	4.4637
8 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	6.2911
10 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	9.5138
11 ^a	0.6339	1.8287	1.8868	1.9431	3.7142	4.9677	5.6586

3 Conversor de Oito Braços a Quatro Fios

O uso intensivo de cargas monofásicas não lineares, presentes por exemplo em televisores, computadores e lâmpadas de descarga, faz com que componentes harmônicas em sistemas de distribuição trifásicos com quatro fios circulem no condutor neutro e sobrecarreguem tanto este quanto o transformador de distribuição [19]. A fim de mitigar o efeito de tais cargas, conversores do tipo trifásico com quatro fios, que operem como filtros ativos de potência, podem ser utilizados [20, 21]. As fontes ininterruptas de energia, por sua vez, também se utilizam de conversores de quatro fios a fim de que o efeito de harmônicos em seus sistemas seja reduzido. Aplicações da técnica SVPWM neste sistema podem ser encontradas em [20, 22].

Neste capítulo, é apresentada uma topologia de Conversor CC-CA de Quatro Fios, mostrada na Fig. 6. O conversor apresenta dois lados, *A* e *B*, cada um composto por quatro braços e um barramento capacitivo (*link* CC). Cada braço do lado *A* está conectado a um braço do lado *B*. Três das conexões são compostas por um indutor de indutância L_g . Os links CC dos lados *A* e *B* apresentam as tensões v_{Ca} e v_{Cb} , respectivamente.

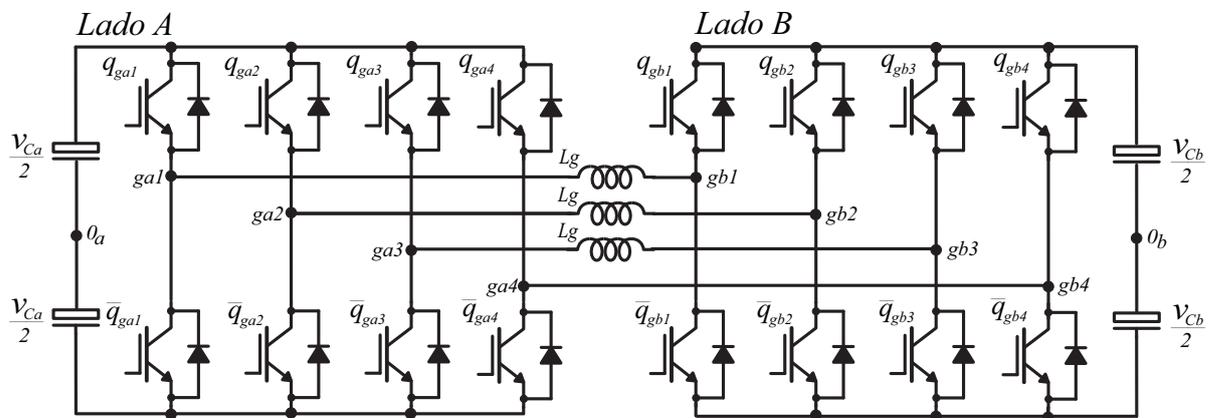


Figura 6 – Circuito de topologia de Conversor CC-CA Tipo Trifásico a Quatro Fios

As tensões de pólo do sistema são medidas entre os pontos médios dos braços ($ga1$, $ga2$, $ga3$, $ga4$, $gb1$, $gb2$, $gb3$ e $gb4$) e os pontos médios dos barramentos capacitivos (0_a e 0_b). Nos lados *A* e *B*, tais tensões serão denominadas neste trabalho por $v_{ga_j0_a}$ e $v_{gb_j0_b}$, respectivamente, com $j = \{1, 2, 3\}$. O subscrito j será utilizado com o mesmo significado neste trabalho, a menos que o contrário seja evidenciado. As tensões entre os pontos médios dos braços *A* e *B* conectados por indutores são denominadas de tensões resultantes. As correntes em tais conexões são dadas por i_{g_j} . O ramo sem indutor é percorrido pela corrente i_{g_4} . A tensão entre os pontos 0_a e 0_b , representada por $v_{0_a0_b}$, é chamada de tensão de neutro.

O circuito equivalente do Conversor a Quatro Fios é mostrado na Fig. 7 com as notações estabelecidas. A partir de tal circuito, é possível determinar as expressões (3.1) a (3.4).

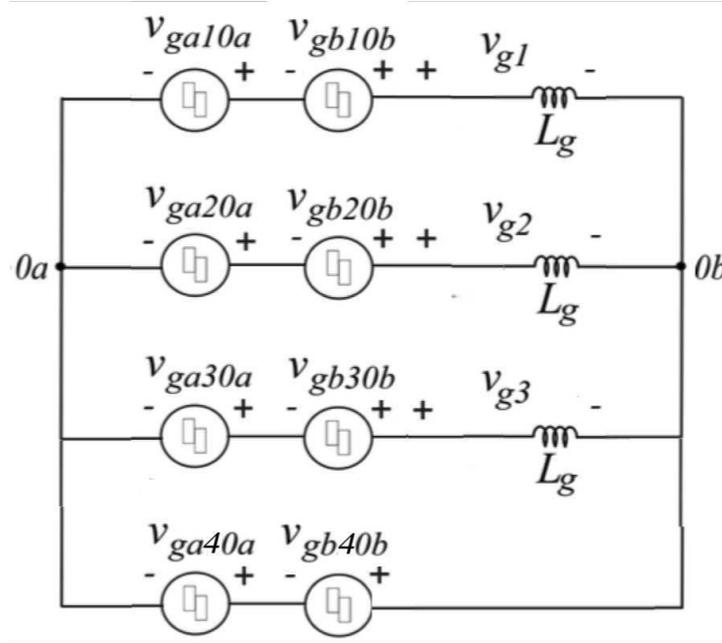


Figura 7 – Circuito equivalente de topologia de Conversor CC-CA Tipo Trifásico a Quatro Fios

$$v_{0a0b} = v_{ga40a} + v_{gb40b} \quad (3.1)$$

$$v_{gj} = v_{ga j 0a} + v_{gb j 0b} - v_{0a0b} \quad (3.2)$$

$$v_{gj} = -L_g \frac{di_{gj}}{dt} \quad (3.3)$$

A expressão (3.4) (equação dinâmica) pode ser extraída de (3.3).

$$\frac{di_{gj}}{dt} = -\frac{v_{gj}}{L_g} \quad (3.4)$$

Assume-se que o sistema seja balanceado, de maneira que $v_{g1} + v_{g2} + v_{g3} = 0$. Os termos v_{ga40a} , v_{gb40b} e $v_{ga j 0a}$ e $v_{gb j 0b}$, nas expressões (3.1) e (3.2) referem-se, respectivamente, às expressões (3.5) a (3.8). Nestas, a variável $q = \{0, 1\}$ se refere aos estados das chaves (se $q = 0$, a chave se apresenta em estado de condução e se $q = 1$, a chave se apresenta em estado de bloqueio).

$$v_{ga40a} = (2q_{ga4} - 1) \frac{v_{Ca}}{2} \quad (3.5)$$

$$v_{gb40b} = (2q_{gb4} - 1) \frac{v_{Cb}}{2} \quad (3.6)$$

$$v_{gaj0a} = (2q_{gaj} - 1) \frac{v_{Ca}}{2} \quad (3.7)$$

$$v_{gbj0b} = (2q_{gbj} - 1) \frac{v_{Cb}}{2} \quad (3.8)$$

Assim, é possível calcular as tensões de pólo a partir das expressões (3.5) a (3.8) e aplicá-las em (3.1) e (3.2) a fim de se obter as tensões resultantes do sistema.

Na Fig. 7, o estados das chaves $\overline{q_g}$ são contrários aos das chaves q_g (se uma está em condução, a outra estará em bloqueio e vice-versa), ou seja:

$$\overline{q_g} = 1 - q_g \quad (3.9)$$

Como há dois estados por cada um dos oito braços do conversor (expressões (3.5) a (3.8)), o sistema apresenta $2^8 = 256$ estados possíveis. Considerando-se $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$, tais estados geram 65 grupos de tensões resultantes diferentes entre si, devido à ambiguidades entre os estados. As Tabs. 5 e 6 apresentam os grupos de tensões resultantes e um exemplo de estados das chaves que os geram. Os valores das tensões são dados em pu.

Pode-se considerar que as tensões de referência escalares v_{g1} , v_{g2} e v_{g3} (observa-se que o espaço vetorial de representação do sistema é tridimensional) para cada estado possível das chaves correspondem aos valores assumidos em cada uma das dimensões de um vetor espacial V_j . Tal relação é expressa em (3.10). Nesta, \hat{i} , \hat{j} e \hat{k} são vetores unitários que indicam a direção positiva dos eixos x , y e z , respectivamente. A constelação dos vetores espaciais resultante está representada na Fig. 8.

$$V_j = v_{g1}\hat{i} + v_{g2}\hat{j} + v_{g3}\hat{k} \quad (3.10)$$

O SVPWM deve ser aplicado ao conversor a fim de se obter o melhor grupo de vetores espaciais que represente um vetor de referência desejado, na forma $V_k^* = \hat{E}_1\hat{i} + \hat{E}_2\hat{j} + \hat{E}_3\hat{k}$. Tal grupo é composto pelos quatro vetores espaciais mais próximos ao vetor de referência que estabeleçam os vértices de um tetraedro no qual tal vetor de referência esteja incluso. A partir da Ferramenta de Automatização de Técnica Vetorial, é possível determinar o grupo ótimo de vetores espaciais que atenda aos requisitos citados. Por fim, depois de o conjunto ser estabelecido, deve-se decidir qual estado das chaves é o melhor a fim de que se gere o grupo de vetores escolhido .

Tabela 5 – Vetores espaciais não repetidos para conversor a quatro fios com $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ - Parte A.

Tensões de Referência			Exemplo de Estados das Chaves							
v_{g1}	v_{g2}	v_{g3}	q_{va0}	q_{vb0}	q_{va1}	q_{vb1}	q_{va2}	q_{vb2}	q_{va3}	q_{vb3}
-4	-4	-4	1	1	0	0	0	0	0	0
-4	-4	-2	1	1	0	0	0	0	0	1
-4	-4	0	1	1	0	0	0	0	1	1
-4	-2	-4	1	1	0	0	0	1	0	0
-4	-2	-2	1	1	0	0	0	1	0	1
-4	-2	0	1	1	0	0	0	1	1	1
-4	0	-4	1	1	0	0	1	1	0	0
-4	0	-2	1	1	0	0	1	1	0	1
-4	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
-2	-4	-4	1	1	0	1	0	0	0	0
-2	-4	-2	1	1	0	1	0	0	0	1
-2	-4	0	1	1	0	1	0	0	1	1
-2	-2	-4	1	1	0	1	0	1	0	0
-2	-2	-2	0	1	0	0	0	0	0	0
-2	-2	0	0	1	0	0	0	0	0	1
-2	-2	2	0	1	0	0	0	0	1	1
-2	0	-4	1	1	0	1	1	1	0	0
-2	0	-2	0	1	0	0	0	1	0	0
-2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
-2	0	2	0	1	0	0	0	1	1	1
-2	2	-2	0	1	0	0	1	1	0	0
-2	2	0	0	1	0	0	1	1	0	1
-2	2	2	0	1	0	0	1	1	1	1
0	-4	-4	1	1	1	1	0	0	0	0
0	-4	-2	1	1	1	1	0	0	0	1
0	-4	0	1	1	1	1	0	0	1	1
0	-2	-4	1	1	1	1	0	1	0	0
0	-2	-2	0	1	0	1	0	0	0	0
0	-2	0	0	1	0	1	0	0	0	1
0	-2	2	0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	-4	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	-2	0	1	0	1	0	1	0	0

Tabela 6 – Vetores espaciais não repetidos para conversor a quatro fios com $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ - Parte B

Tensões de Referência			Exemplo de Estados das Chaves							
v_{g1}	v_{g2}	v_{g3}	q_{va0}	q_{vb0}	q_{va1}	q_{vb1}	q_{va2}	q_{vb2}	q_{va3}	q_{vb3}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	1
0	2	-2	0	1	0	1	1	1	0	0
0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	2	2	0	0	0	0	0	1	0	1
0	2	4	0	0	0	0	0	1	1	1
0	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	4	2	0	0	0	0	1	1	0	1
0	4	4	0	0	0	0	1	1	1	1
2	-2	-2	0	1	1	1	0	0	0	0
2	-2	0	0	1	1	1	0	0	0	1
2	-2	2	0	1	1	1	0	0	1	1
2	0	-2	0	1	1	1	0	1	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	2	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	4	0	0	0	1	0	0	1	1
2	2	-2	0	1	1	1	1	1	0	0
2	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0
2	2	2	0	0	0	1	0	1	0	1
2	2	4	0	0	0	1	0	1	1	1
2	4	0	0	0	0	1	1	1	0	0
2	4	2	0	0	0	1	1	1	0	1
2	4	4	0	0	0	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
4	0	2	0	0	1	1	0	0	0	1
4	0	4	0	0	1	1	0	0	1	1
4	2	0	0	0	1	1	0	1	0	0
4	2	2	0	0	1	1	0	1	0	1
4	2	4	0	0	1	1	0	1	1	1
4	4	0	0	0	1	1	1	1	0	0
4	4	2	0	0	1	1	1	1	0	1
4	4	4	0	0	1	1	1	1	1	1

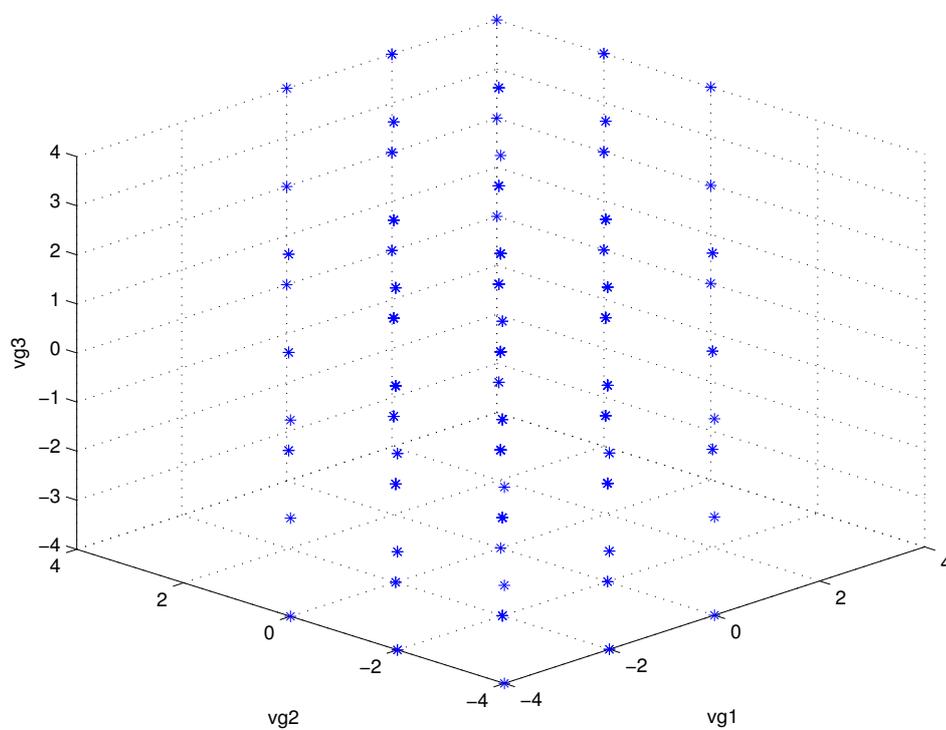


Figura 8 – Vetores espaciais para Conversor a Quatro Fios com $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$

4 Conversor de Nove Braços

O Conversor Trifásico de Nove Braços apresentado neste trabalho é uma topologia multinível composta por três conversores monofásicos CA-CC-CA de três braços conectados em cascata (Fig. 9). O mesmo pode ser utilizado em sistemas em que rede e carga são do tipo trifásico [23] e nos mais variados tipos de equipamentos, como reguladores de tensão de linha e filtros ativos de potência universais. Tal conversor também pode ser utilizado no acionamento de máquinas hexafásicas [24, 25].

O sistema da Fig. 9 apresenta seis chaves a mais que a topologia convencional (Fig. 10). Os custos com as chaves adicionais são justificados pelos benefícios adquiridos pela nova configuração [24], como a redução da tensão e da energia processadas pelas chaves inversoras, a diminuição da distorção harmônica total (THD) para frequências iguais de chaveamento nas topologias e decrescimento da frequência de chaveamento para configurações com o mesmo THD.

As tensões de referência escalares v_{gj} , com $j = \{1, \dots, 6\}$ e as correntes i_{sj} são evidenciadas na Fig. 9. Esta também destaca os três conversores monofásicos do sistema, denominados de a , b e c . Cada um deles apresenta um barramento capacitivo com tensões v_{Ca} , v_{Cb} e v_{Cc} , respectivamente. Cada conversor tem seis chaves com estados representados pela letra q , cujo significado é o mesmo do capítulo anterior. As nove tensões de pólo do sistema podem ser medidas entre os pontos médios dos nove braços ($n_a, m_a, h_a, n_b, m_b, h_b, n_c, m_c, h_c$) e os pontos médios dos *links* CC ($0_a, 0_b$ e 0_c). Tais tensões são denotadas por v_{ka0_a} , v_{kb0_b} e v_{hc0_c} , com $k = \{m, n, h\}$. As mesmas são dadas pelas expressões (4.1) a (4.3) e são utilizadas na Fig. 11, que apresenta um circuito equivalente ao da Fig. 9.

$$v_{ka0_a} = (2q_{ka} - 1) \frac{v_{Ca}}{2}, \quad \text{com } q_{ka} = \{0, 1\} \quad (4.1)$$

$$v_{kb0_b} = (2q_{kb} - 1) \frac{v_{Cb}}{2}, \quad \text{com } q_{kb} = \{0, 1\} \quad (4.2)$$

$$v_{hc0_c} = (2q_{kc} - 1) \frac{v_{Cc}}{2}, \quad \text{com } q_{kc} = \{0, 1\} \quad (4.3)$$

As tensões obtidas pela diferença entre as tensões de pólo de um mesmo conversor, destacadas na Fig. 11, são dadas pelas expressões (4.4) e (4.5), com $x = \{a, b, c\}$

$$v_{nhx} = v_{nx0_x} - v_{hx0_x} \quad (4.4)$$

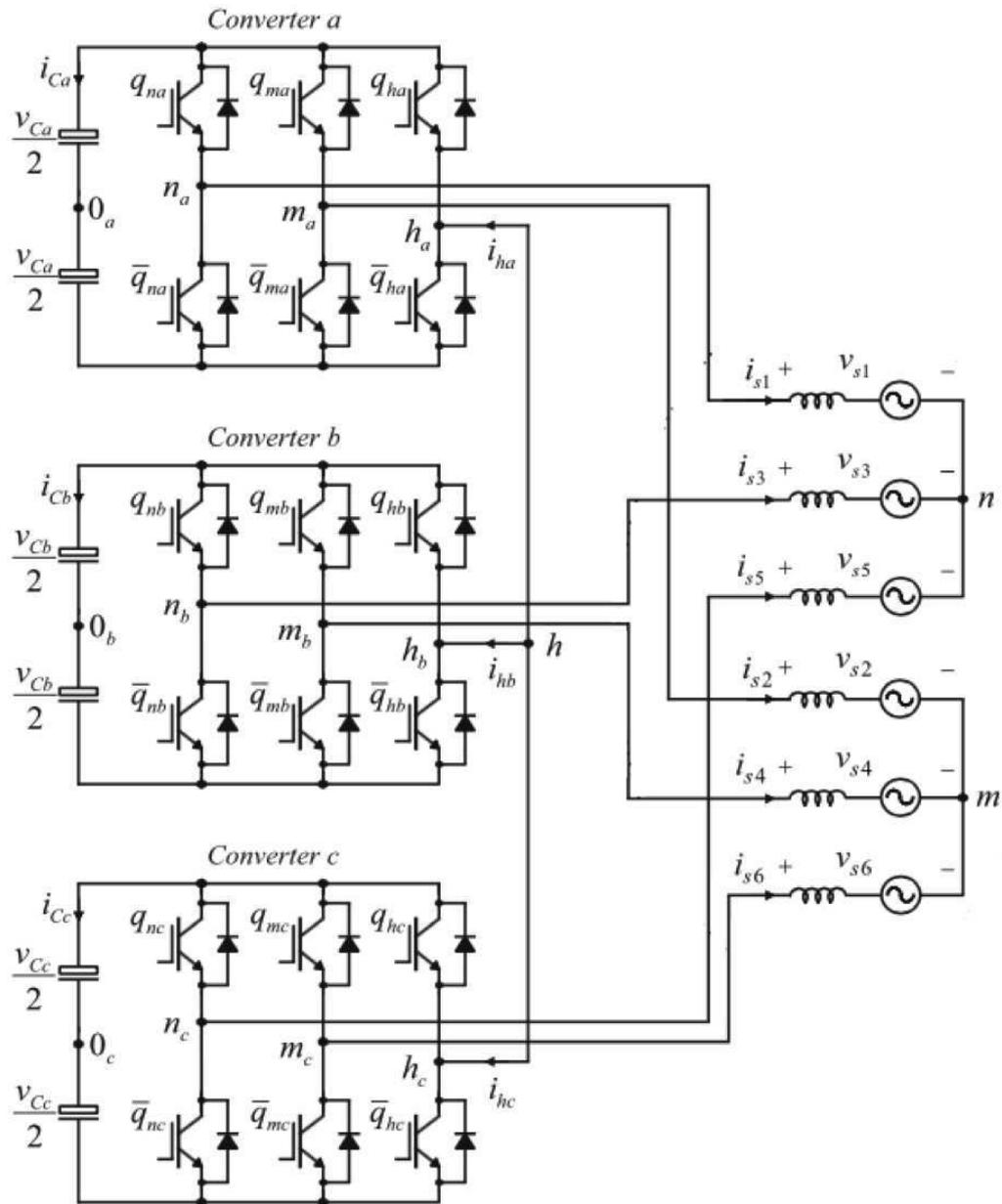


Figura 9 – Conversor Trifásico de Nove Braços

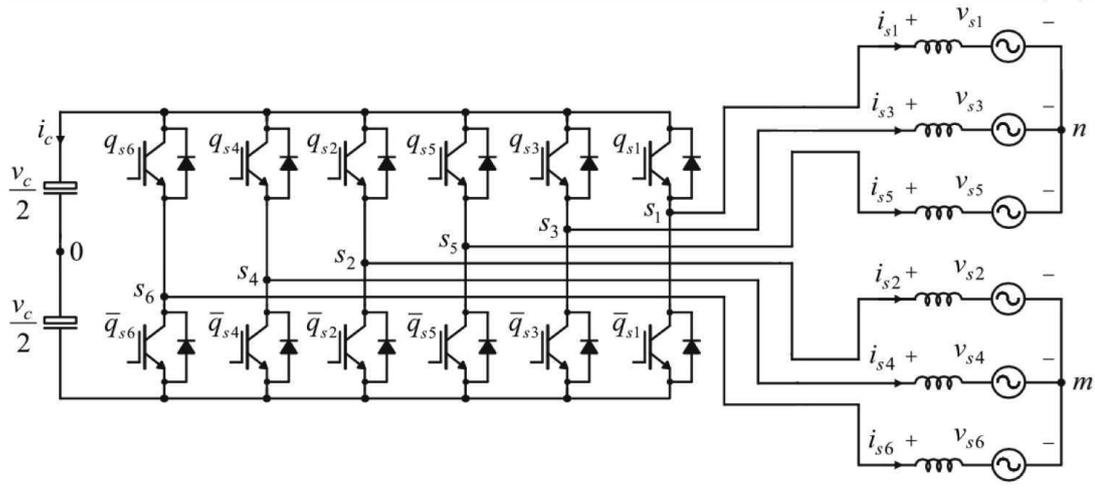


Figura 10 – Conversor Trifásico - Topologia convencional

$$v_{mhx} = v_{mx0_x} - v_{hx0_x} \quad (4.5)$$

As tensões v_{sj} podem ser obtidas a partir das expressões (4.6) a (4.11).

$$v_{s1} = v_{nha} - v_{nh} \quad (4.6)$$

$$v_{s3} = v_{nhb} - v_{nh} \quad (4.7)$$

$$v_{s5} = v_{nhc} - v_{nh} \quad (4.8)$$

$$v_{s2} = v_{mha} - v_{mh} \quad (4.9)$$

$$v_{s4} = v_{mhb} - v_{mh} \quad (4.10)$$

$$v_{s6} = v_{mhc} - v_{mh} \quad (4.11)$$

Considerando-se que $v_{s1} + v_{s3} + v_{s5} = 0$ e $v_{s2} + v_{s4} + v_{s6} = 0$, é possível obter os valores de v_{nh} e v_{mh} pelas expressões (4.12) e (4.13).

