

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

FERNANDO COVOLAN ROSITO

**DESENVOLVIMENTO DA MODULAÇÃO *SPACE VECTOR* PARA UM
INVERSOR TRIFÁSICO MULTINÍVEL HÍBRIDO ASSIMÉTRICO DE NOVE
NÍVEIS POR FASE COM PONTE-H EM CASCATA**

CAXIAS DO SUL

2017

FERNANDO COVOLAN ROSITO

**DESENVOLVIMENTO DA MODULAÇÃO *SPACE VECTOR* PARA UM
INVERSOR TRIFÁSICO MULTINÍVEL HÍBRIDO ASSIMÉTRICO DE NOVE
NÍVEIS POR FASE COM PONTE-H EM CASCATA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Linha de pesquisa: Desempenho e controle de sistemas energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Diorge Alex Bão Zambra

CAXIAS DO SUL

2017

R821d Rosito, Fernando Covolan

DESENVOLVIMENTO DA MODULAÇÃO SPACE VECTOR
PARA UM INVERSOR TRIFÁSICO MULTINÍVEL HÍBRIDO
ASSIMÉTRICO DE NOVE NÍVEIS POR FASE COM PONTE-H EM
CASCATA / Fernando Covolan Rosito. – 2017.

198 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Orientação: Diorge Alex Báó Zambra.

1. Conversor multinível. 2. Modulação. 3. Space vector. I. Zambra,
Diorge Alex Báó, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UCS com os dados
fornecidos pelo(a) autor(a).

Desenvolvimento da modulação *Space Vector* para um inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase com ponte-H em cascata

Fernando Covolan Rosito

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 13 de setembro de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Diorge Alex Bão Zambra (orientador)
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Ivan Jorge Gabe
Instituto Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Júlio Cesar Ceballos Aya
Universidade de Caxias do Sul

Dedico este trabalho a minha família que me apoiou nesta difícil jornada de estudos.

AGRADECIMENTOS

À minha família (Mário, Laura, Maurício, Gêssica e Enzo) que sempre me incentivou a conquistar os meus objetivos com muito estudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Diorge Alex Bão Zambra que realizou um grande trabalho de orientação.

Aos meus amigos e colegas Prof. Dr. Ivan Jorge Gabe, Profa. Ma. Juliana Menegotto e Técnico Bruno Nonemacher que me auxiliaram nos momentos que eu precisei de apoio.

Ao Coordenador do curso, Prof. Dr. Carlos Altafini, que sempre esteve interessado em ajudar e resolver os problemas durante o curso.

Aos professores do Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da UCS que me ensinaram nesse período de estudos na Universidade.

“O importante não é vencer todos os dias, mas lutar sempre.”

(Waldemar Valle Martins)

RESUMO

Esta dissertação de mestrado propõe desenvolver a modulação vetorial (*space vector – SV*) para um inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase com ponte-H em cascata (*cascaded H-bridge – CHB*). A verificação do desempenho ocorre através de simulações em software de simulação matemática, e posterior comparações entre duas simulações realizadas, como também a comparação da simulação de melhor desempenho com simulações obtidas com a modulação por síntese de formas de onda quase-quadradas e a modulação híbrida. Para tanto, inicialmente são revisadas as topologias de inversores de frequência mais tradicionais na literatura, identificando as suas características para justificar a escolha da topologia híbrida assimétrica. Posteriormente são revisados os métodos de modulação para inversores de frequência, identificando na modulação vetorial vantagens para sintetização das tensões de linha. Após, são relacionados trabalhos envolvendo a modulação *space vector* aplicada em inversores multiníveis. Em seguida, a modulação *SV* é desenvolvida para o inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase com ponte-H em cascata, sendo realizadas as seguintes etapas: definição dos possíveis vetores de comutação (estados de chaveamento) do inversor proposto no espaço tridimensional e no plano α - β ; identificação dos planos limites e dos planos de separação dos setores no plano α - β ; obtenção das matrizes de decomposição e; definição da sequência de comutação. Os resultados, obtidos por meio de software de simulação matemática, dos gráficos das tensões de fase e tensões de linha, assim como os valores de distorção harmônica total (*total harmonic distortion – THD*), fator de distorção de primeira ordem (*first order distortion factor – DFI*), tensão de modo comum, espectro harmônico dos sinais das tensões (de fase e de linha) são analisados, sendo os índices