$$v_{nh} = \frac{1}{3} \sum_{x=a}^c v_{nhx} \quad (4.12)$$

$$v_{mh} = \frac{1}{3} \sum_{x=a}^c v_{mhx} \quad (4.13)$$

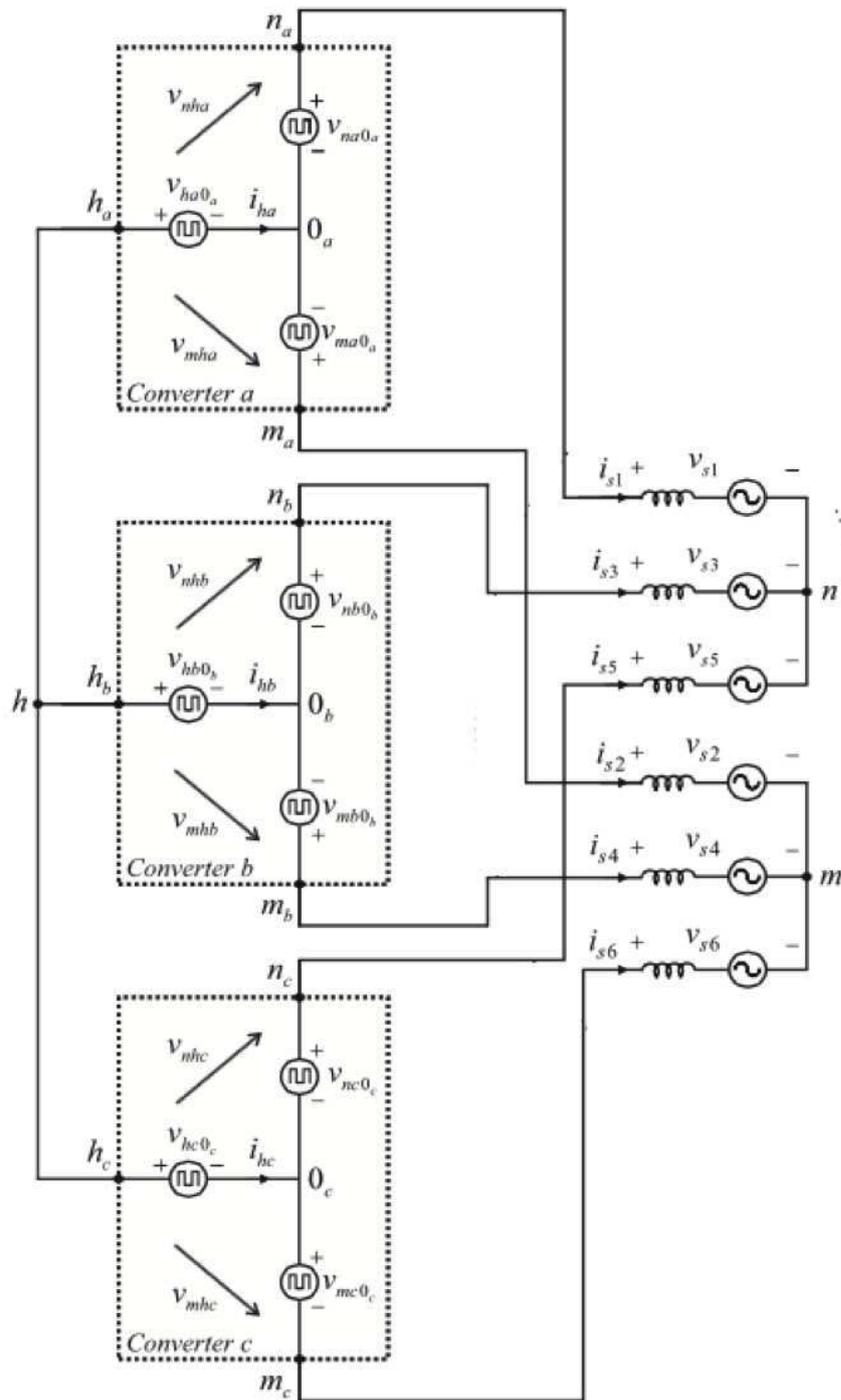


Figura 11 – Conversor Trifásico de Nove Braços

As correntes do sistema se relacionam de acordo com as seguintes expressões:

$$i_{ha} = i_{s1} + i_{s2} \quad (4.14)$$

$$i_{hb} = i_{s3} + i_{s4} \quad (4.15)$$

$$i_{hc} = i_{s5} + i_{s6} \quad (4.16)$$

As seis tensões de referência escalares levariam a um sistema de seis dimensões. Entretanto, como se assume que o sistema é composto por dois conjuntos de tensões balanceadas, simplificações obtidas a partir de transformadas dq permitem reduzi-lo para um caso de quatro dimensões. A transformada dq é um caso particular da transformada odq que permite que um sistema trifásico seja convertido em um sistema bifásico com dois eixos (direto e em quadratura) defasados de 90° entre si. A conversão entre os sistemas se dá a partir de uma matriz de transformação P invertível. Um conjunto arbitrário de variáveis x pode ser convertido pela transformada para um grupo x_{odq} conforme estabelecido nas expressões (4.17) e (4.18).

$$x = Px_{dq0} \quad (4.17)$$

$$x_{dq0} = P^{-1}x \quad (4.18)$$

Para o conversor de nove braços, assume-se que a matriz de transformação P é dada por :

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Assim, as seis tensões de referência v_{sj} podem ser convertidas para tensões v_{135_d} , v_{135_q} , v_{246_d} e v_{246_q} a partir das expressões (4.20) e (4.21).

$$\begin{bmatrix} v_{135_d} \\ v_{135_q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s3} \\ v_{s5} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} v_{246_d} \\ v_{246_q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s2} \\ v_{s4} \\ v_{s6} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

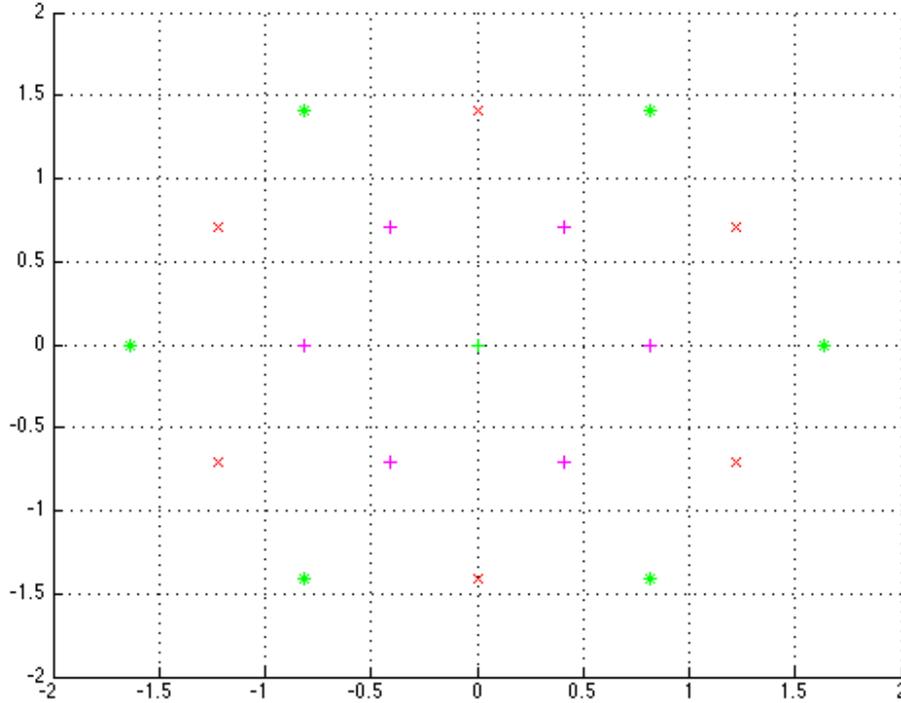


Figura 12 – Constelação v_{135_d} versus v_{135_q}

A partir das tensões de referência escalares v_{135_d} , v_{135_q} , v_{246_d} e v_{246_q} gera-se um vetor espacial V_j conforme a expressão (4.22). Nesta, \hat{i} , \hat{j} , \hat{k} e \hat{l} são vetores unitários que indicam a direção positiva de quatro eixos ortogonais entre si.

$$V_j = v_{135_d}\hat{i} + v_{135_q}\hat{j} + v_{246_d}\hat{k} + v_{246_q}\hat{l} \quad (4.22)$$

Devido aos nove braços do conversor, com dois estados cada, calcula-se $2^9 = 512$ estados possíveis para o sistema. Para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$, $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$, ambiguidades podem ser observadas em tais estados, de maneira que apenas 205 são não repetidos. Como o sistema apresenta quatro dimensões, o mesmo será expresso com seis gráficos bidimensionais, com todas as combinações possíveis entre as dimensões: v_{135_d} versus v_{135_q} , v_{135_d} versus v_{246_d} , v_{135_d} versus v_{246_q} , v_{135_q} versus v_{246_d} , v_{135_q} versus v_{246_q} e v_{246_d} versus v_{246_q} . As Figs. 12 a 17 apresentam as constelações relativas ao caso em que todos os barramentos capacitivos apresentam tensões de $1pu$. Os símbolos dos gráficos, cuja legenda é apresentada na Tab. 7, expressam o número de ambiguidades em cada posição. Observe-se que o somatório de todas as ambiguidades, em cada uma das constelações, resulta nos 512 estados possíveis.

A aplicação do SVPWM é necessária para que o grupo ótimo de vetores espaciais que possa representar um vetor de referência desejado na forma $V_j^* = v_{135_d}^*\hat{i} + v_{135_q}^*\hat{j} +$

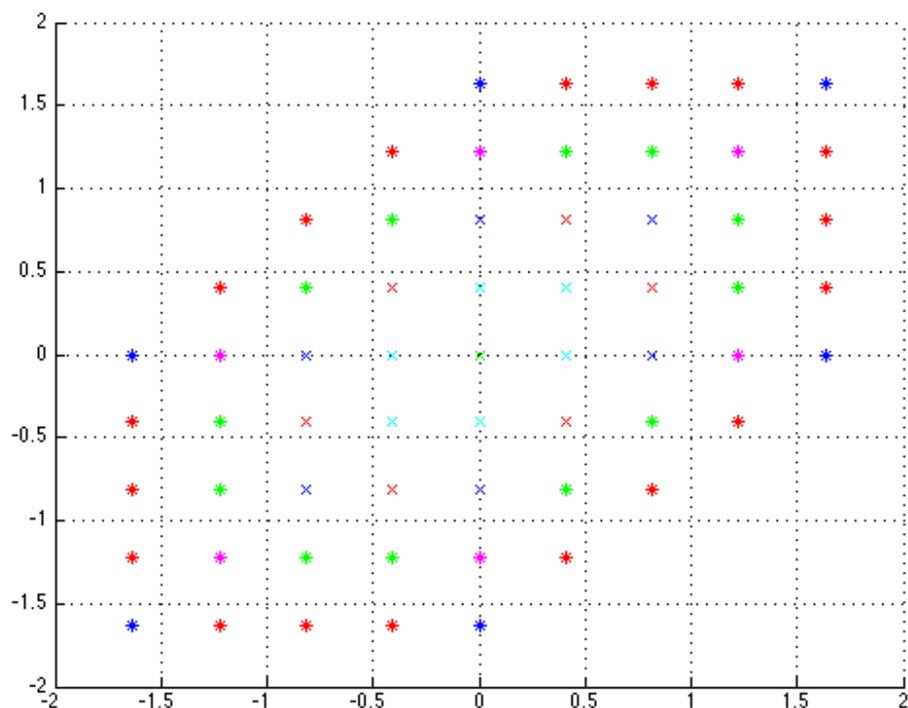


Figura 13 – Constelação v_{135_d} versus v_{246_d}

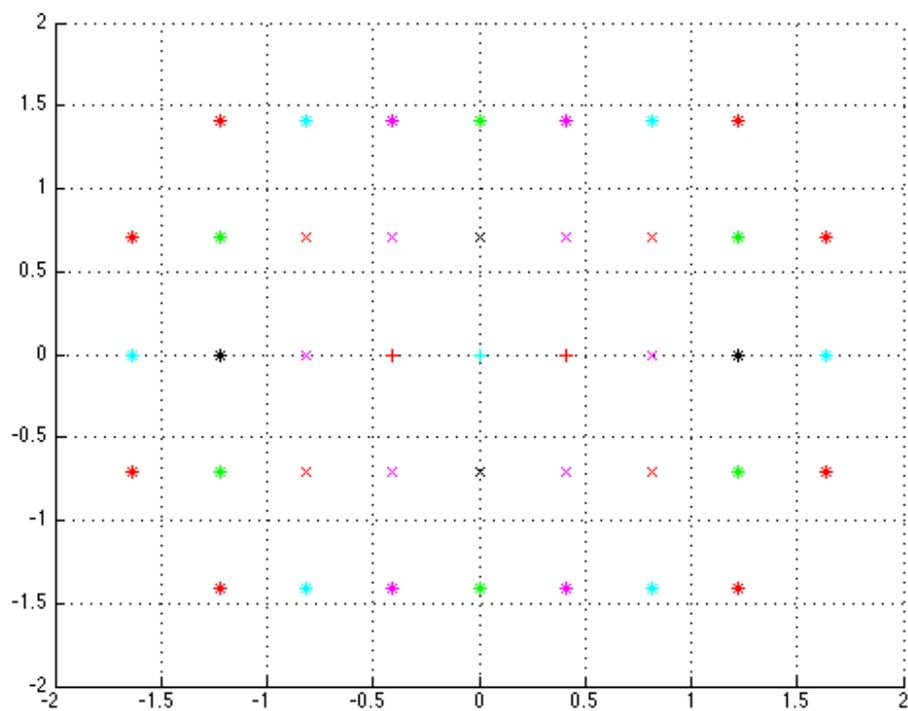


Figura 14 – Constelação v_{135_d} versus v_{246_q}

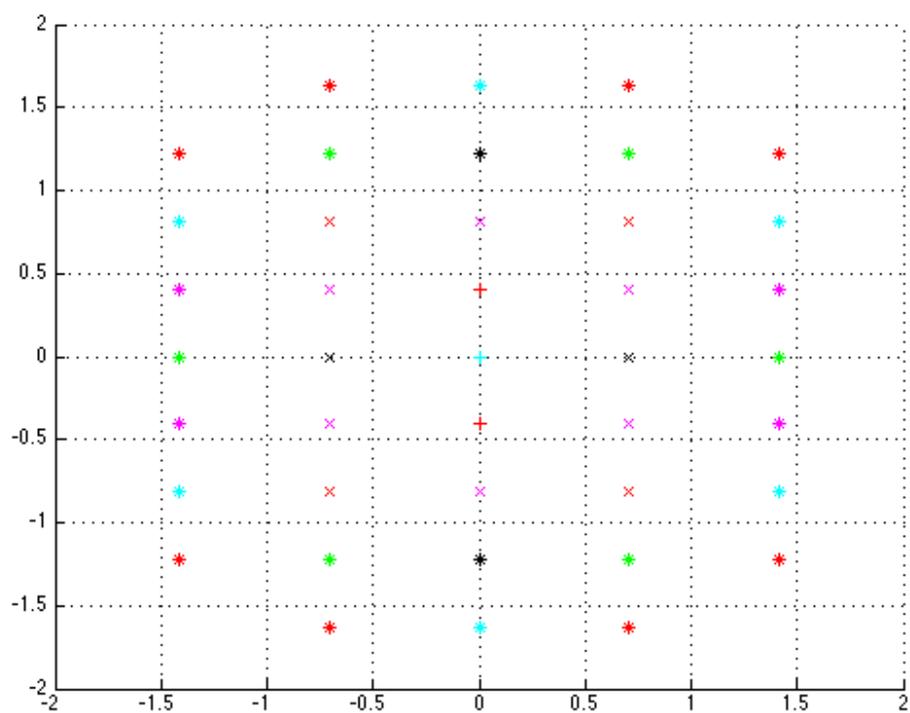


Figura 15 – Constelação v_{135_q} versus v_{246_a}

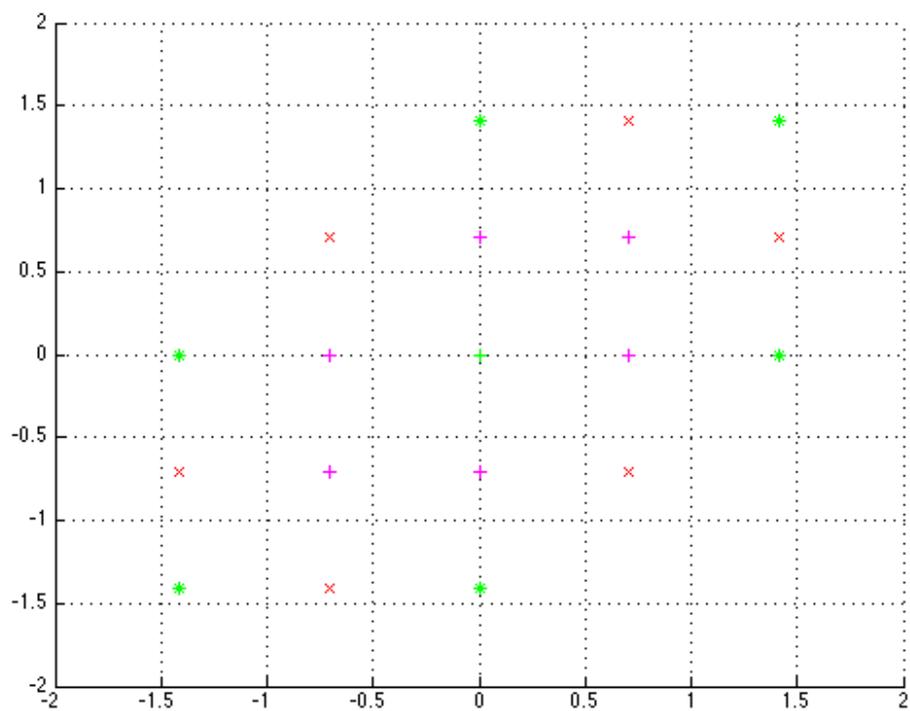


Figura 16 – Constelação v_{135_q} versus v_{246_q}

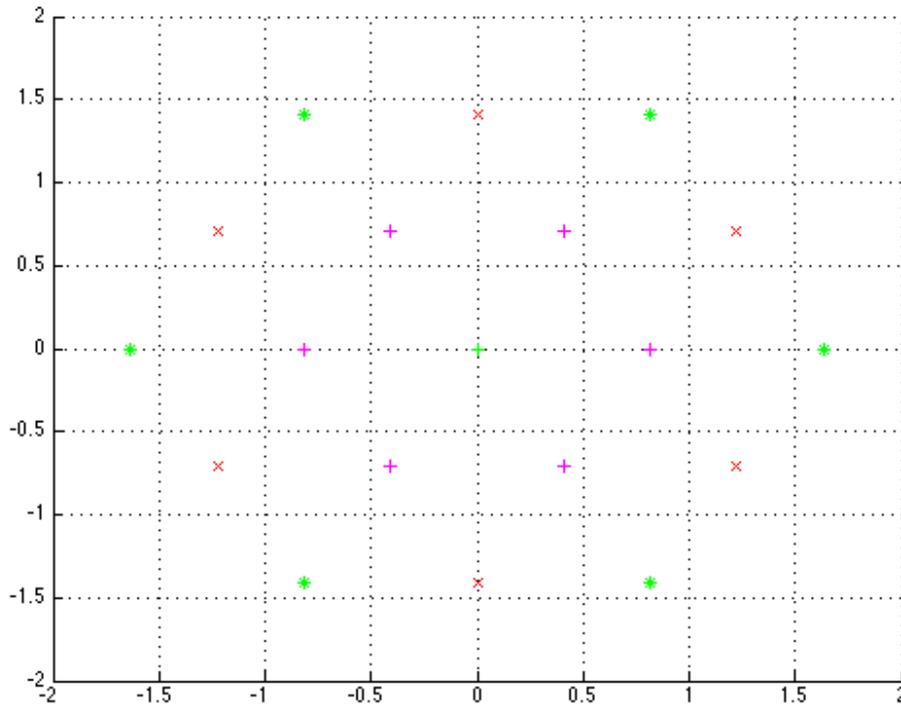


Figura 17 – Constelação v_{246_d} versus v_{246_q}

$v_{246_d}^* \hat{k} + v_{246_q}^* \hat{l}$ seja encontrado. Para tanto, faz-se necessário cinco vetores espaciais que gerem uma “estrutura” em quatro dimensões no qual V_k^* esteja “inserido”. Encontrar tal grupo manualmente é uma tarefa árdua e portanto, não utilizada. Entretanto, a Ferramenta de Automatização de Técnica Vetorial permite que o grupo desejado seja determinado sem grandes esforços.

Após os vetores espaciais serem definidos, deve-se determinar quais combinações de chaves que geram tais vetores devem ser escolhidas. Em posse das combinações, é possível calcular as tensões de pólo do sistema pelas expressões (4.1) a (4.3). Depois, com as tensões v_{nhk} e v_{mhk} definidas (expressões (4.4) e (4.5)) as tensões v_{nh} e v_{mh} podem ser determinadas (expressões (4.12) e (4.13)). Por fim, as tensões v_{sj} são encontradas pelas expressões (4.6) a (4.11).

Tabela 7 – Legenda dos Gráficos das Figs 12 a 17

Número de ambiguidades	Forma	Cor
1	*	Azul escuro
2	*	Vermelho
4	*	Ciano
6	*	Magenta
8	*	Verde
12	*	Preto
14	×	Azul escuro
16	×	Vermelho
22	×	Ciano
24	×	Magenta
26	×	Verde
28	×	Preto
32	+	Azul escuro
36	+	Vermelho
40	+	Ciano
48	+	Magenta
80	+	Verde

5 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da Ferramenta de Automação da Técnica PWM Vetorial nos sistemas descritos nos Capítulos 3 e 4. As simulações são realizadas com o *software* MATLAB sob diferentes considerações, seja no que diz respeito às tensões nos barramentos capacitivos como na defasagem entre tensões de referência.

5.1 Conversor de Oito Braços A Quatro Fios

O conversor de oito braços a quatro fios (Fig. 6) foi simulado em duas situações. Na primeira, as tensões de referência utilizadas, dadas em pu, apresentam a metade de suas amplitudes máximas (expressão (5.1)). No segundo caso, o maior valor de amplitude é aplicado (expressão 5.1). Em ambos os casos, as tensões nos barramentos capacitivos foram tais que $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$. Estas considerações foram feitas para que as tensões de pólo do sistema dadas pelas expressões (3.5) a (3.8) pudessem variar entre $+1pu$ e $-1pu$.

$$A = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{v_{Ca}}{2} + \frac{v_{Cb}}{2} \right) = 1.1547pu \quad (5.1)$$

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{v_{Ca}}{2} + \frac{v_{Cb}}{2} \right) = 2.3094pu \quad (5.2)$$

5.1.1 Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ e $A = 1.1547pu$

Os parâmetros utilizados para esta simulação foram:

- Passo de cálculo geral: $h_g = 100ns$.
- Passo de cálculo para atualização de referências: $h_r = 100ns$;
- Tempo total de simulação: $16.7ms$.
- Tensão nos barramentos capacitivos: $\frac{v_{Ck}}{2} = 1pu$, com $k = \{a, b\}$
- Amplitude das tensões de referência (metade da máxima possível): $A = 1.1547pu$.
- Frequência da rede: $f = 60Hz$; $\omega = 120\pi rad/s$.
- Tensões de referência: $\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ$; $\hat{E}_2 = A\angle 120^\circ$; $\hat{E}_3 = A\angle -120^\circ$.

Os resultados das simulações para este caso são apresentados nas Figs. 18 a 31. Na Fig. 18, o espaço tridimensional do sistema é apresentado com vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho. Nas Figs. 19 a 21, as tensões resultantes dos chaveamentos podem ser visualizadas. Como neste caso $|A| < 2pu$, apenas três níveis (dados por 2, 0 e -2) são necessários para a sintetização de seus valores. A partir das médias das tensões chaveadas a cada período de chaveamento obtém-se os gráficos em azul referentes às Figs. 22 a 24. Observa-se que as tensões de referência nestas figuras (em verde) são seguidas, apesar de pequenas discrepâncias. As Figs. 25, 27 e 29 ilustram comparações completas entre as tensões resultantes dos chaveamentos, as tensões médias dos chaveamentos e as tensões de referência. Nas Figs. 26, 28 e 30 são apresentadas janelas em foco destas comparações a fim de que o comportamento das tensões seja mostrado com mais clareza.

O programa para implementação da ferramenta gera novos valores de referência a cada instante de tempo h_r . Assim, um novo grupo de vetores espaciais deve ser selecionado para cada um destes instantes. Conforme apresentado no primeiro capítulo, a determinação do grupo de vetores se dá por meio de testes de candidatos. Na Fig 31, o número de testes realizados para cada h_r , para a simulação desta subseção, é apresentado. Observa-se que os números variam entre um e dois testes, casos em que a escolha do grupo de vetores é mais rápida.

5.1.2 Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ e $A = 2.3094pu$

Os parâmetros utilizados para esta simulação foram os mesmos que o da subseção 5.1.1, com exceção da amplitude das tensões de referência, máxima neste caso. Os resultados são apresentados nas Figs. 32 a 45 e foram organizados na mesma ordem que na subseção anterior. A comparação entre as Figs. 18 e 32 permite observar o efeito do aumento da amplitude das tensões de referência. Na Fig. 32, observa-se que os vetores espaciais delimitam um espaço cujas fronteiras são “tocadas” pelos vetores de referência. Assim, se $A > 2.3094pu$, tais fronteiras seriam extrapoladas e muitos vetores de referência não poderiam ser sintetizados. Como o valor da amplitude de tensão é $A = 2.3094pu > 2pu$, mais níveis são observados nas Figs. 33 a 35 que nas Figs. 19 a 21.

Pela Fig. 45 é possível concluir que o número de testes para a seleção de vetores espaciais é bem maior que na caso anterior, fato que tornou o tempo de simulação maior. Para alguns instantes de tempo, seis testes foram necessários. É possível também observar que o número de testes é quase sempre o mesmo a cada 0.003s e que janelas temporais com este valor são praticamente simétricas.

5.2 Conversor de Nove Braços

O conversor de nove braços (Fig. 9) foi simulado em duas situações. Na primeira, os valores das tensões de referência \hat{E}_1 , \hat{E}_3 e \hat{E}_5 são respectivamente iguais às tensões \hat{E}_2 , \hat{E}_4 e \hat{E}_6 . No segundo, há uma defasagem de 30° entre as tensões \hat{E}_1 , \hat{E}_3 e \hat{E}_5 e as tensões \hat{E}_2 , \hat{E}_4 e \hat{E}_6 , respectivamente. Em todos os casos, a amplitude é dada por $A = 1.1547pu$. Os parâmetros utilizados para as simulação foram os mesmos da subseção 5.1.1, com exceção das tensões de referência. A tensão $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$, relativa ao terceiro barramento capacitivo do circuito, também foi acrescentada.

5.2.1 Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$; $A = 1.1547pu$; $\theta = 0^\circ$

Este caso é o mesmo apresentado no terceiro capítulo. As tensões de referência são dadas pelas expressões (5.3) a (5.5). Os resultados desta simulação são apresentados nas Figs. 46 a 61.

$$\hat{E}_1 = \hat{E}_2 = A\angle 0^\circ \quad (5.3)$$

$$\hat{E}_3 = \hat{E}_4 = A\angle 120^\circ \quad (5.4)$$

$$\hat{E}_5 = \hat{E}_6 = A\angle -120^\circ \quad (5.5)$$

Como o sistema apresenta quatro dimensões, o seu espaço vetorial pode ser representado por seis gráficos bidimensionais dos tipos v_{135_d} versus v_{135_q} (Fig. 46), v_{135_d} versus v_{246_d} (Fig. 47), v_{135_d} versus v_{246_q} (Fig. 48), v_{135_q} versus v_{246_d} (Fig. 49), v_{135_q} versus v_{246_q} (Fig. 50) e v_{246_d} versus v_{246_q} (Fig. 51). Nestes, os vetores espaciais são representados em azul e o vetores de referência em vermelho. Observa-se que, para amplitudes maiores que $A = 1.1547pu$, as fronteiras delimitadas pelos vetores espaciais seriam extrapoladas, de maneira que a síntese de vários vetores de referência não seria possível.

As tensões v_{nha} , v_{nhb} e v_{nhc} (expressão (4.4)) são mostradas nas Figs. 52 a 54. Os valores obtidos pelas médias por período de chaveamento das tensões relativas às expressões (4.6) à (4.8) são apresentados em azul nas Figs. 55 à 57. Observa-se que os mesmos seguem as referências (em verde) de maneira satisfatória. Os gráficos das tensões v_{mha} , v_{mhb} e v_{mhc} (expressão 4.5) e os relativos às tensões v_{s2} , v_{s4} e v_{s6} (expressões 4.9 a 4.11) apresentam comportamentos respectivamente iguais aos apresentados nas Figs. 52 à 57 e portanto, foram omitidos.

Nas Figs. 58 a 60, são apresentadas comparações entre as tensões resultantes dos chaveamentos v_{g1} , v_{g2} e v_{g3} (em vermelho), suas respectivas tensões médias (em azul) e as tensão de referência (em verde). Nove níveis podem ser observados em v_{g1} , v_{g2} e v_{g3} . O gráfico que mostra o número de testes para a seleção do grupo de vetores espaciais para cada instante de tempo é dado na Fig. 61. Observa-se que o número máximo de testes é sete, mas também que em boa parte dos instantes de tempo o grupo de vetores espaciais era encontrado já na primeira tentativa.

5.2.2 Simulação para $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$; $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$; $A = 1.1547pu$; $\theta = 30^\circ$

Neste caso, as tensões de referência são dadas pelas expressões (5.6) a (5.11).

$$\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ \quad (5.6)$$

$$\hat{E}_2 = A\angle 30^\circ \quad (5.7)$$

$$\hat{E}_3 = A\angle 120^\circ \quad (5.8)$$

$$\hat{E}_4 = A\angle 150^\circ \quad (5.9)$$

$$\hat{E}_5 = A\angle -120^\circ \quad (5.10)$$

$$\hat{E}_6 = A\angle -90^\circ \quad (5.11)$$

Os resultados para esta simulação são apresentados nas Figs. 62 a 83 e seguem a mesma ordem de disposição da subseção anterior. Os gráficos bidimensionais para a apresentação do sistema em quatro dimensões estão dispostos nas Figs. 62 à 67. O efeito da defasagem entre os gráficos pode ser visualizado na comparação entre as Figs. 47 a 50 e 63 a 66, respectivamente.

As tensões v_{nha} , v_{nhb} , v_{nhc} , v_{mha} , v_{mhb} e v_{mhc} (expressões (4.4) e (4.5)) são apresentadas nas Figs. 68 à 73. Nas Figs. 74 a 76, a comparação entre as médias das tensões resultantes dos chaveamentos (em azul) e suas respectivas referências (em verde) são mostradas para os casos relativos às expressões (4.9) a (4.11). Os gráficos relacionados às expressões (4.6) a (4.8) apresentam os mesmos comportamentos que os gráficos da Figs. 55 a 57, respectivamente. Portanto, foram omitidos.

As Figs. 77 a 82 apresentam as comparações entre tensões resultantes dos chaveamentos, tensões média dos mesmos e tensões de referência. Por fim, na Fig. 83 a quantidade de testes para seleção do grupo de vetores é especificado a cada h_r unidades de tempo. Observa-se que o número de tentativas varia entre um e 25.

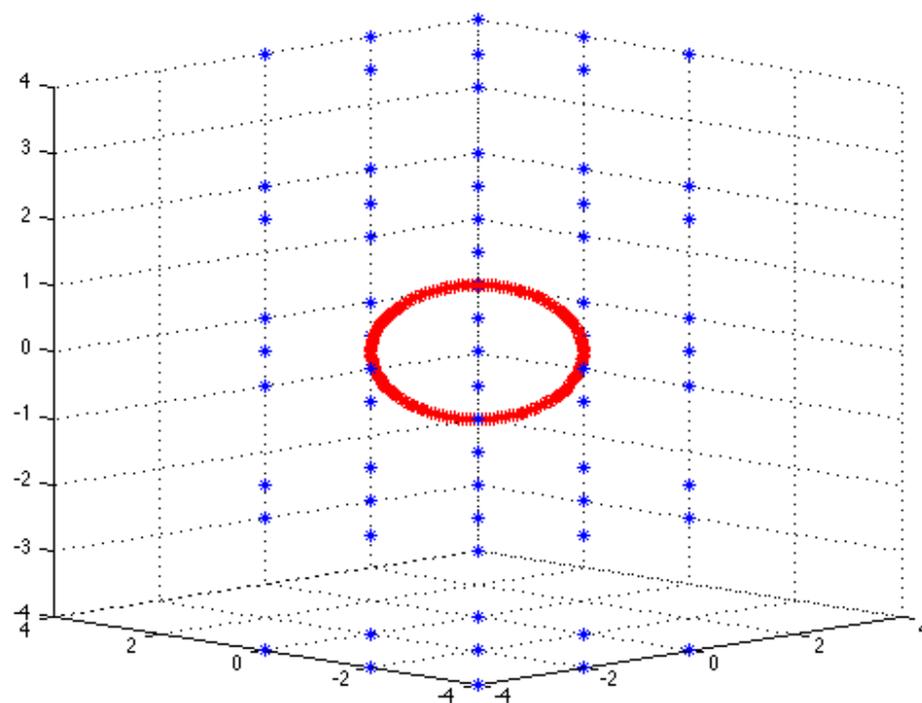


Figura 18 – Espaço vetorial com $\frac{v_{Ca}}{2} = \frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ para conversor a quatro fios. Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho.

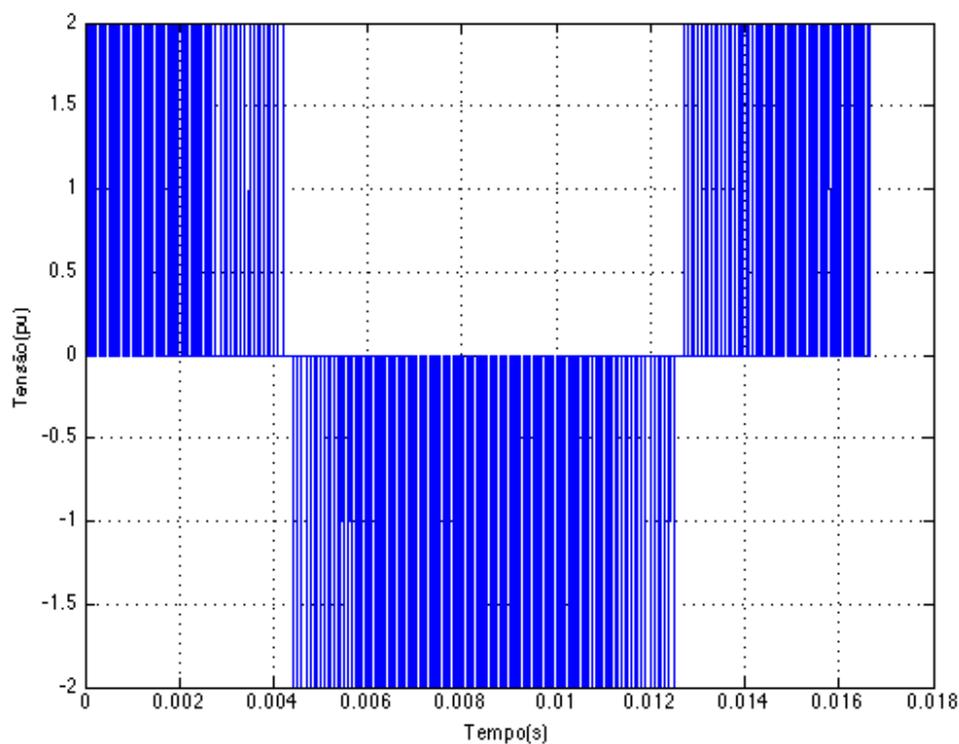


Figura 19 – Tensão v_{g1} resultante dos chaveamentos (expressão (3.2)) para conversor a quatro fios.

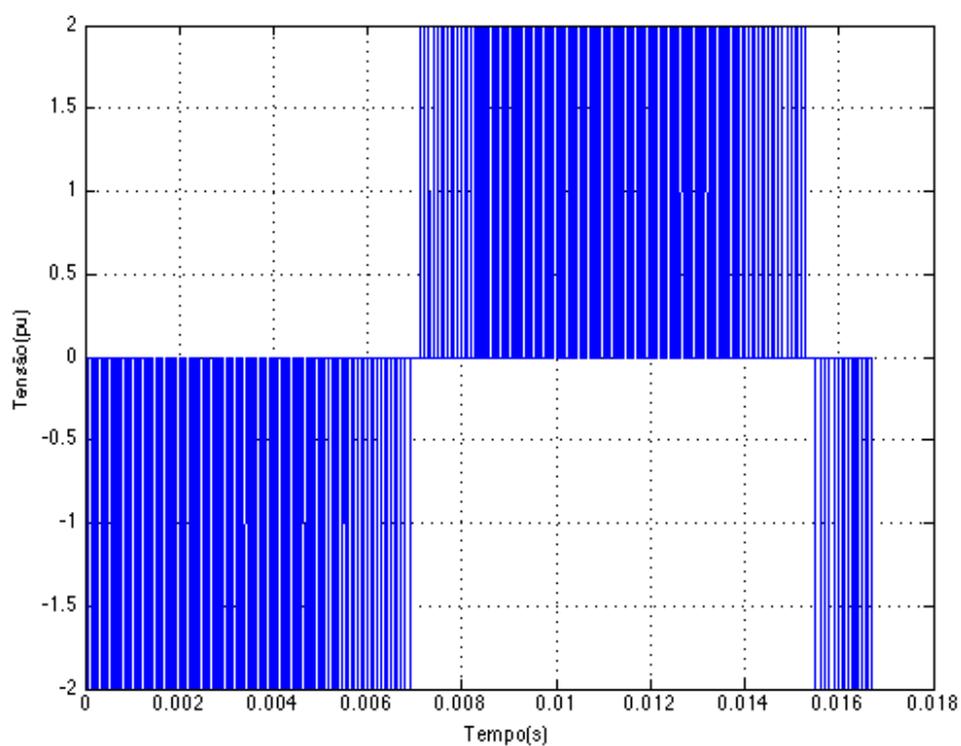


Figura 20 – Tensão v_{g2} resultante dos chaveamentos (expressão (3.2)) para conversor a quatro fios.

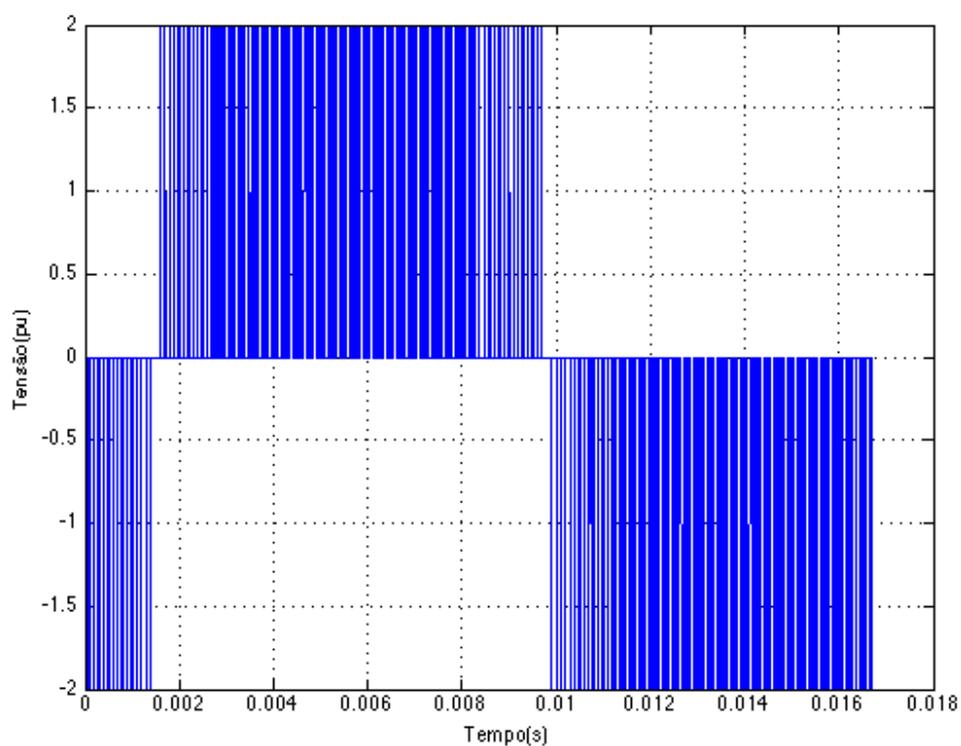


Figura 21 – Tensão v_{g3} resultante dos chaveamentos (expressão (3.2)) para conversor a quatro fios.

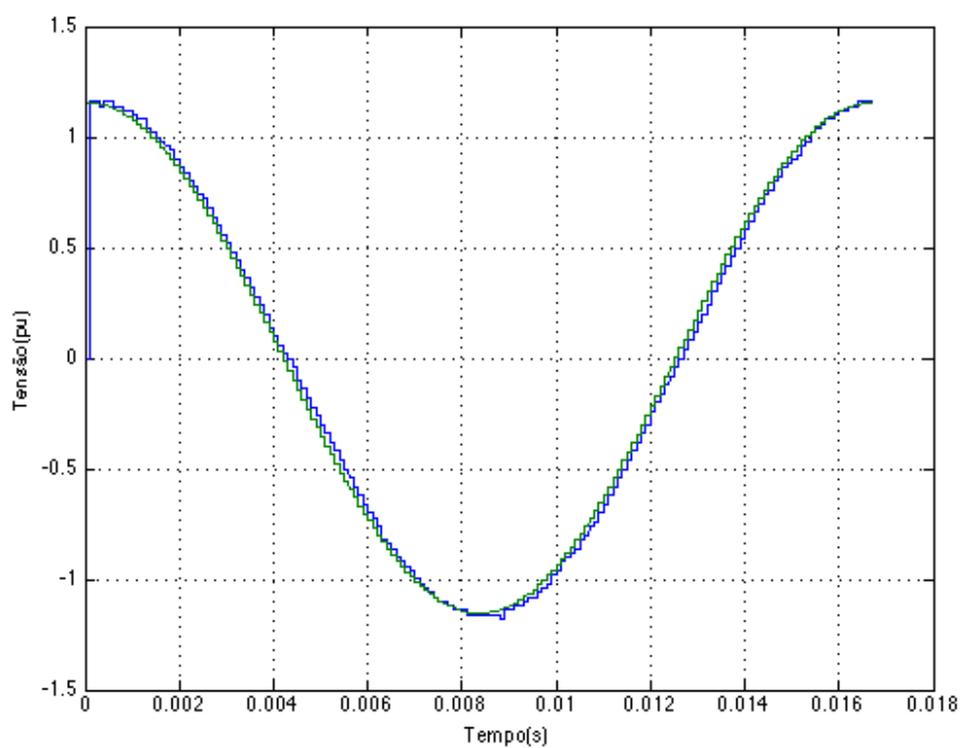


Figura 22 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.

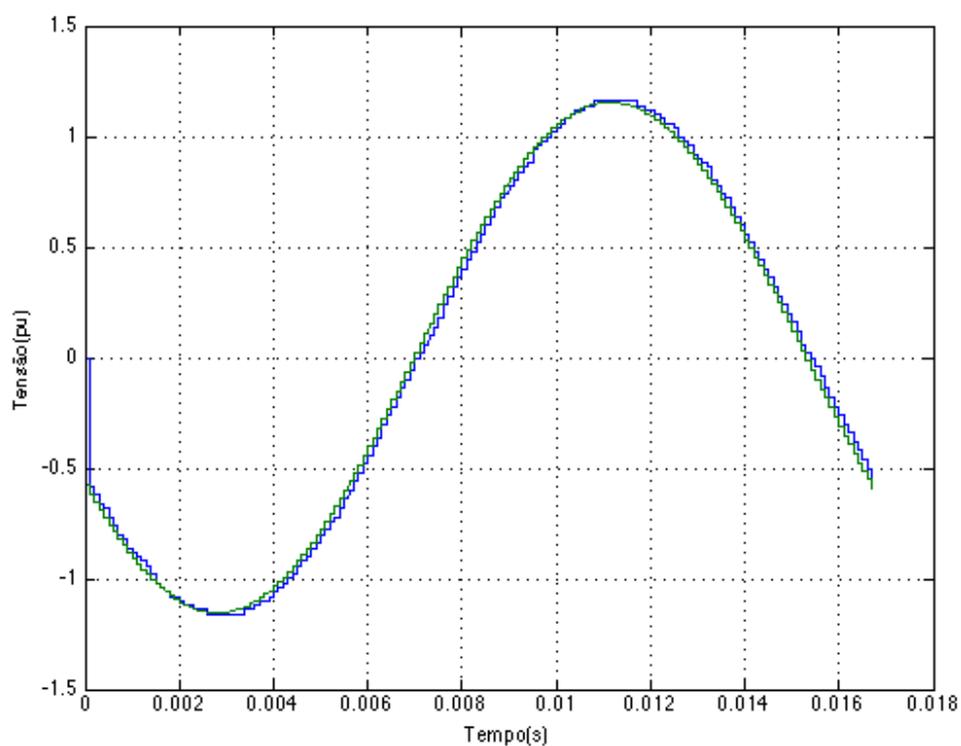


Figura 23 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_2 = A\angle 120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.

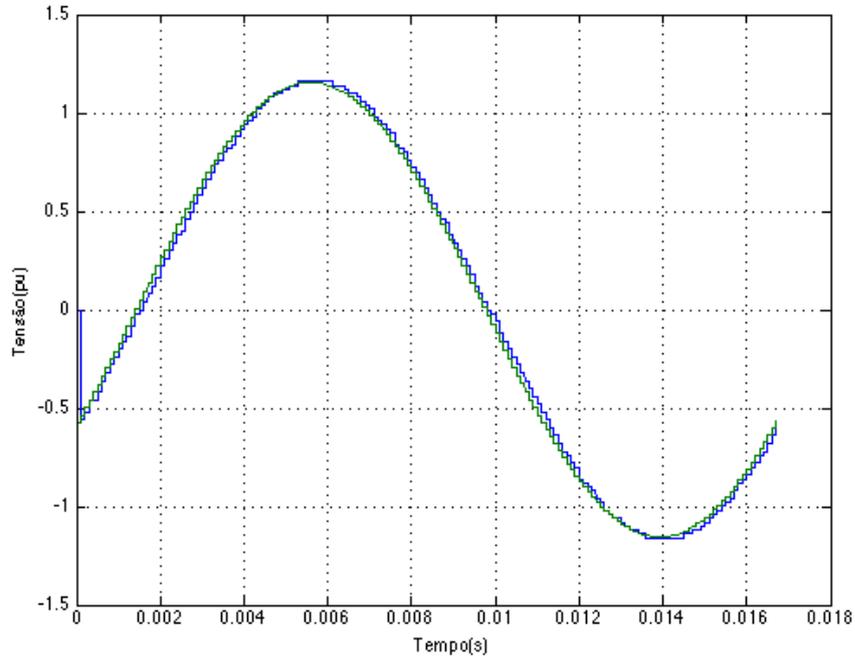


Figura 24 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_3 = A\angle -120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.

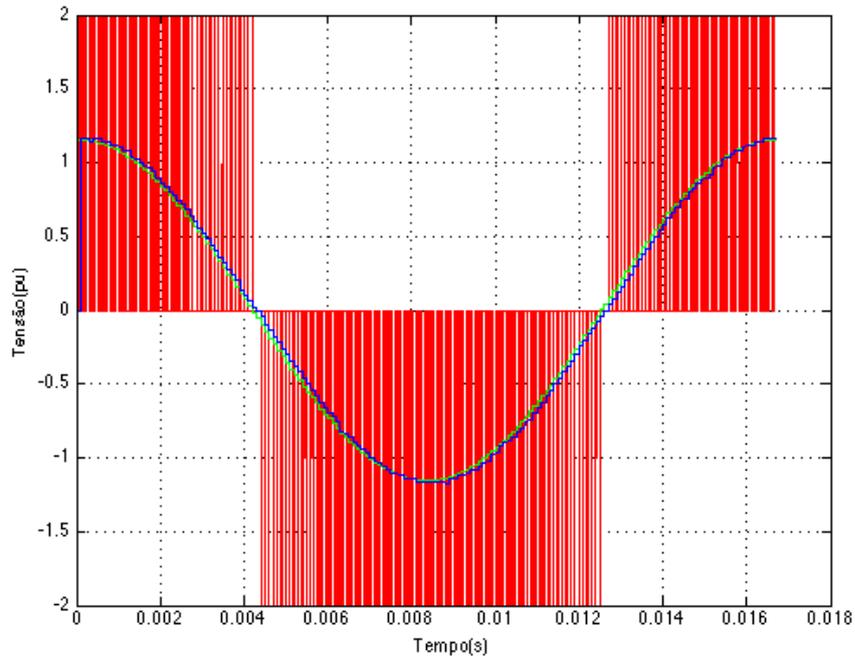


Figura 25 – Comparação entre tensão resultante v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.

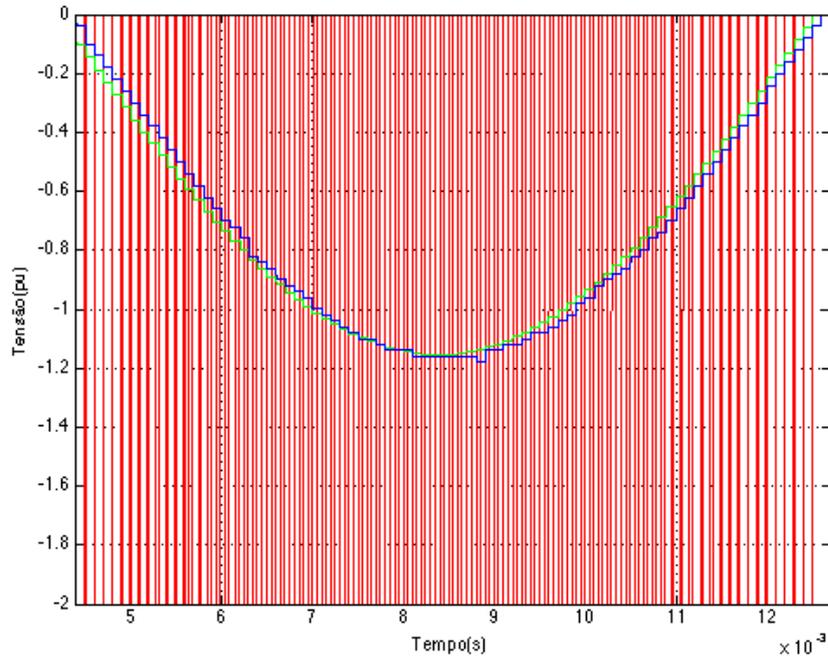


Figura 26 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.

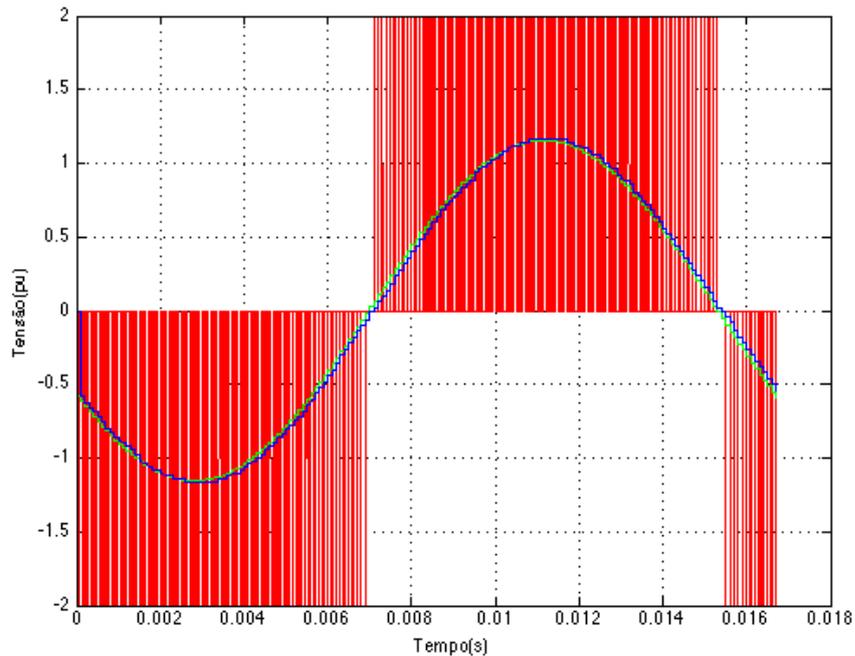


Figura 27 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.

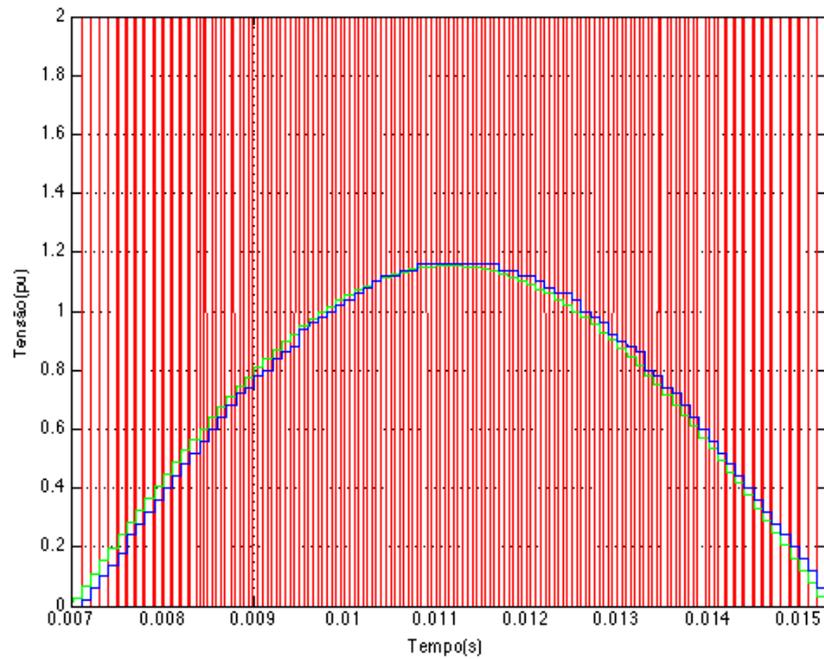


Figura 28 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.

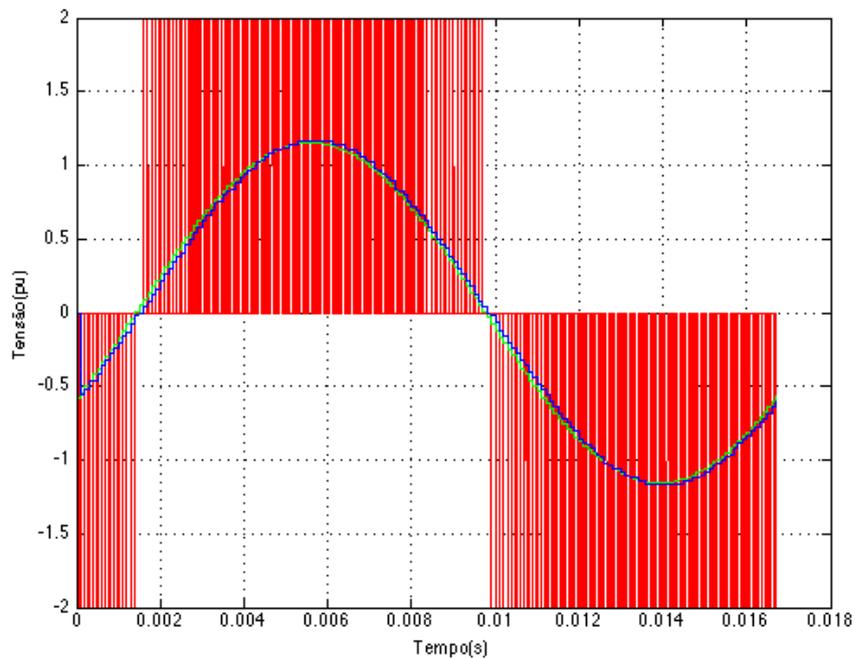


Figura 29 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.

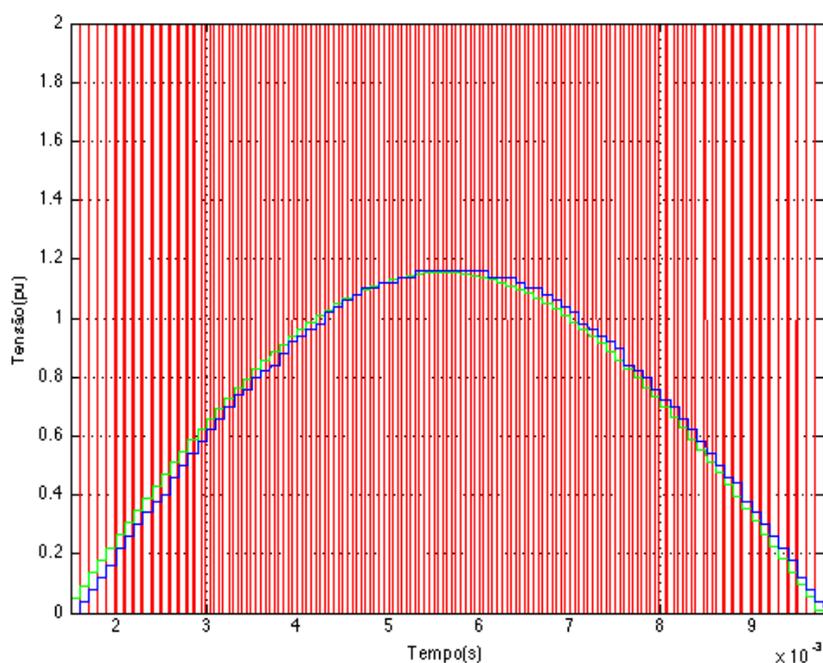


Figura 30 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.

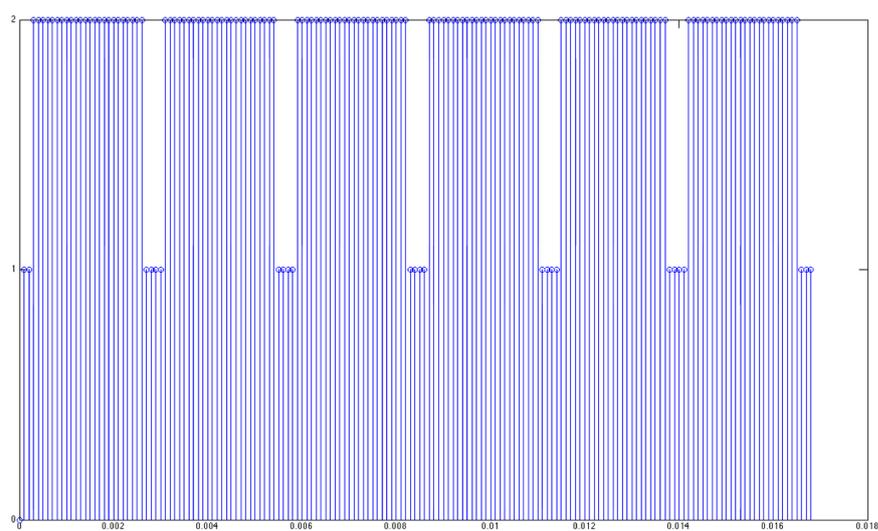


Figura 31 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor a quatro fios.

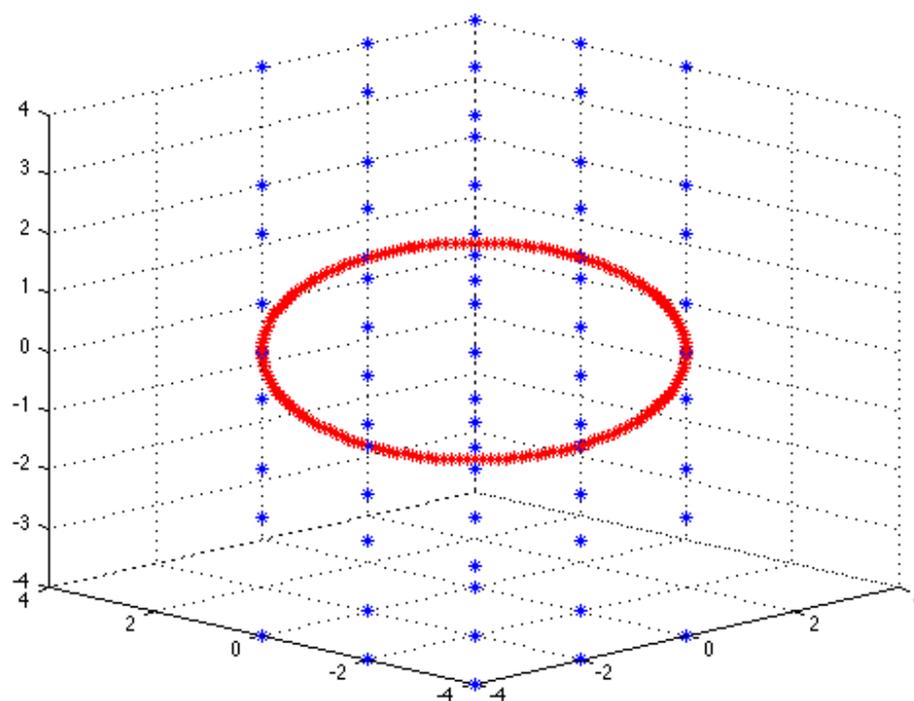


Figura 32 – Constelação de vetores espaciais (em azul) e vetores de referência (em vermelho) para conversor a quatro fios.

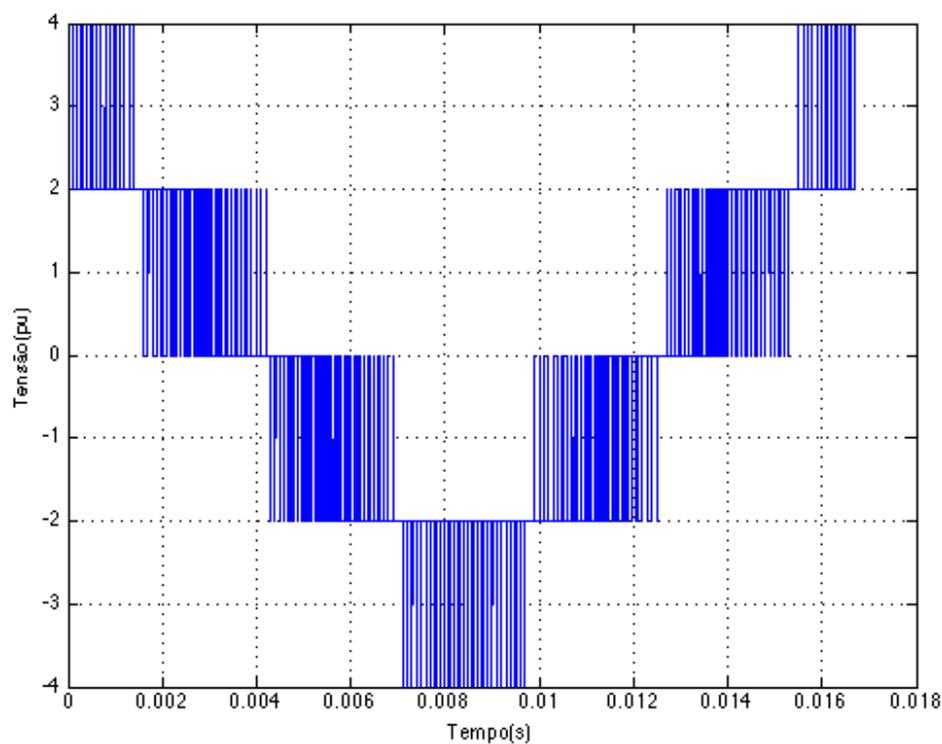


Figura 33 – Tensão v_{g1} resultante dos chaveamentos (expressão (3.3)) para conversor a quatro fios.

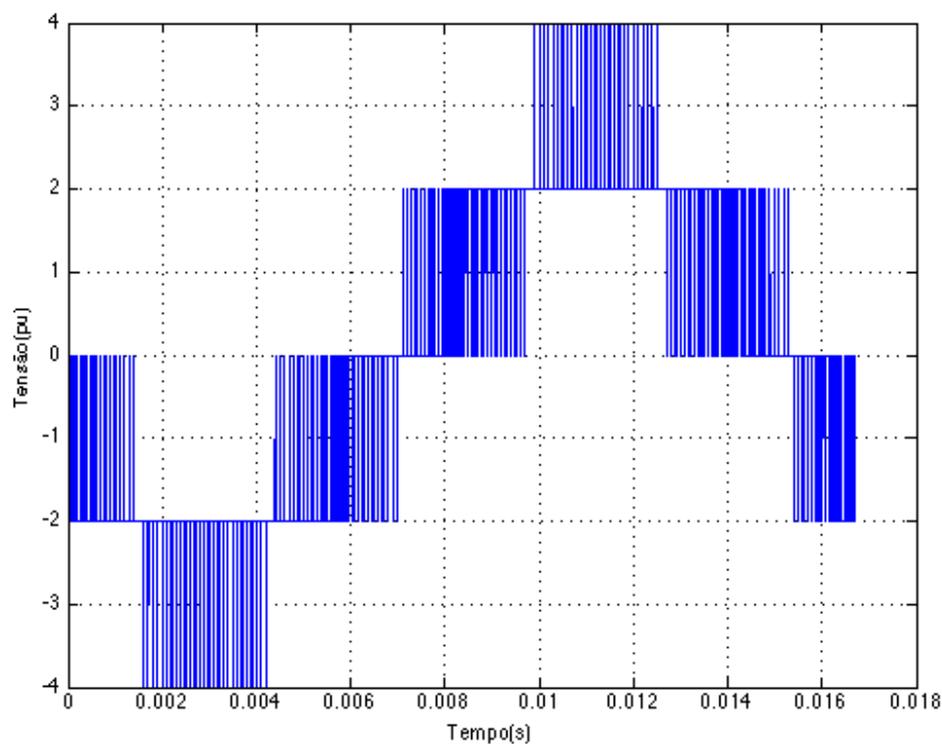


Figura 34 – Tensão v_{g2} resultante dos chaveamentos (expressão (3.3)) para conversor a quatro fios.

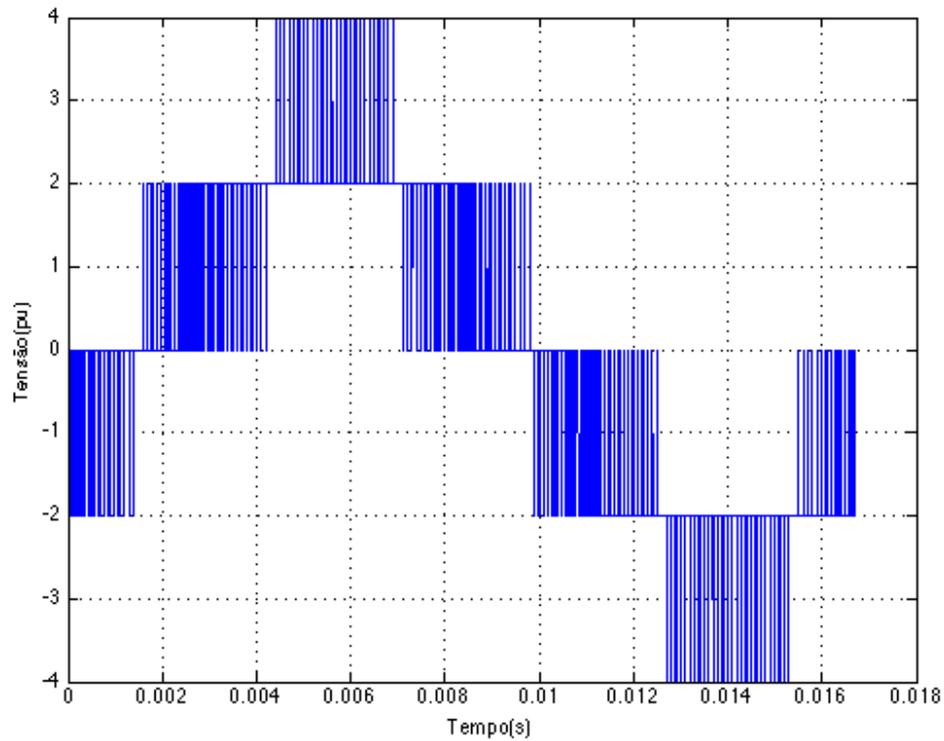


Figura 35 – Tensão v_{g3} resultante dos chaveamentos (expressão (3.3)) para conversor a quatro fios.

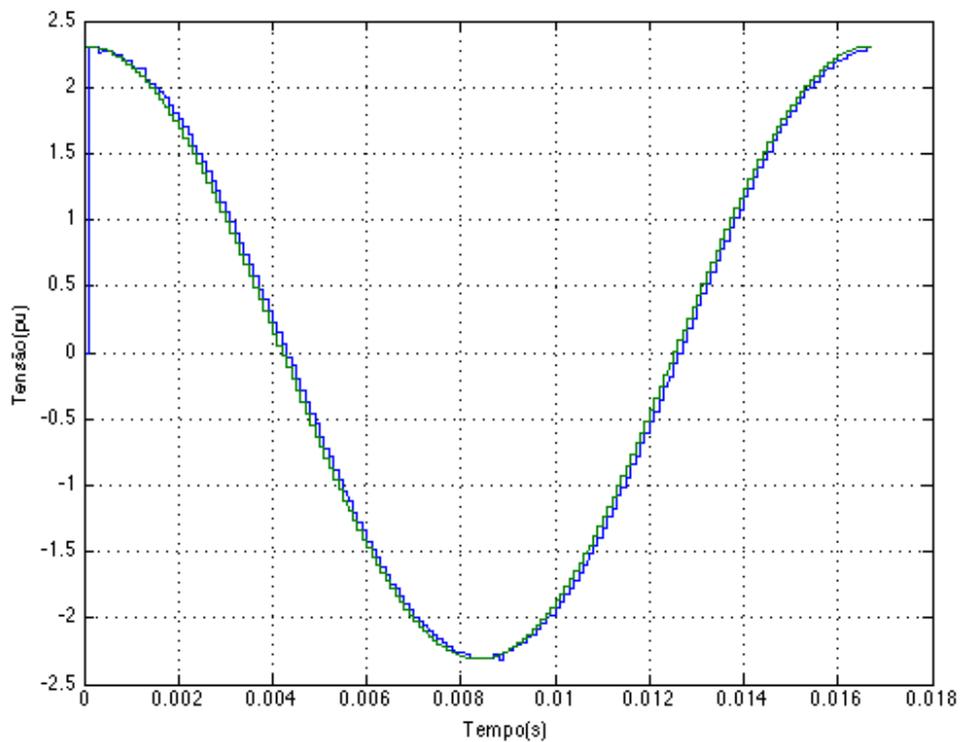


Figura 36 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.

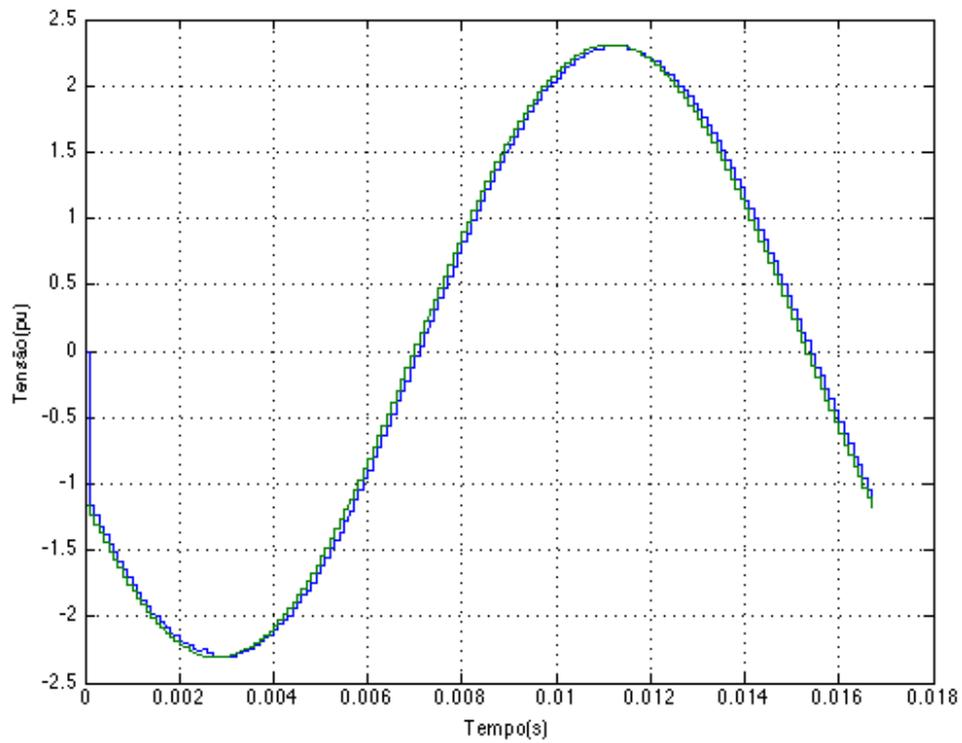


Figura 37 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_2 = A \angle 120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.

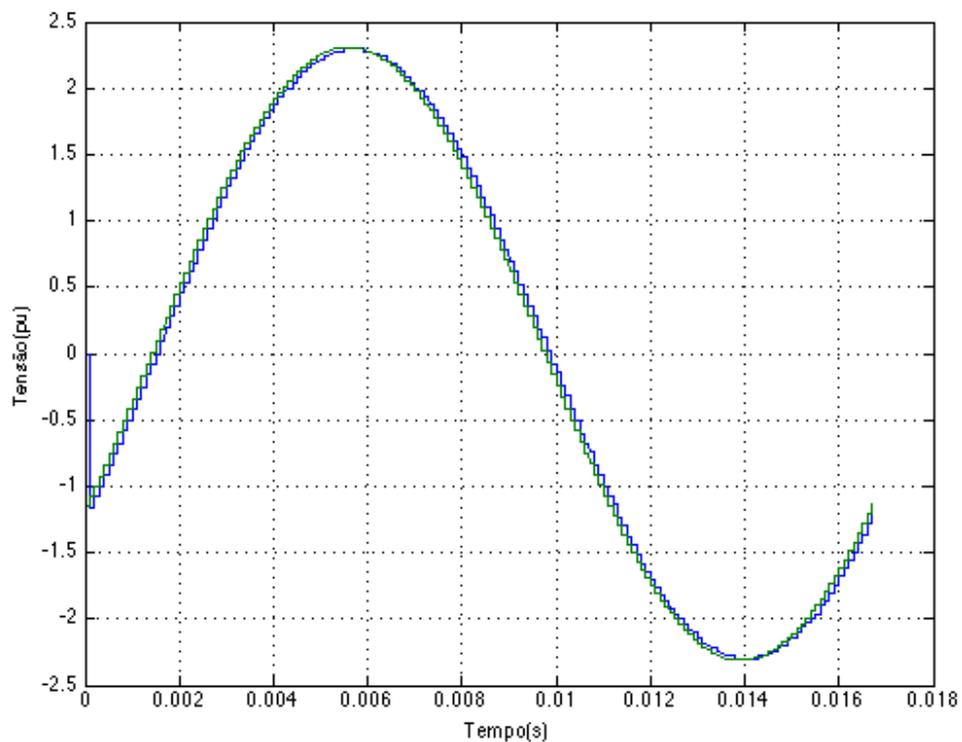


Figura 38 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_3 = A \angle -120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor a quatro fios.

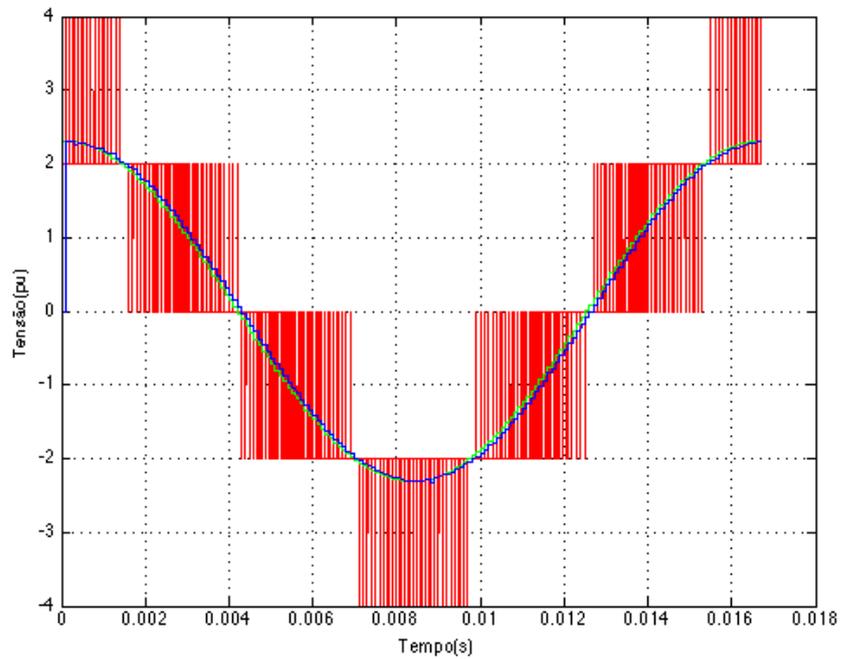


Figura 39 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.

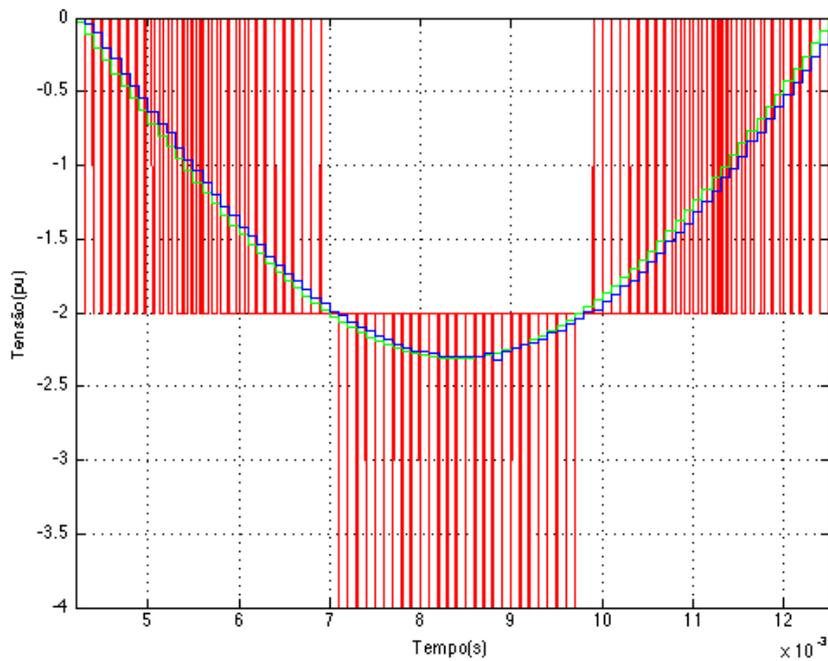


Figura 40 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor a quatro fios.

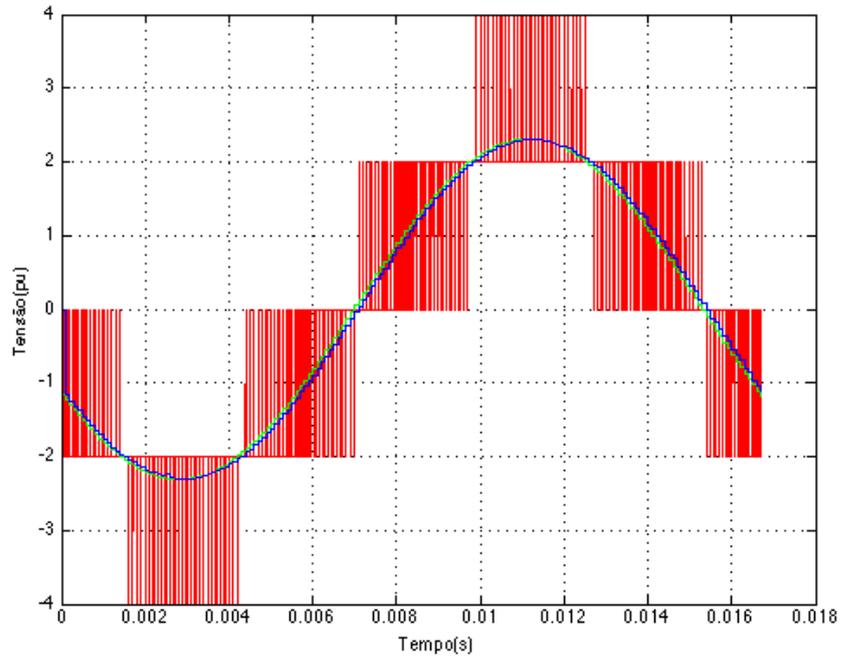


Figura 41 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.

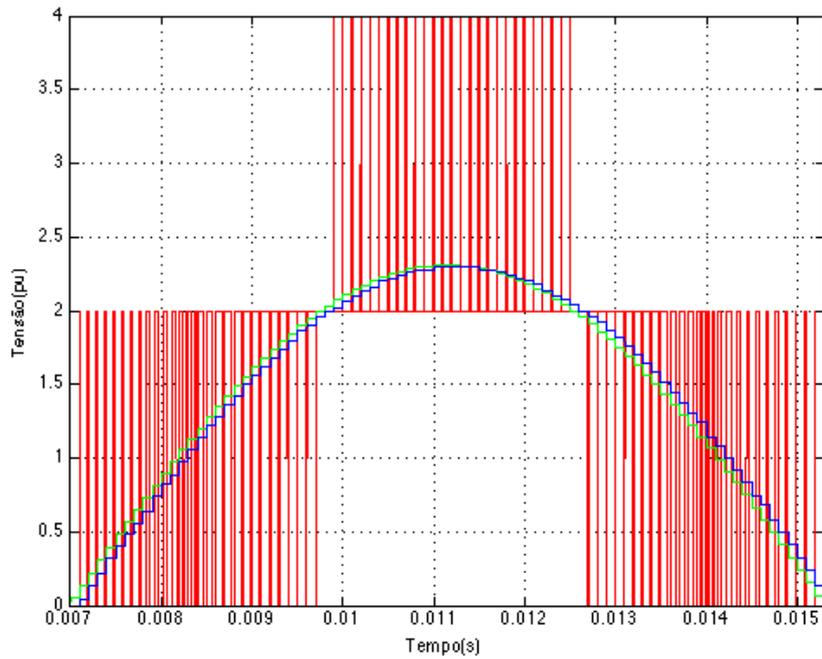


Figura 42 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor a quatro fios.

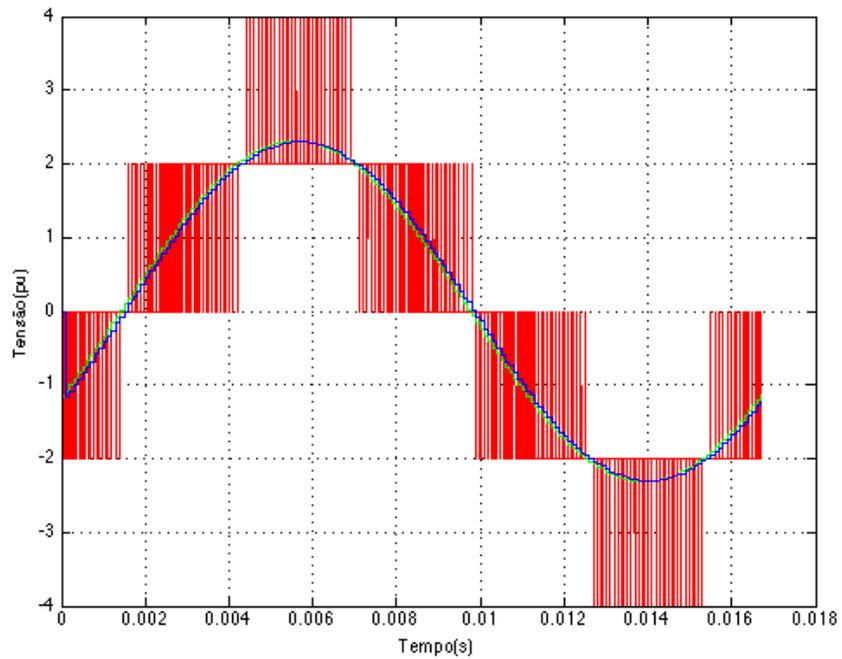


Figura 43 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.

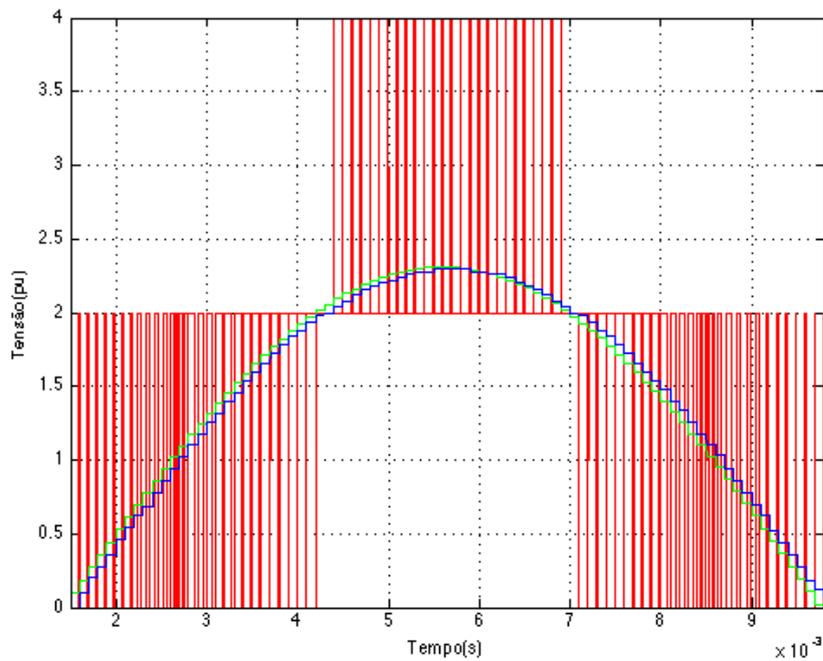


Figura 44 – Janela em foco da comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor a quatro fios.

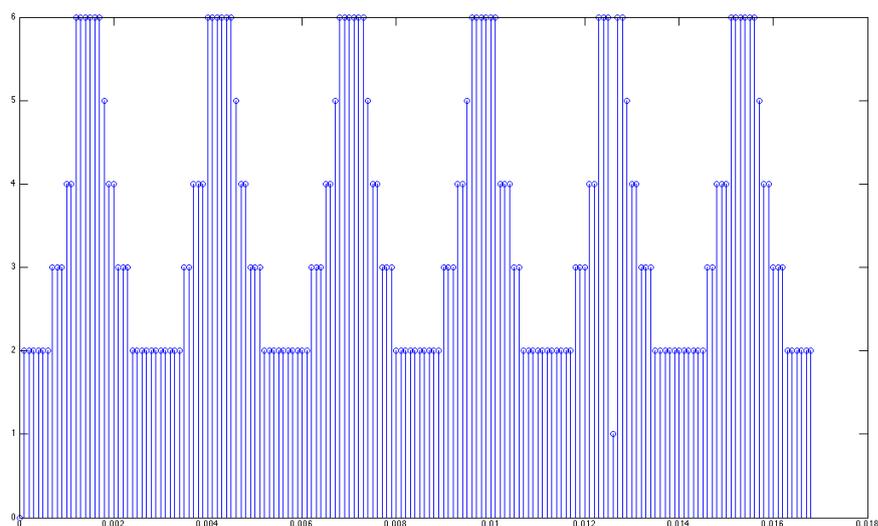


Figura 45 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor a quatro fios.

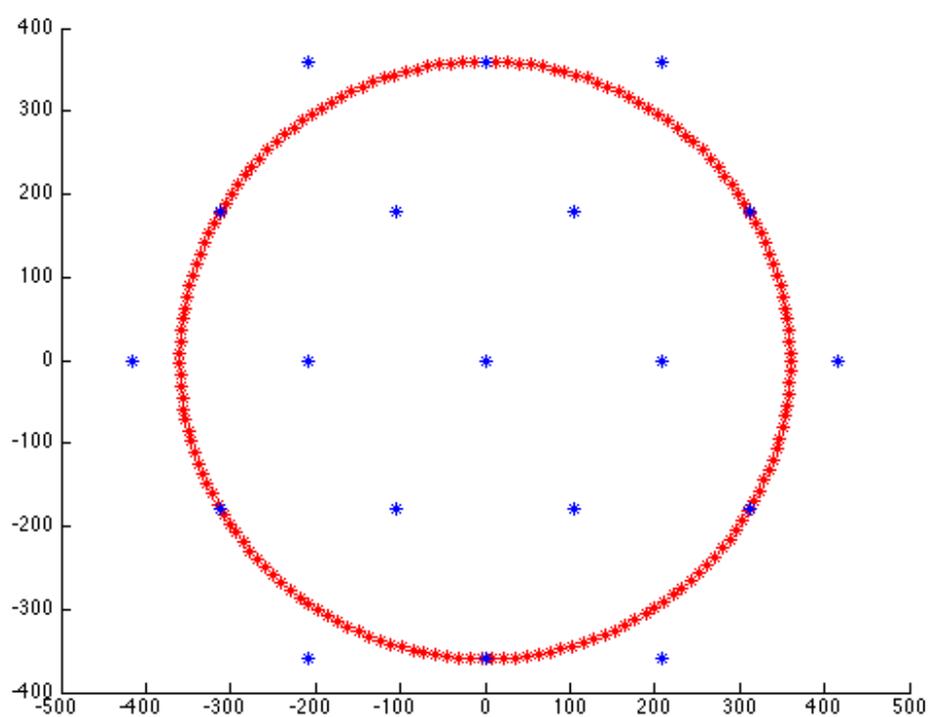


Figura 46 – Plano v_{135_d} versus v_{135_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

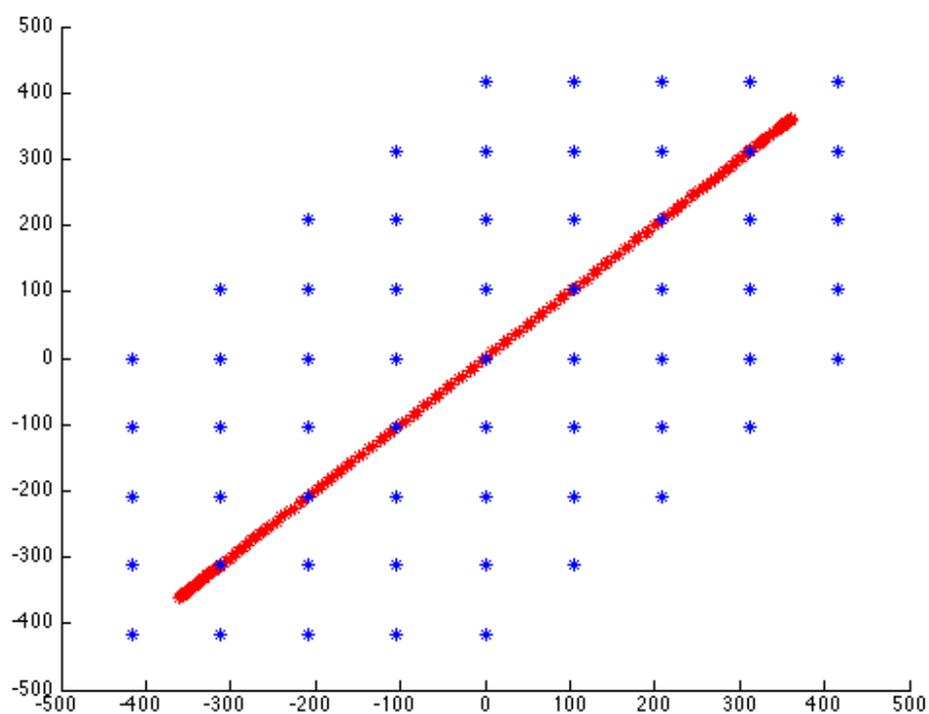


Figura 47 – Plano v_{135_d} versus v_{246_d} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

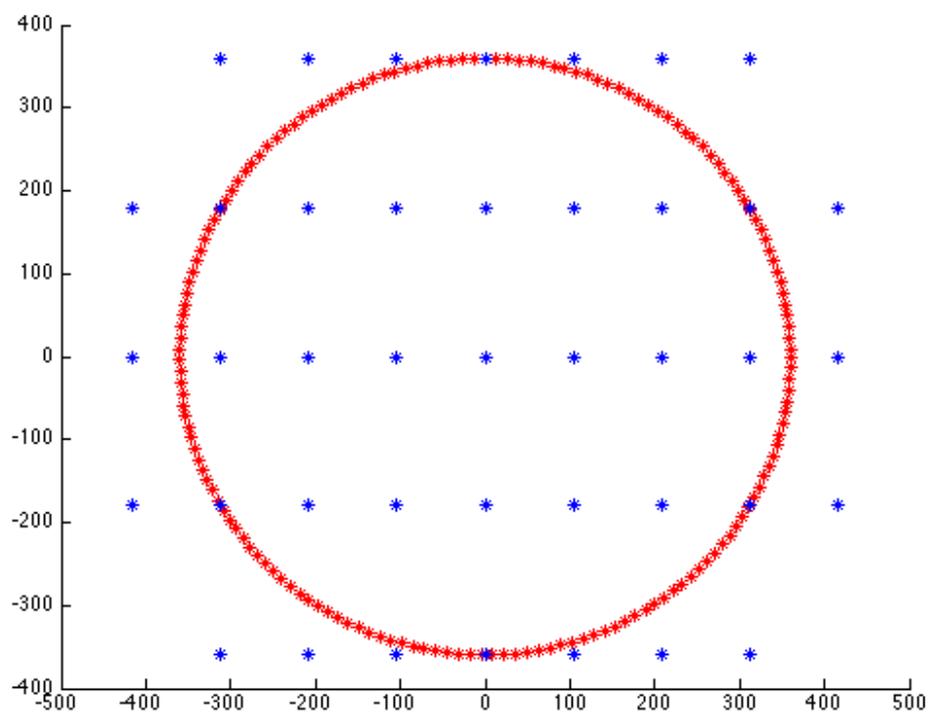


Figura 48 – Plano v_{135_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

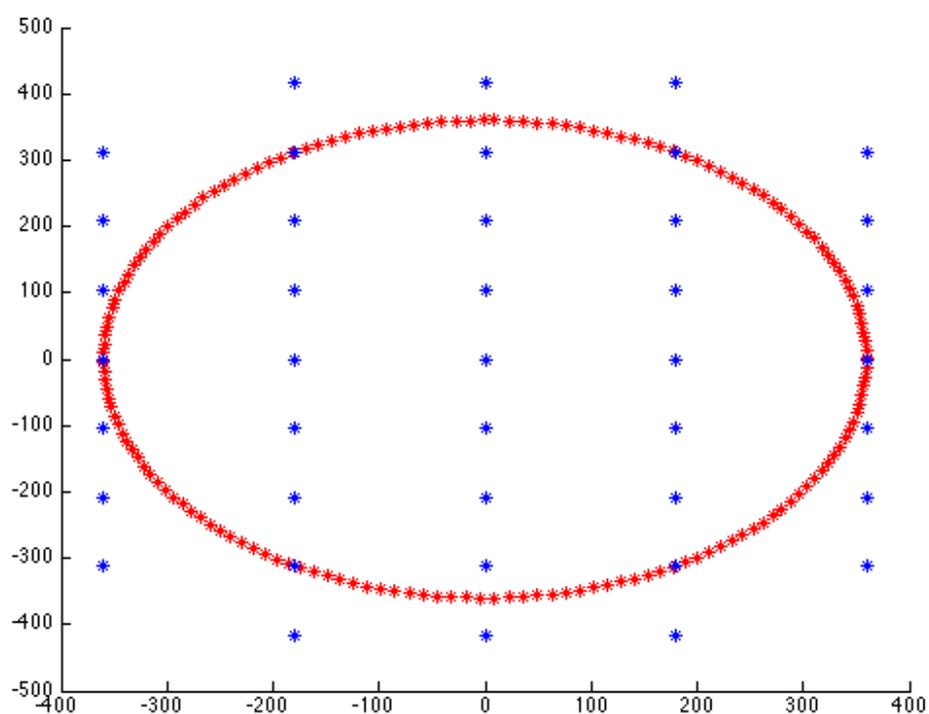


Figura 49 – Plano v_{135_q} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

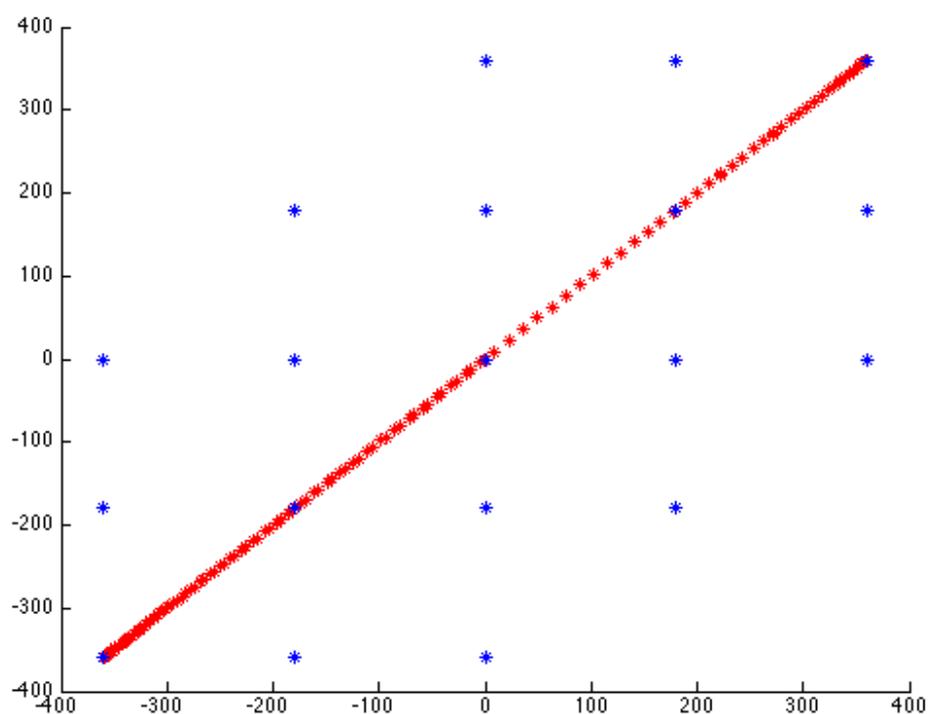


Figura 50 – Plano v_{135_q} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

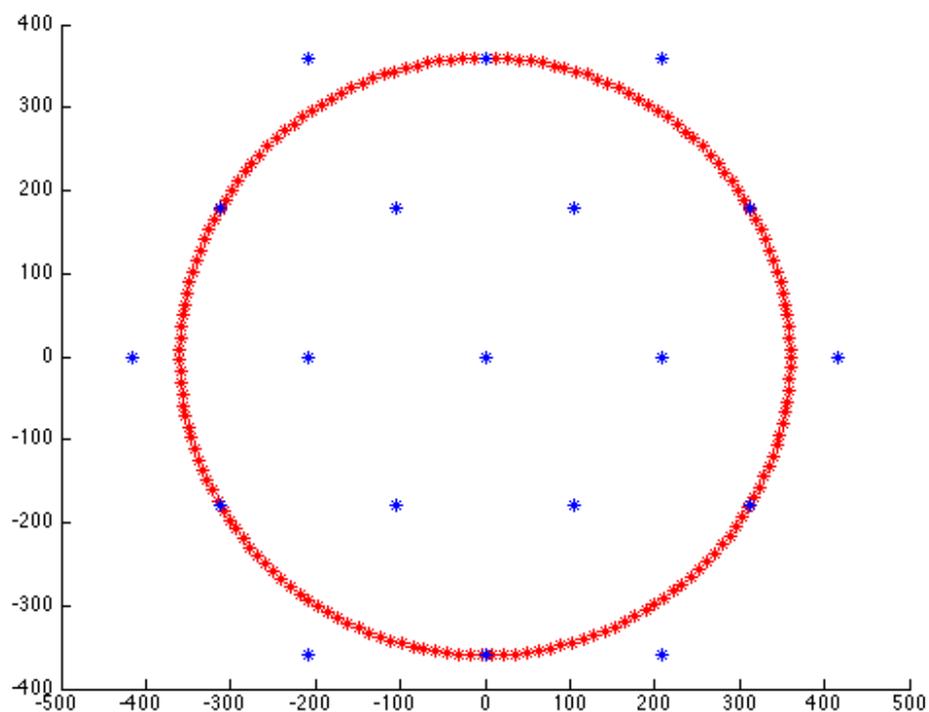


Figura 51 – Plano v_{246_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

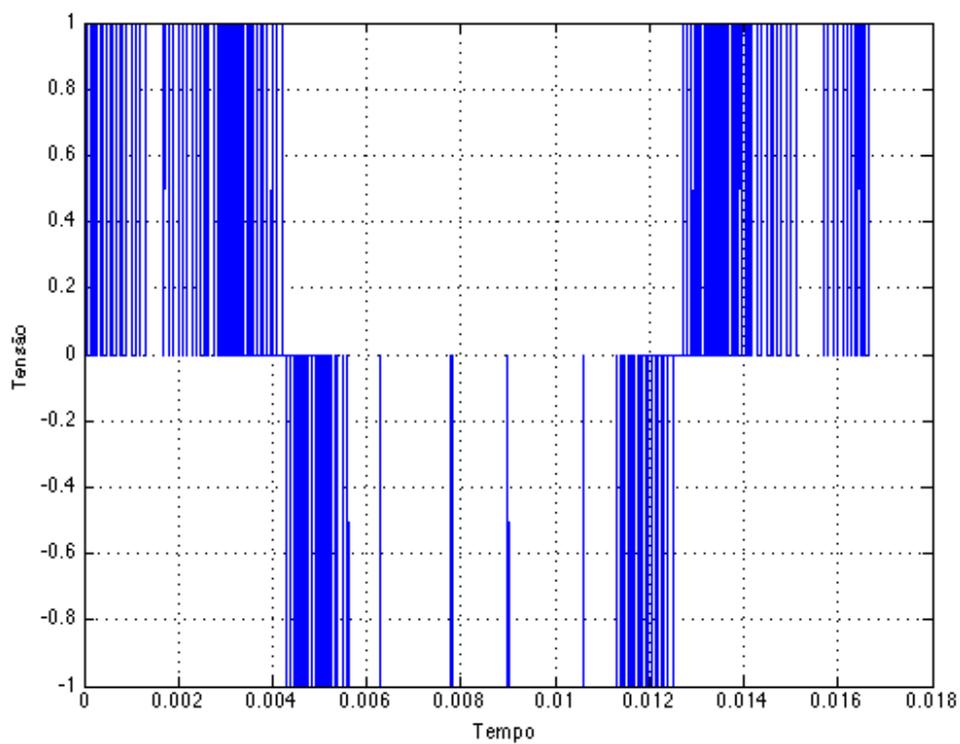


Figura 52 – Tensão v_{nha} para conversor de nove braços.

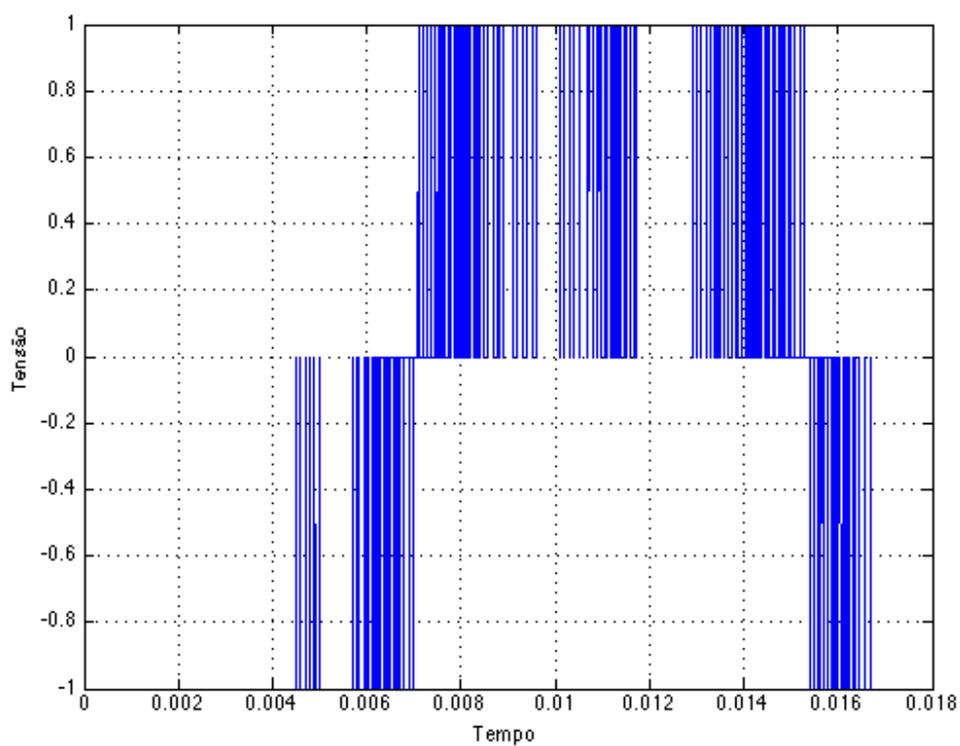


Figura 53 – Tensão v_{nhb} para conversor de nove braços.

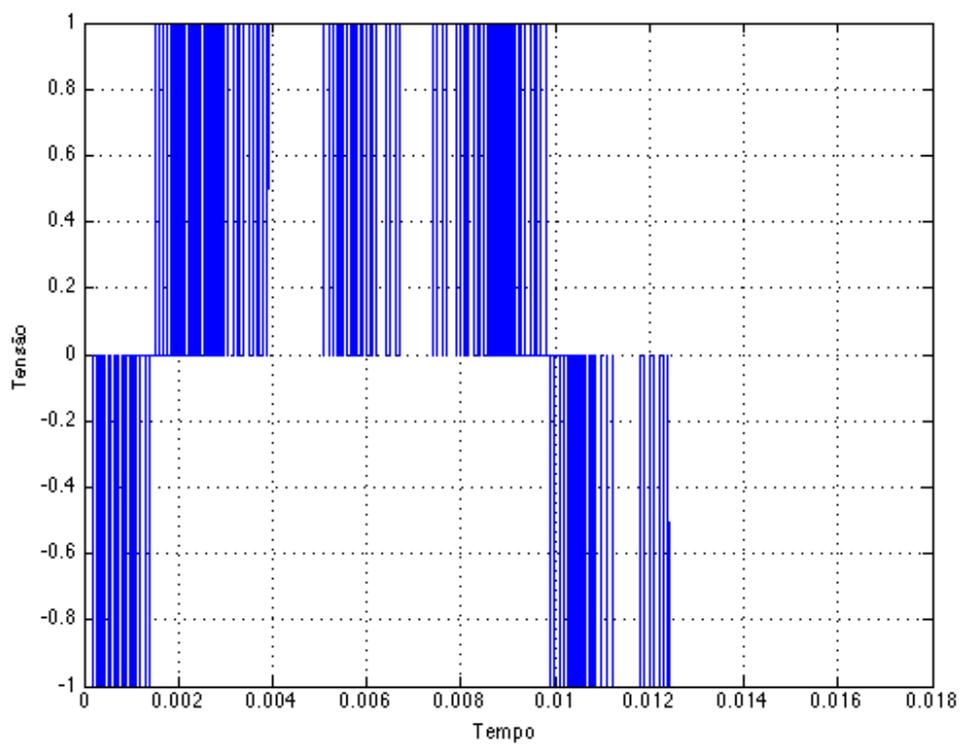


Figura 54 – Tensão v_{nhc} para conversor de nove braços.

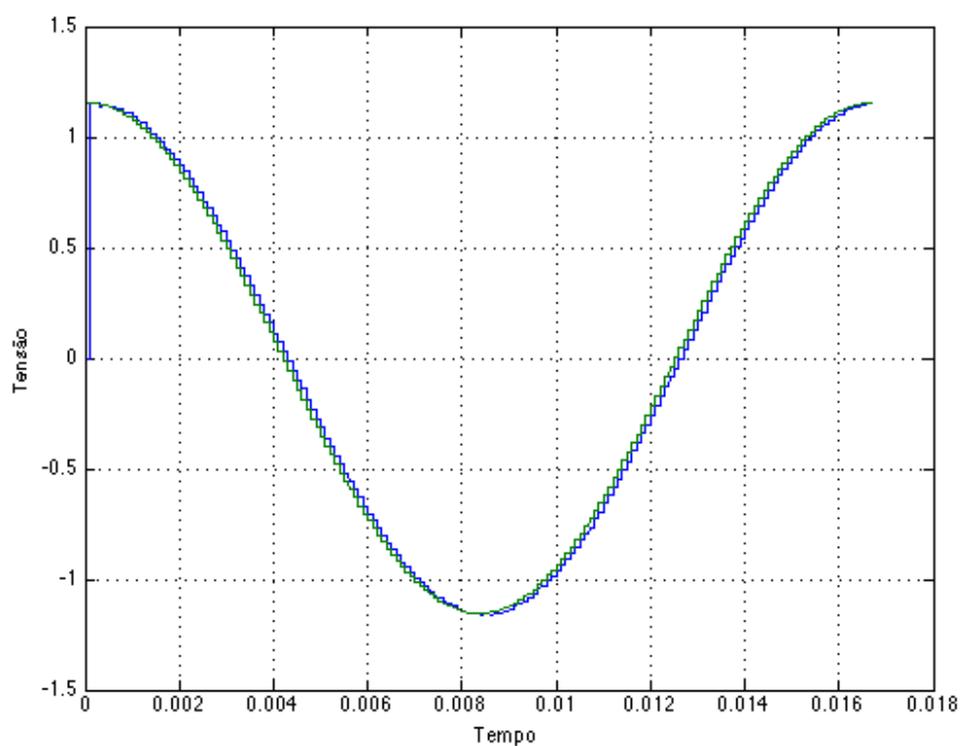


Figura 55 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_1 = A\angle 0^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços.

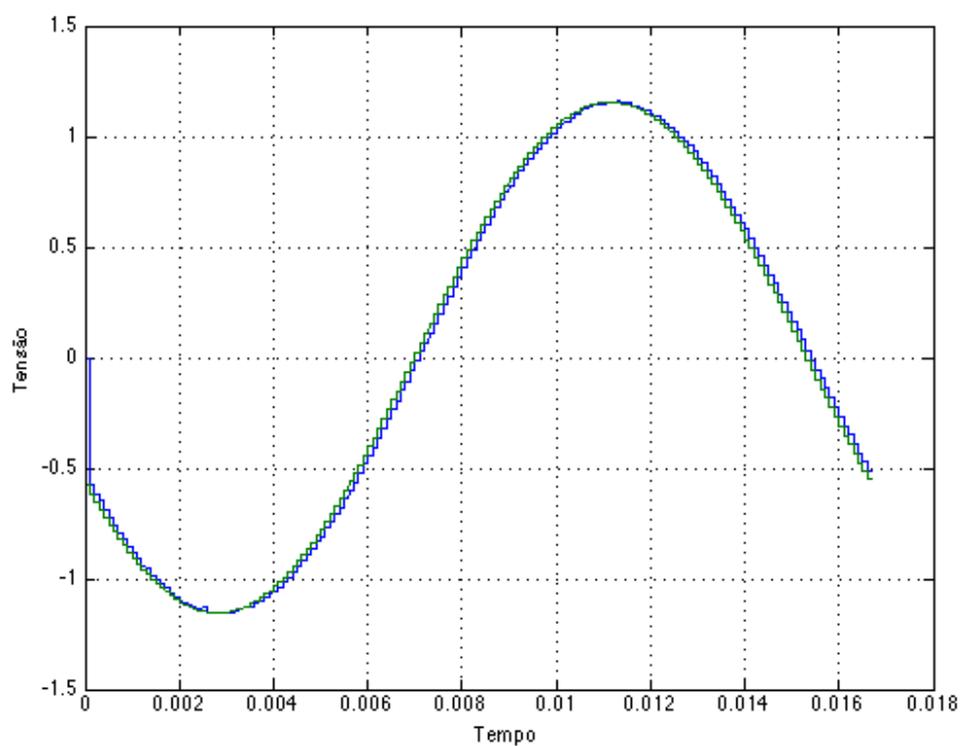


Figura 56 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_3 = A\angle 120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços.

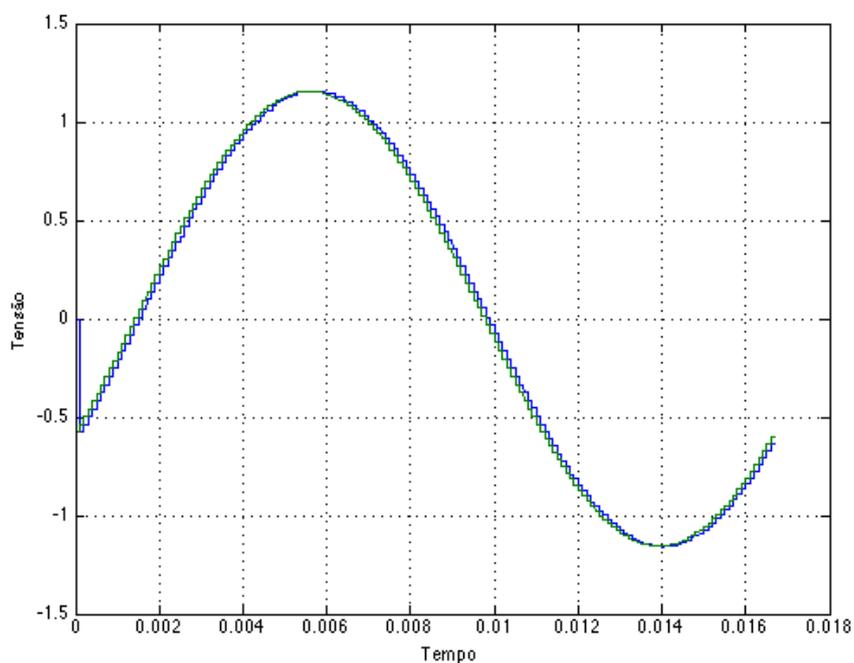


Figura 57 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_5 = A\angle -120^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços.

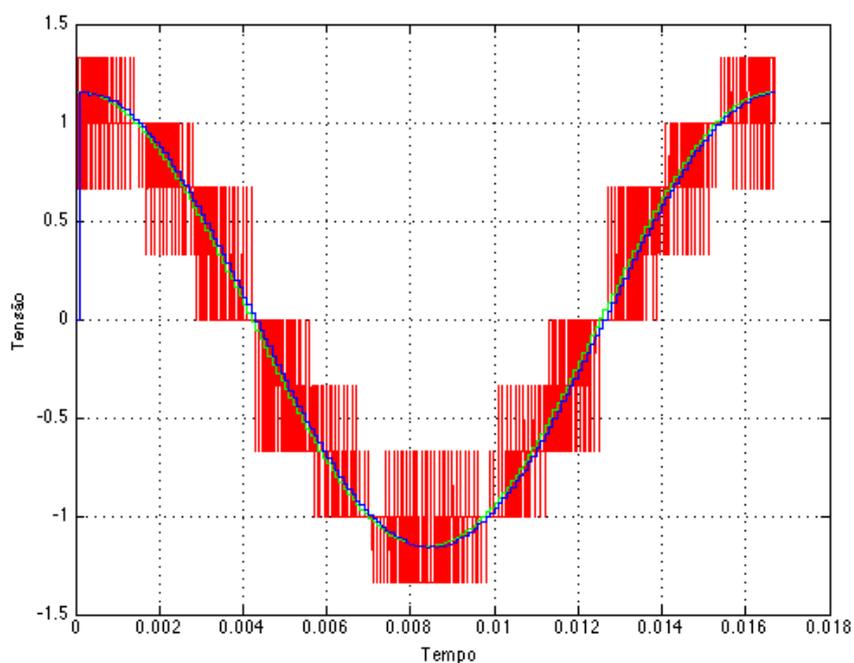


Figura 58 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor de nove braços.

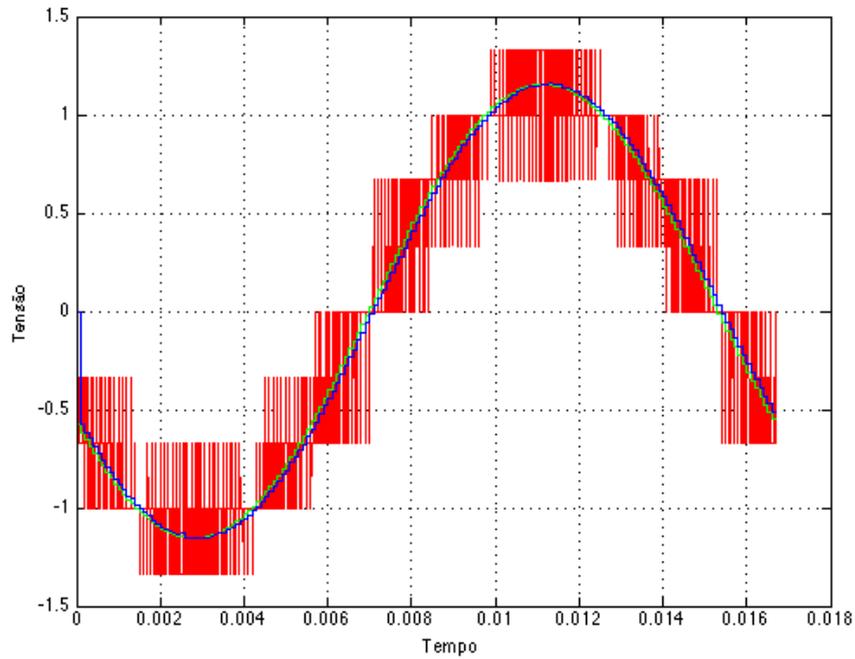


Figura 59 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor de nove braços.

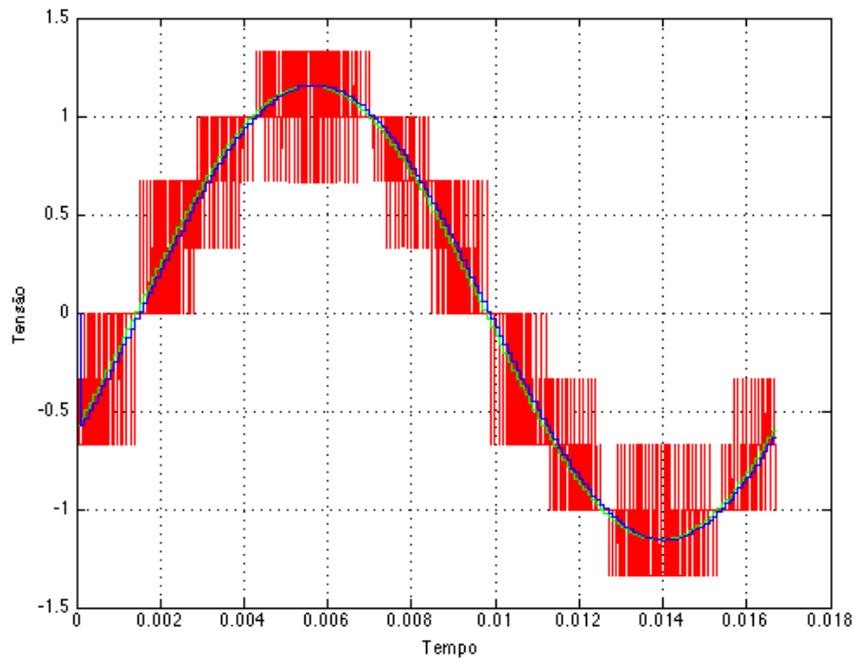


Figura 60 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g5} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_5 (em verde) para conversor de nove braços.

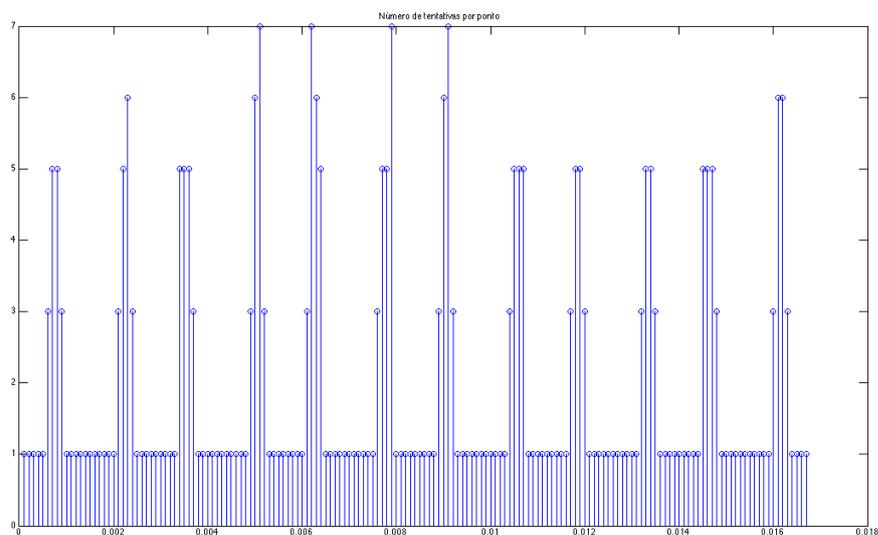


Figura 61 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor de nove braços.

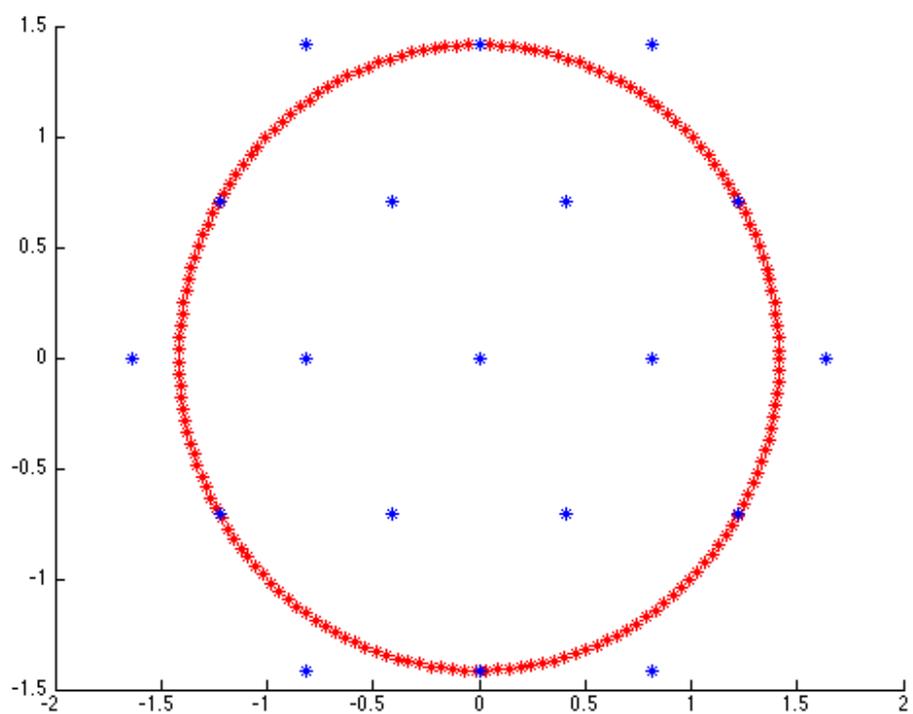


Figura 62 – Plano v_{135_d} versus v_{135_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

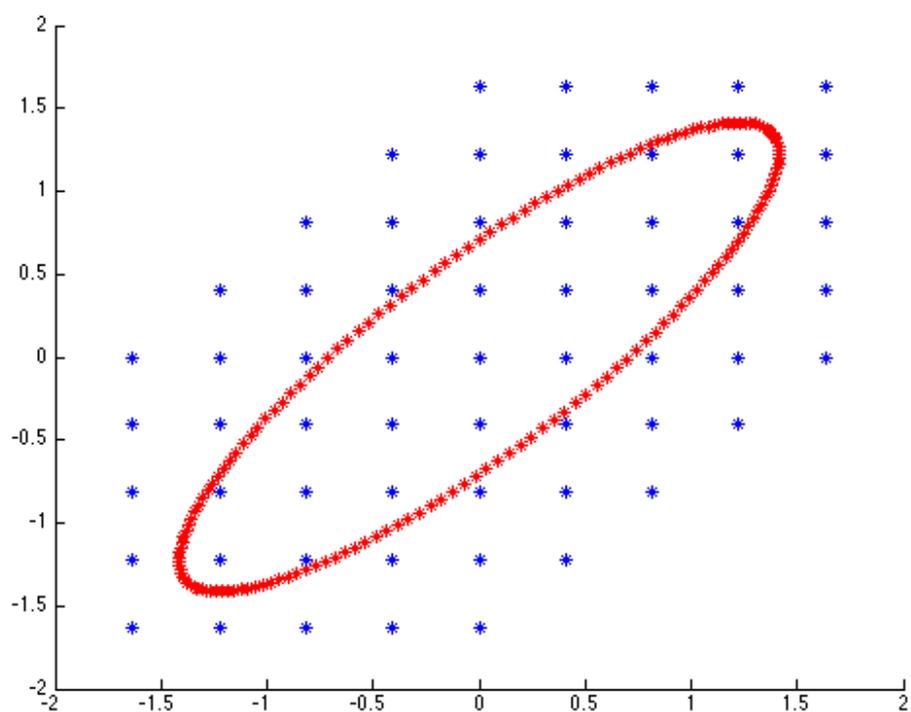


Figura 63 – Plano v_{135_d} versus v_{246_d} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

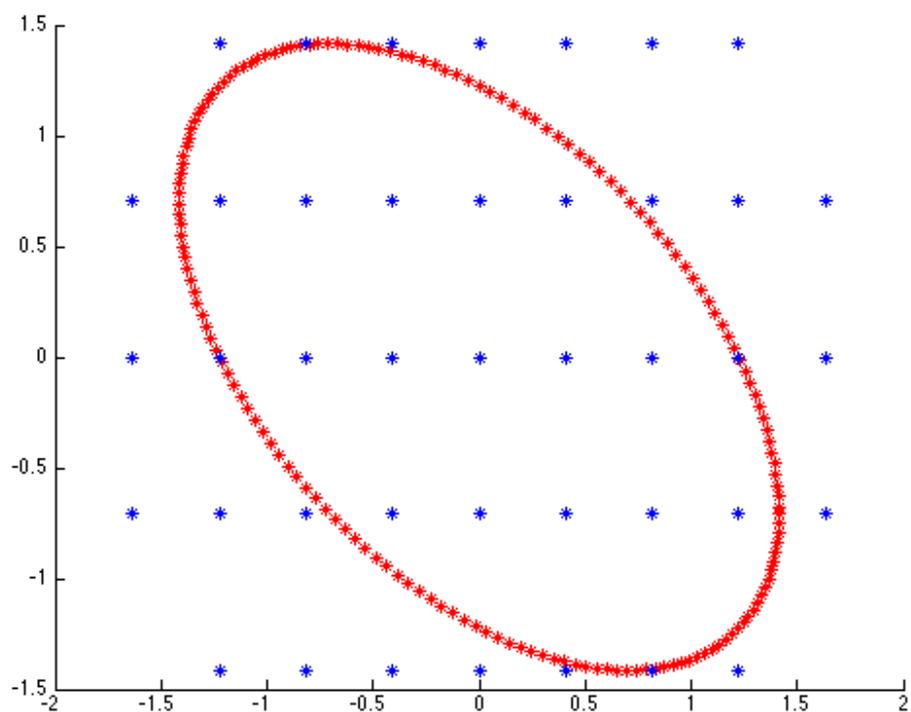


Figura 64 – Plano v_{135_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

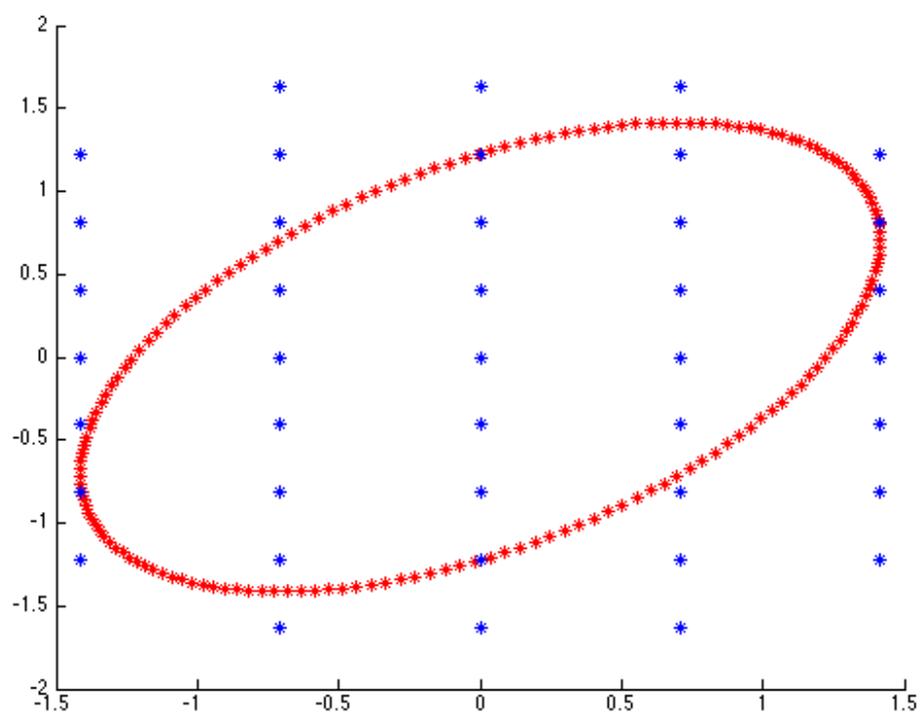


Figura 65 – Plano v_{135_q} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho.

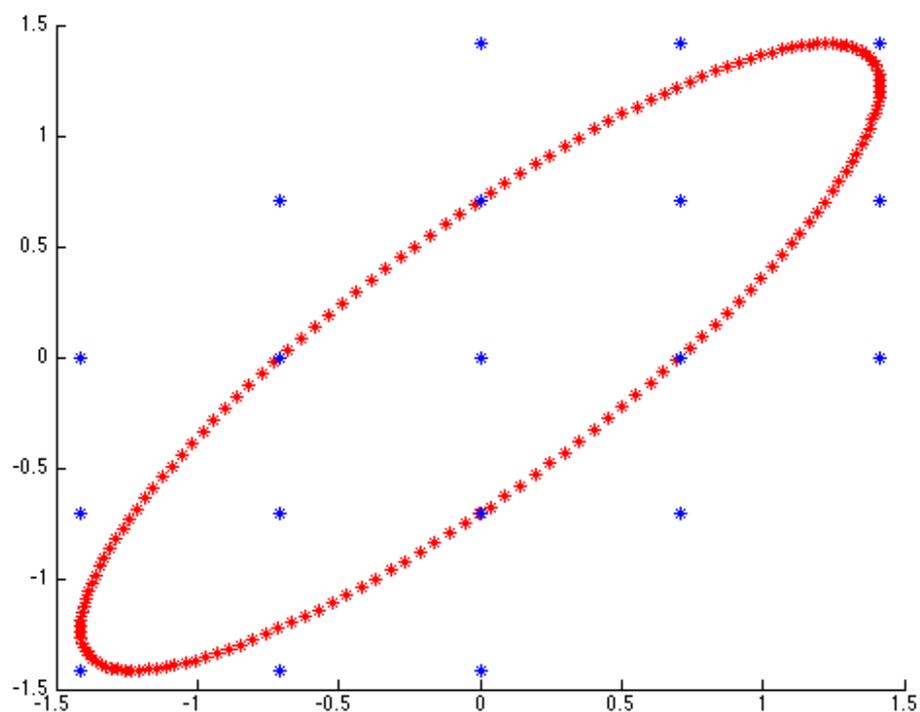


Figura 66 – Plano v_{135_q} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

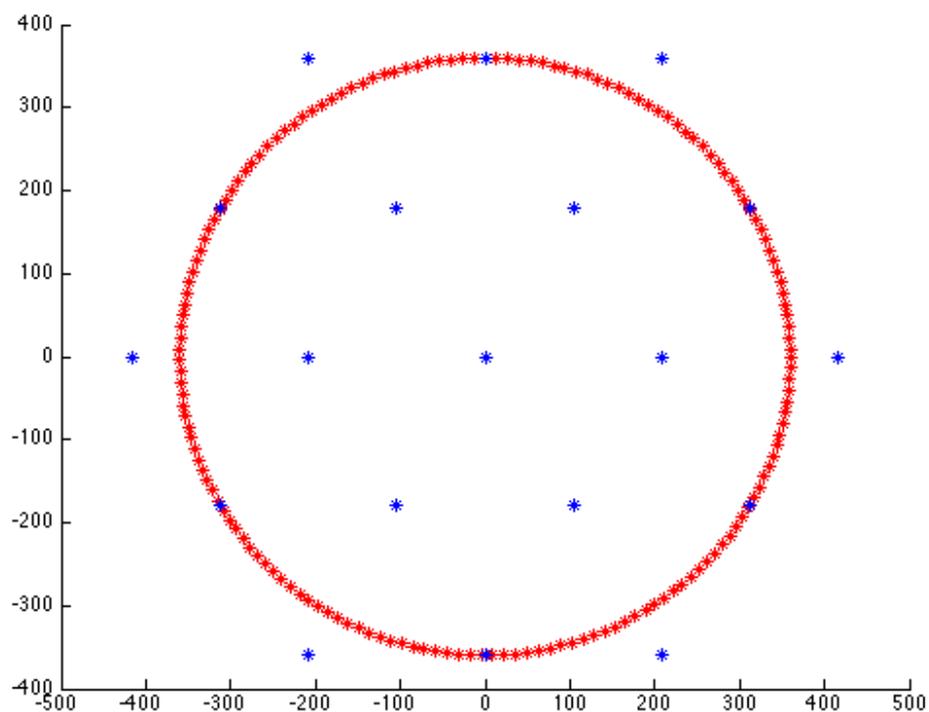


Figura 67 – Plano v_{246_d} versus v_{246_q} . Constelação de vetores espaciais em azul e vetores de referência em vermelho para conversor de nove braços.

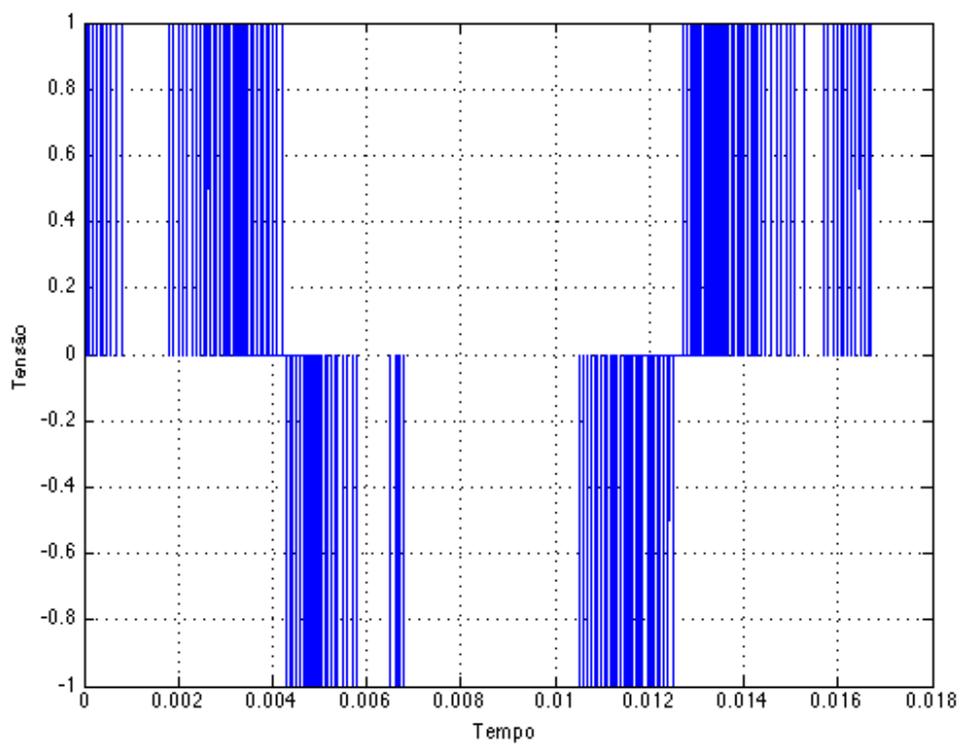


Figura 68 – Tensão v_{nha} para conversor de nove braços.

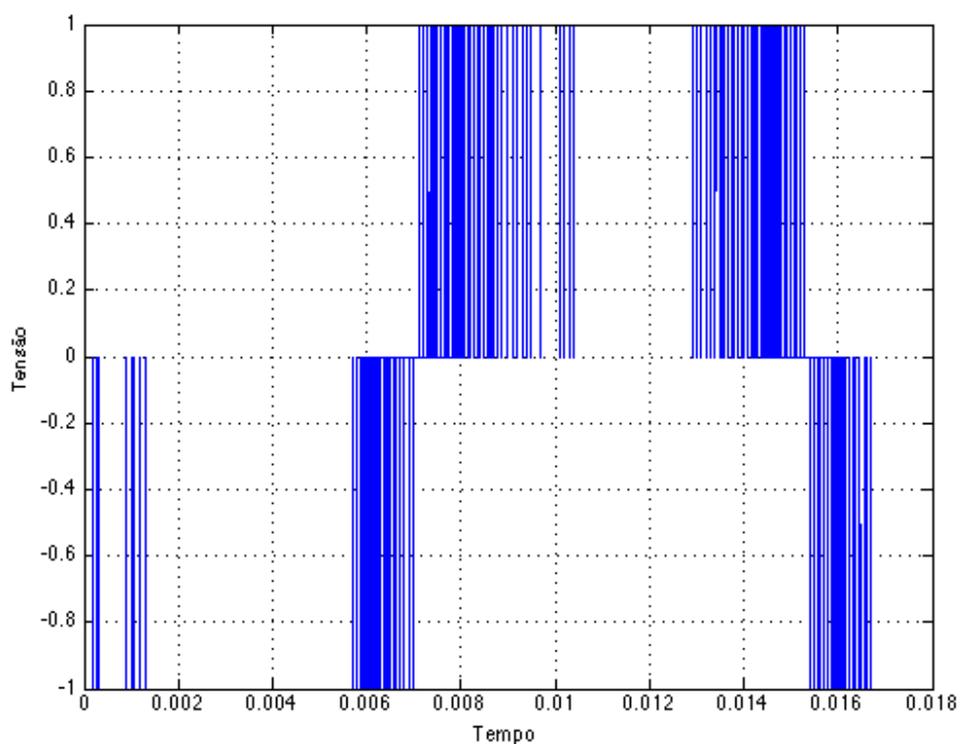


Figura 69 – Tensão v_{nhb} para conversor de nove braços.

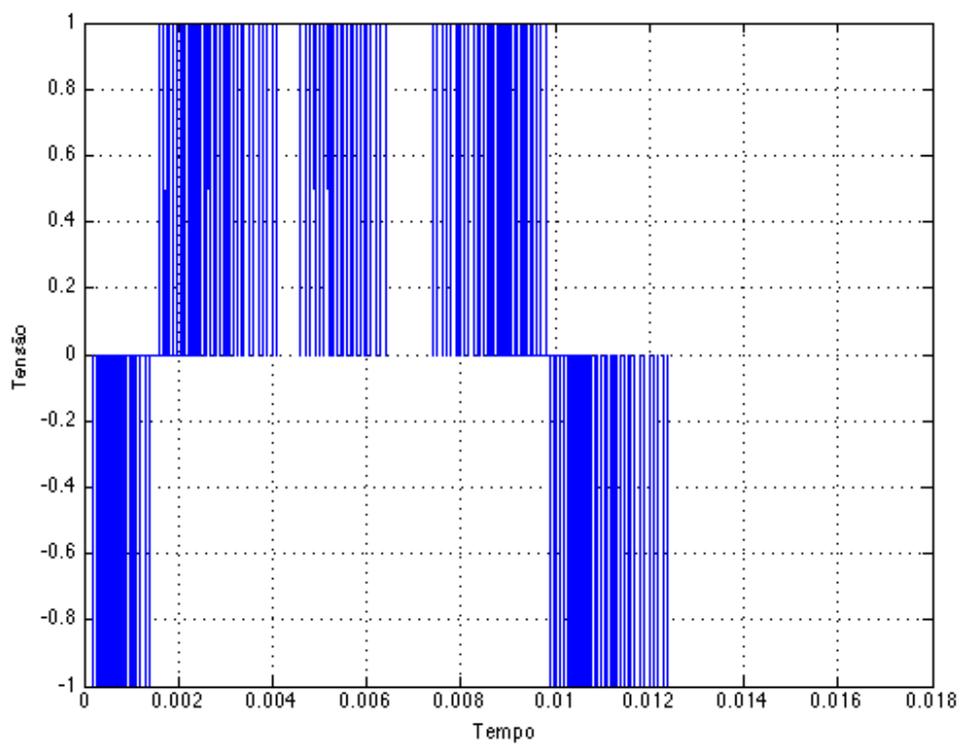


Figura 70 – Tensão v_{nhc} para conversor de nove braços.

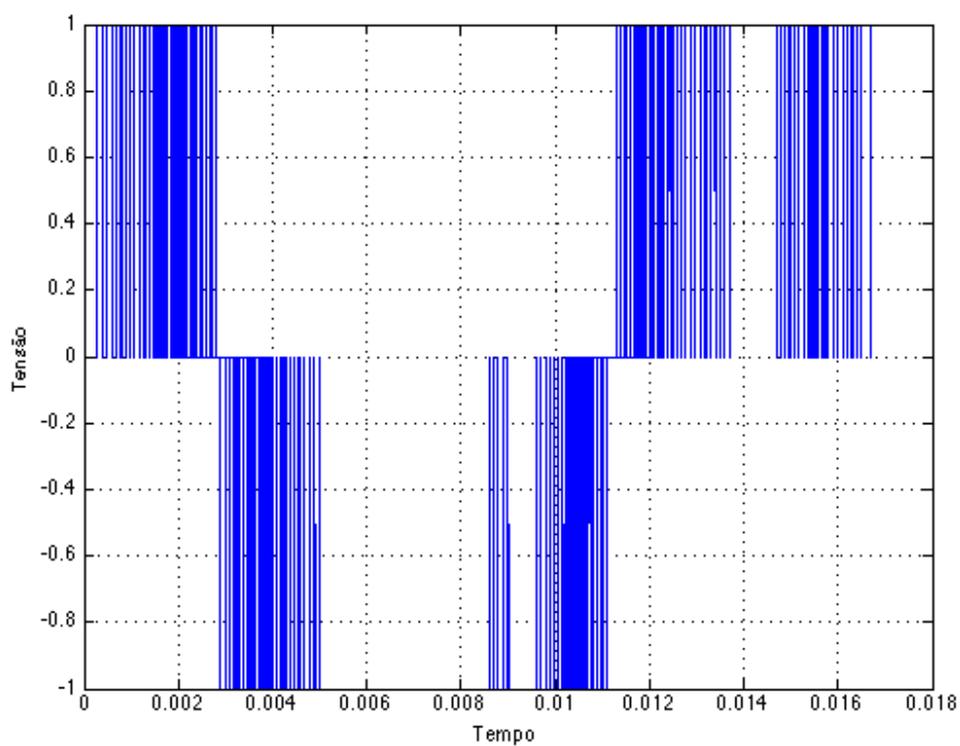


Figura 71 – Tensão v_{mha} para conversor de nove braços.

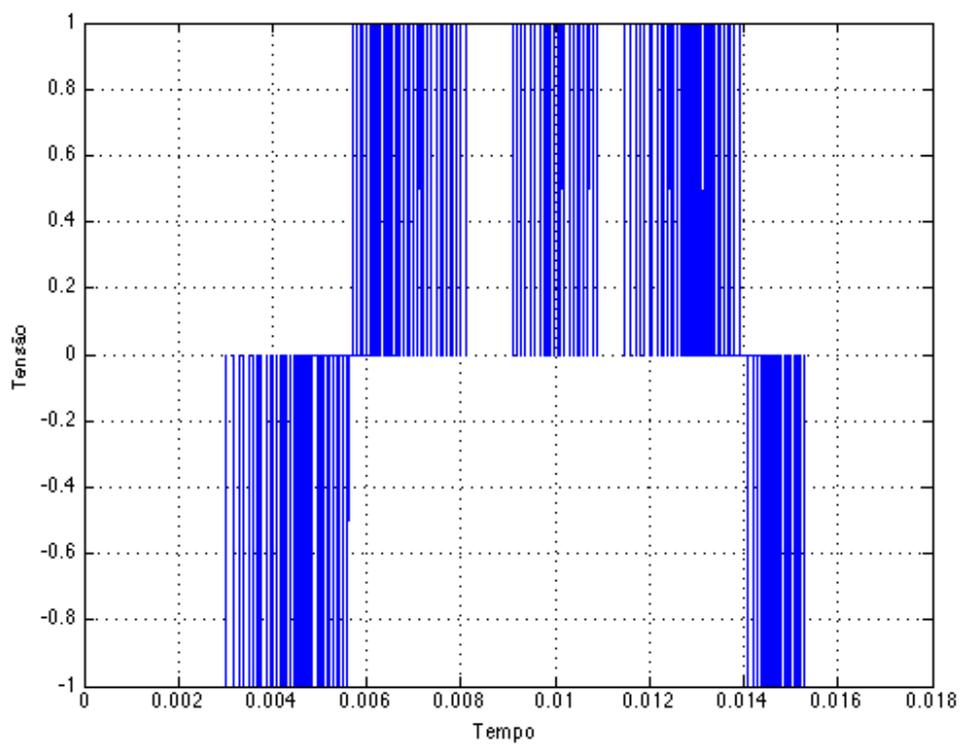


Figura 72 – Tensão v_{mhb} para conversor de nove braços.

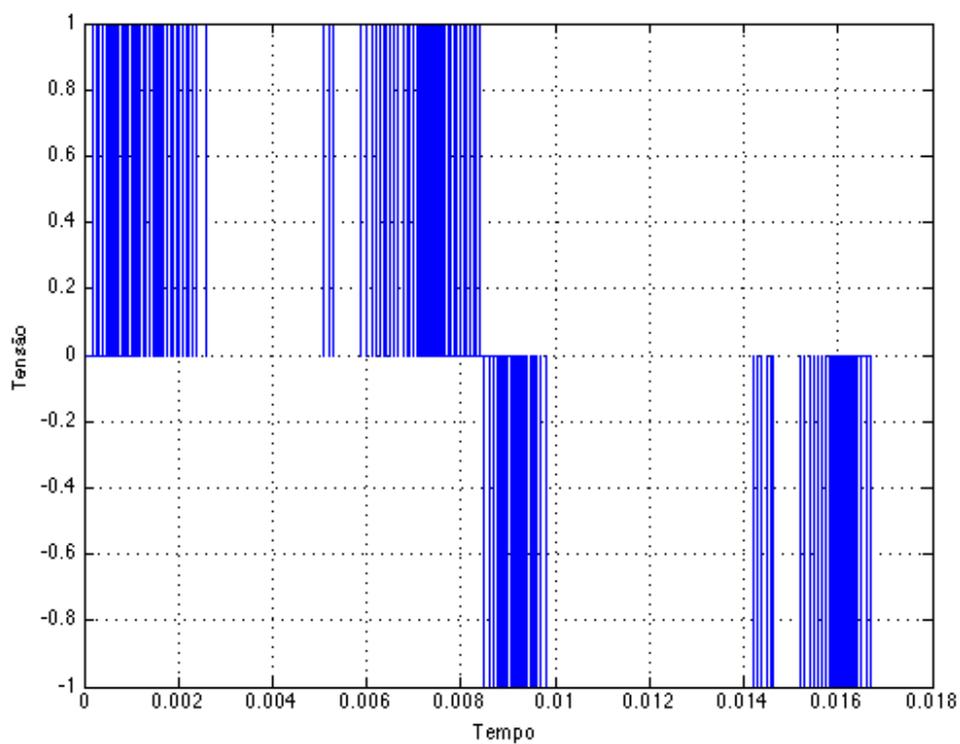


Figura 73 – Tensão v_{mhc} para conversor de nove braços.

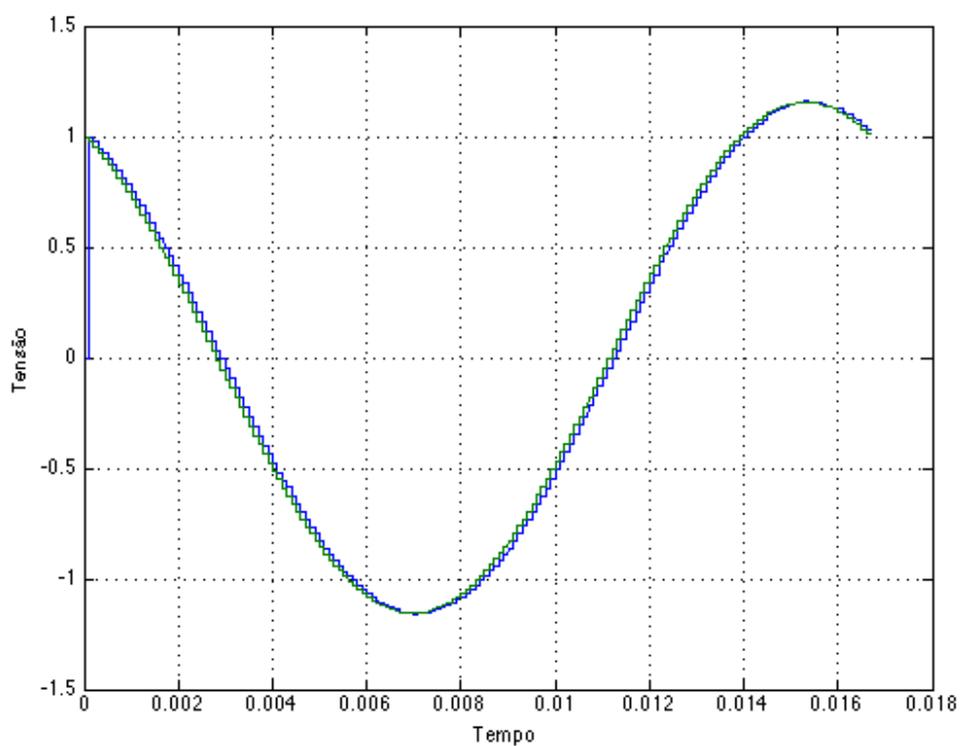


Figura 74 – Comparação entre tensão de referência $\hat{E}_2 = A\angle 30^\circ$ (verde) e média resultante dos chaveamentos (azul) para conversor de nove braços.

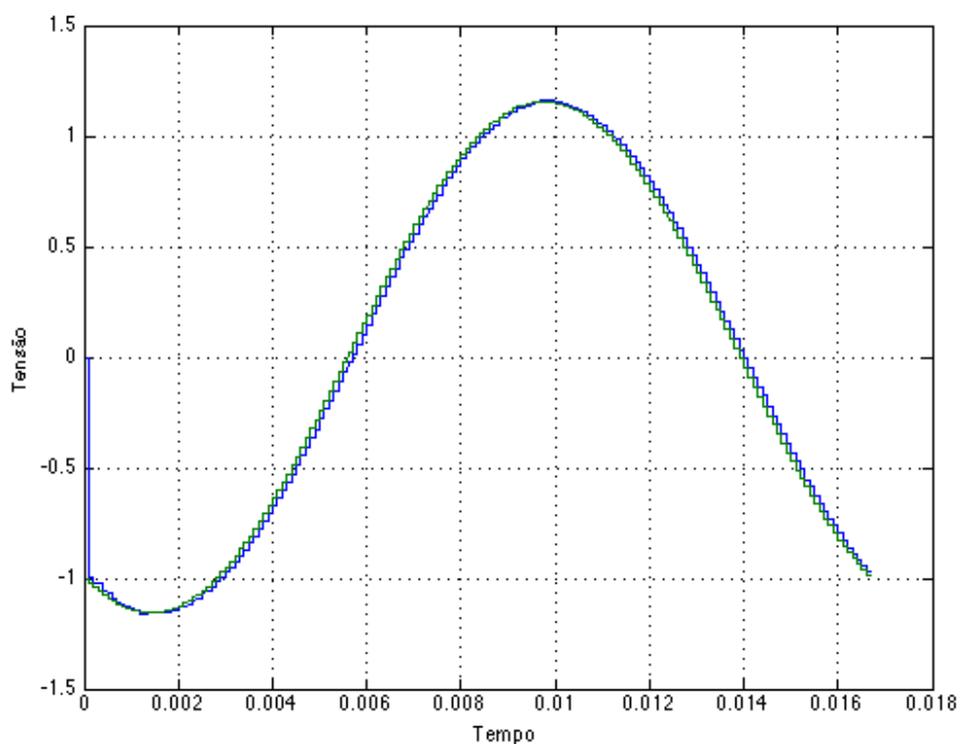


Figura 75 – Comparação entre média resultante dos chaveamentos (azul) e tensão de referência $\hat{E}_4 = A \cos(150^\circ)$ (verde) para conversor de nove braços.

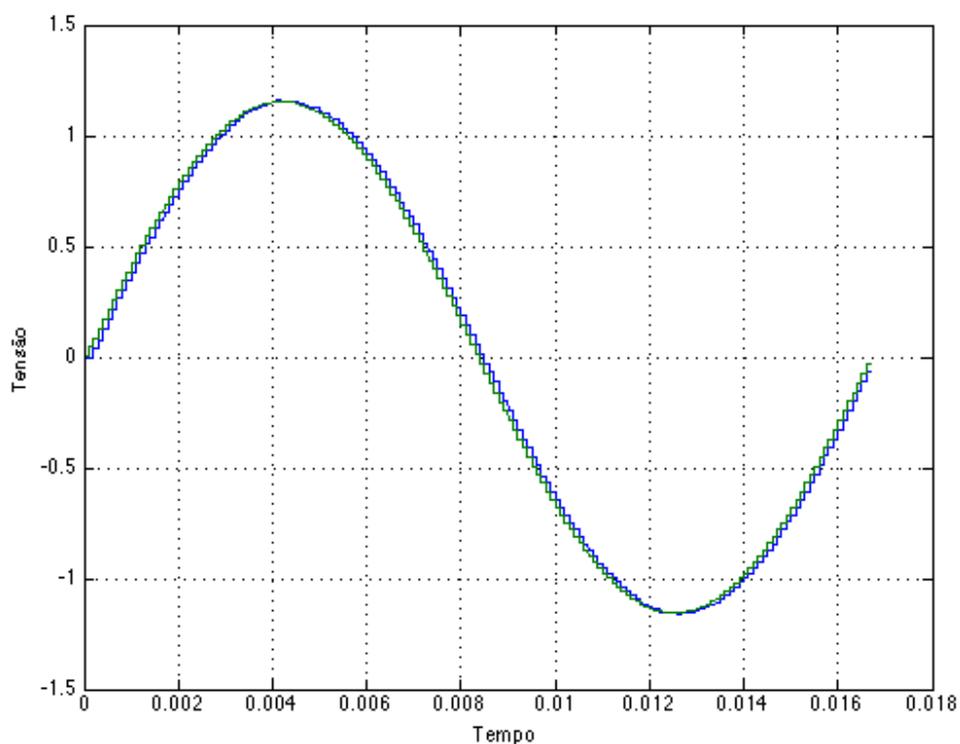


Figura 76 – Comparação entre média resultante dos chaveamentos (azul) e tensão de referência $\hat{E}_6 = A \cos(-90^\circ)$ (verde) para conversor de nove braços.

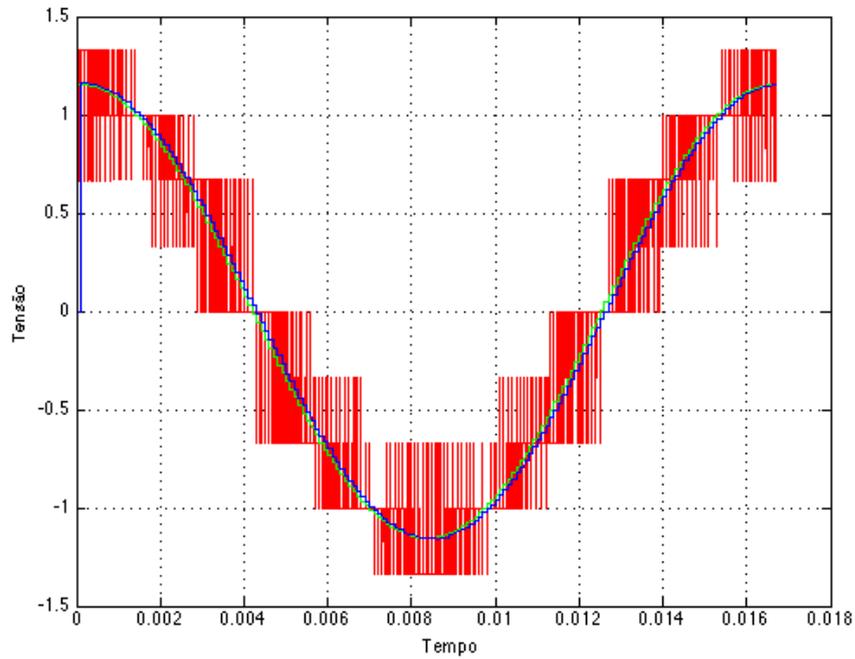


Figura 77 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g1} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_1 (em verde) para conversor de nove braços.

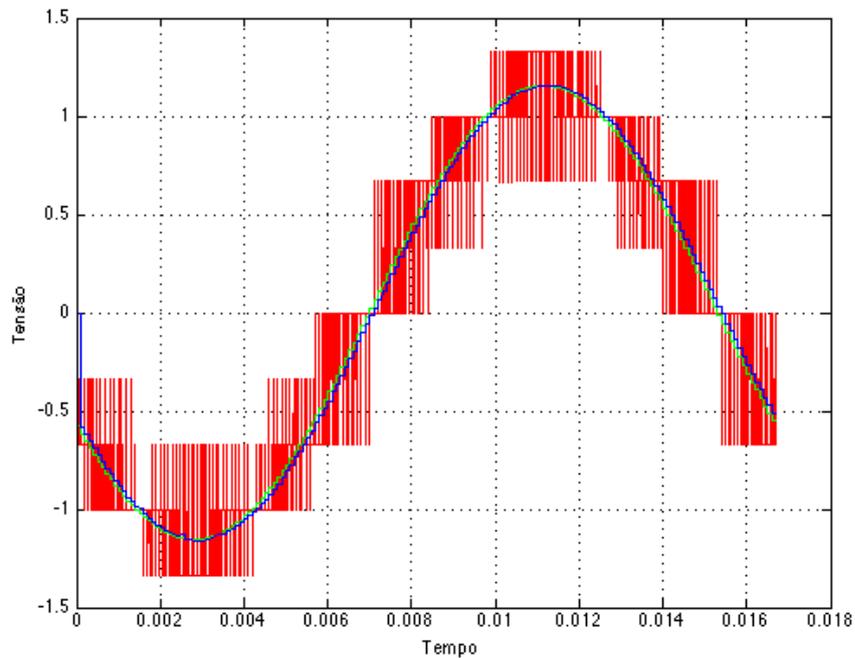


Figura 78 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g3} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_3 (em verde) para conversor de nove braços.

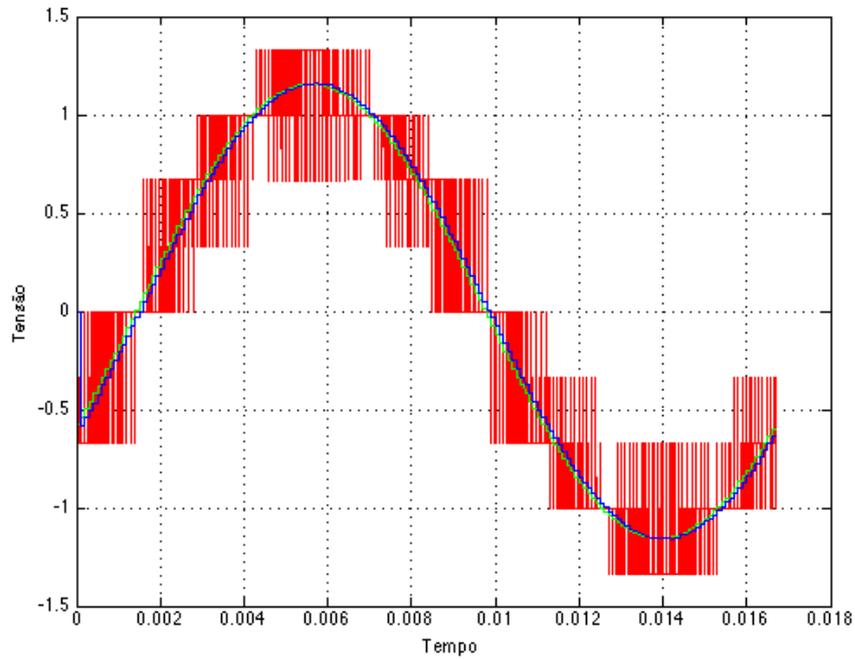


Figura 79 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g5} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_5 (em verde) para conversor de nove braços.

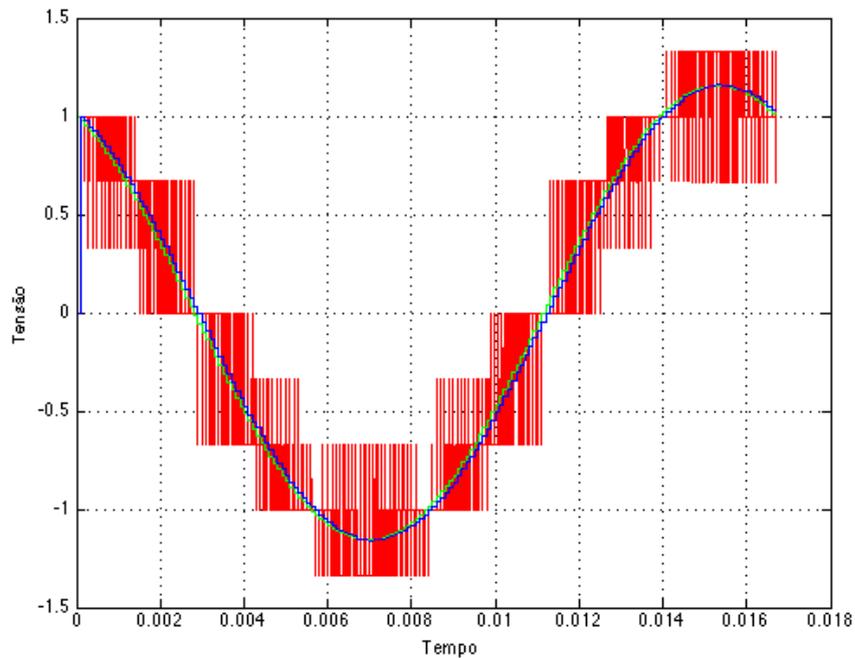


Figura 80 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g2} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_2 (em verde) para conversor de nove braços.

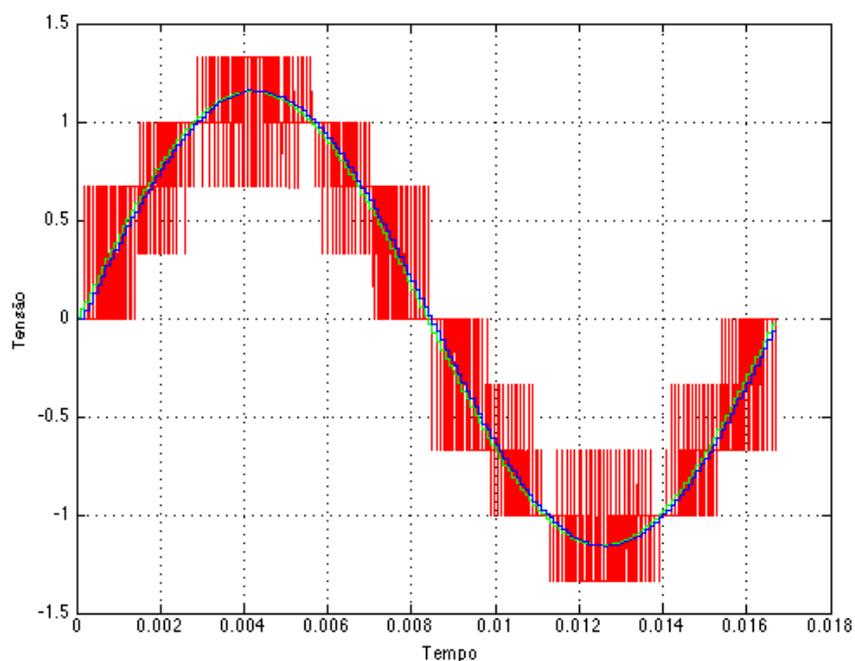


Figura 81 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g4} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_4 (em verde) para conversor de nove braços.

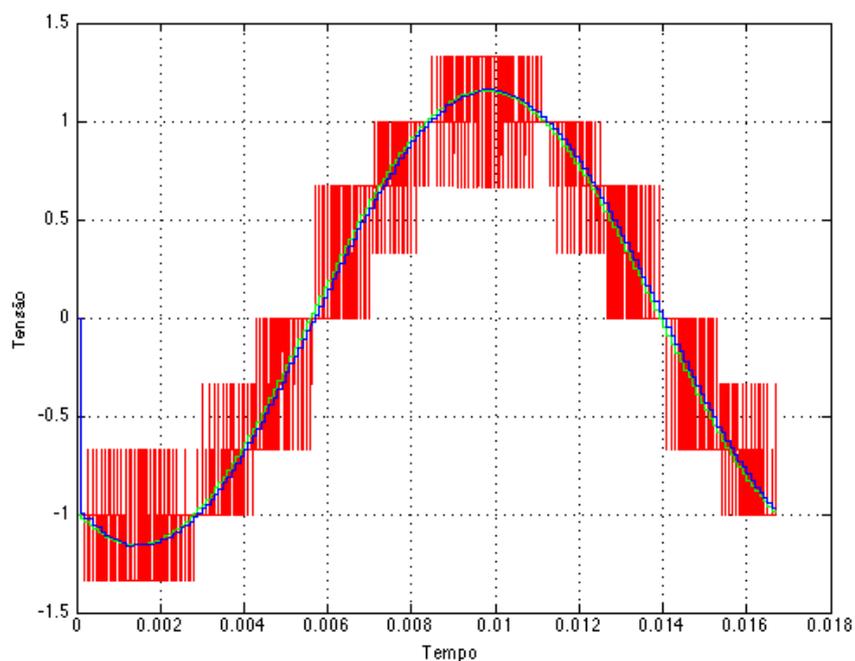


Figura 82 – Comparação entre tensão resultante dos chaveamentos v_{g6} (em vermelho), tensão média dos chaveamentos (em azul) e a tensão de referência \hat{E}_6 (em verde) para conversor de nove braços.

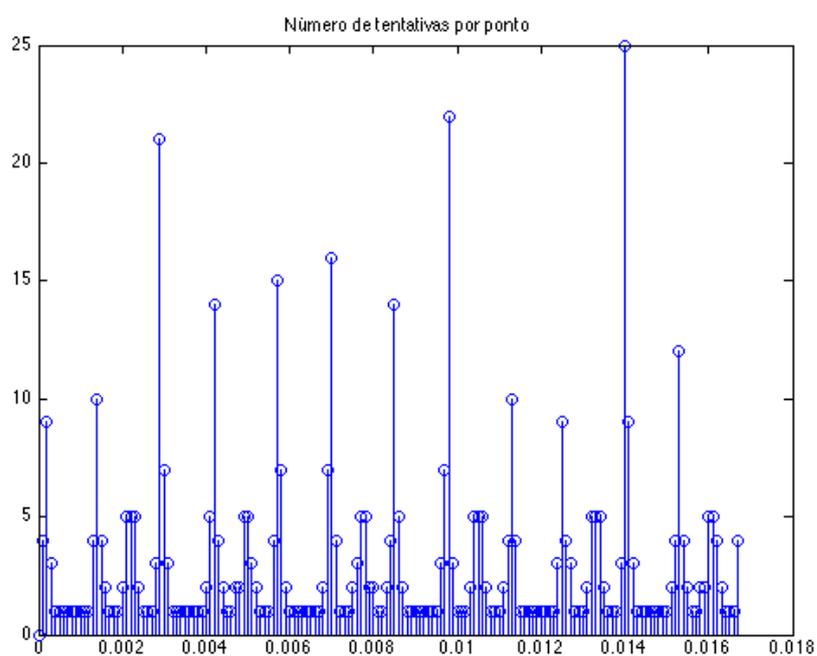


Figura 83 – Número de testes para seleção de grupo de vetores espaciais relativo a um instante de tempo para conversor de nove braços.

6 Considerações Finais

Este trabalho teve por objetivo apresentar uma nova ferramenta para a aplicação da técnica SVPWM em sistemas multidimensionais. A proposta da mesma é fazer com que a escolha do grupo de vetores espaciais seja realizada diretamente no espaço multidimensional e de maneira automática, sem a necessidade de uma extensa análise visual dos vetores. Foram apresentados dois exemplos de aplicação da estratégia. O primeiro foi referente à topologia de um conversor de oito braços a quatro fios, um sistema cuja representação é tridimensional. O segundo se trata da topologia de um conversor de nove braços, circuito cuja representação pode ser feita em quatro dimensões.

Inicialmente, no Capítulo 2, a Ferramenta de Automatização de PWM Vetorial foi descrita. Foram apresentados os critérios utilizados para a escolha do grupo de vetores espaciais para a síntese de um vetor de referência, as três etapas de implementação da técnica (cálculo de distâncias em n dimensões, determinação do grupo de vetores que atende ao Critério 1 e avaliação de atendimento ao Critério 2) e estratégias para redução do custo computacional da alternativa (redução por etapas e diminuição por sequência de combinações com termos adjacentes).

No Capítulo 3, a topologia do conversor de oito braços a quatro fios foi explicitada. Foram apresentados seu circuito equivalente e o equacionamento de tensões e correntes do sistema. Além disso, a constelação de vetores espaciais referente ao espaço tridimensional do conversor foi caracterizada (para o caso em que $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$) e exemplos de estados das chaves que geram tais vetores espaciais foram mostrados,

A topologia do conversor de nove braços foi apresentada no capítulo 4. O circuito equivalente e as equações do sistema foram descritos, assim como a aplicação da transformada dq para a redução do mesmo ao caso de quatro dimensões. O espaço vetorial referente à topologia foi caracterizado por meio de seis gráficos bidimensionais, para o caso em que $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$, $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$.

Por fim, no capítulo 5, os resultados da aplicação da ferramenta para as topologias explicitadas foram mostrados, comprovando sua eficácia. O conversor de oito braços a quatro fios foi simulado para o caso em que $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ para duas amplitudes distintas das tensões de referência ($A = 1.1247pu$ e $A = 2.3094pu$). As simulações do conversor de nove braços foram realizadas com $\frac{v_{Ca}}{2} = 1pu$, $\frac{v_{Cb}}{2} = 1pu$ e $\frac{v_{Cc}}{2} = 1pu$ para duas defasagens entre os grupos $(\hat{E}_1, \hat{E}_3, \hat{E}_5)$ e $(\hat{E}_2, \hat{E}_4, \hat{E}_6)$, dadas por 0° e 30° .

Vale ressaltar que o enfoque do trabalho está na escolha automatizada do grupo de vetores espaciais e não na determinação da melhor sequência de chaveamentos que geram tais vetores, um importante tema a ser explorado em trabalhos futuros. As simulações

foram realizadas com o intuito de atestar o funcionamento da ferramenta e portanto, não houve uma preocupação com a seleção de chaveamentos que concedam características específicas aos sistemas, tais como menor frequência de chaveamento e menor THD.

A ferramenta foi desenvolvida para sistemas com três ou quatro dimensões, mas intenta-se adaptá-la para sistemas com dimensões maiores. É possível também modificá-la para aplicações mais específicas, que restrinjam as características dos vetores espaciais.

Devido ao alto custo computacional, a ferramenta não pode ser aplicada em tempo real. Entretanto, é possível utilizar os resultados observados para comparar a eficiência de outras estratégias na escolha adequada de vetores espaciais. Em estudos futuros, diversos aspectos podem ser utilizados para a otimização da ferramenta. É possível que as simetrias presentes nas constelações de vetores espaciais dos sistemas apresentados sejam aproveitadas para uma escolha mais rápida do grupo de vetores. Padrões observados no número de testes realizados para cada instante de tempo também podem ser levados em consideração.

Conclui-se que o trabalho atingiu os seus objetivos e espera-se que o mesmo contribua significativamente para o desenvolvimento e a implementação de estratégias na área de modulação por largura de pulso vetorial.

Referências

- [1] B. Brusso and B. Bose. Power electronics x2014; historical perspective and my experience [history]. *Industry Applications Magazine, IEEE*, 20(2):7–81, March 2014. Citado na página 1.
- [2] T.G. Wilson. The evolution of power electronics. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual*, volume 1, pages 3–9 vol.1, Mar 1999. Citado na página 1.
- [3] B.K. Bose. Power electronics and motor drives recent progress and perspective. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 56(2):581–588, Feb 2009. Citado na página 1.
- [4] J. Bocker and S. Mathapati. State of the art of induction motor control. In *Electric Machines Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International*, volume 2, pages 1459–1464, May 2007. Citado na página 1.
- [5] Zhenyu Yu, A. Mohammed, and I. Panahi. A review of three pwm techniques. In *American Control Conference, 1997. Proceedings of the 1997*, volume 1, pages 257–261 vol.1, Jun 1997. Citado na página 1.
- [6] S.R. Bowes. Novel real-time harmonic minimized pwm control for drives and static power converters. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 9(3):256–262, May 1994. Citado na página 1.
- [7] L. Li, D. Czarkowski, Y. Liu, and P. Pillay. Multilevel selective harmonic elimination pwm technique in series-connected voltage inverters. In *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE*, volume 2, pages 1454–1461 vol.2, Oct 1998. Citado na página 1.
- [8] V.G. Agelidis, A.I. Balouktsis, and Mohamed S.A Dahidah. A five-level symmetrically defined selective harmonic elimination pwm strategy: Analysis and experimental validation. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 23(1):19–26, Jan 2008. Citado na página 1.
- [9] S.R. Bowes. New sinusoidal pulsewidth-modulated inverter. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 122(11):1279–1285, November 1975. Citado na página 1.
- [10] P. Omer, J. Kumar, and B.S. Surjan. Comparison of multicarrier pwm techniques for cascaded h-bridge inverter. In *Electrical, Electronics and Computer Science (SCE-*

- ECS*), *2014 IEEE Students' Conference on*, pages 1–6, March 2014. Citado na página 1.
- [11] Mario J. Duran, F. Barrero, and S. Toral. Multi-phase space vector pulse width modulation: Applications and strategies. In *Int. Conf. Renewable Energies Power Quality, Sevilla, Spain, 2007, paper ID 341*. Citado na página 2.
- [12] C.B. Jacobina, A.M.N. Lima, E.R.C. da Silva, R.N.C. Alves, and P.F. Seixas. Digital scalar pulse-width modulation: a simple approach to introduce nonsinusoidal modulating waveforms. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 16(3):351–359, May 2001. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- [13] Y. Zhao and T.A. Lipo. Space vector pwm control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 31(5):1100–1109, Sep 1995. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- [14] S. Gataric. A polyphase cartesian vector approach to control of polyphase ac machines. In *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, volume 3, pages 1648–1654 vol.3, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- [15] M.J. Duran and E. Levi. Multi-dimensional approach to multi-phase space vector pulse width modulation. In *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, pages 2103–2108, Nov 2006. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- [16] M.J. Duran, F.J. Barrero, S.L. Toral, and E. Levi. Multi-dimensional space vector pulse width modulation scheme for five-phase series-connected two-motor drives. In *Electric Machines Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International*, volume 2, pages 1208–1214, May 2007. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- [17] M.J. Duran, F. Barrero, S. Toral, and E. Levi. Multi-dimensional space vector pulse width modulation for disturbance-free operation of a five-phase ac motor drive. In *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, pages 1–11, Sept 2007. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- [18] Mario J. Duran, Tomas Glasberger, Drazen Dujic, Emil Levi, and Zdenek Peroutka. A modified sector based space vector pwm technique for five-phase drives. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 4(4):453–464, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 4.
- [19] K. Wada and T. Shimizu. Mitigation method of 3rd-harmonic voltage for a three-phase four-wire distribution system based on a series active filter for the neutral conductor. In *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, volume 1, pages 64–69 vol.1, Oct 2002. Citado na página 18.

-
- [20] M. Aredes, J. Hafner, and K. Heumann. Three-phase four-wire shunt active filter control strategies. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 12(2):311–318, Mar 1997. Citado na página 18.
- [21] M.G. Villalva, M.E. de Oliveira Filho, and E.R. Filho. Detailed implementation of a current controller with 3d space vectors for four wire active filters. In *Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on*, volume 1, pages 536–541 Vol.1, Nov 2003. Citado na página 18.
- [22] V.H. Prasad, D. Borojevic, and R. Zhang. Analysis and comparison of space vector modulation schemes for a four-leg voltage source inverter. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC '97 Conference Proceedings 1997., Twelfth Annual*, volume 2, pages 864–871 vol.2, Feb 1997. Citado na página 18.
- [23] J.M. Chang, W.N. Chang, and S.J. Chiang. Multilevel single-phase rectifier inverter with cascaded connection of two three-arm converters. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 153(5):719–725, September 2006. Citado na página 24.
- [24] A.C.N. Maia and C.B. Jacobina. Six-phase machine drive system based on three three-leg converters. In *Power Electronics Conference (COBEP), 2013 Brazilian*, pages 915–920, Oct 2013. Citado na página 24.
- [25] A.C.N. Maia, C.B. Jacobina, and N.B. Freitas. Open-end multi-level six-phase machine drive system with three three-phase dc-link converters. In *Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE*, pages 781–787, Oct 2014. Citado na página 24.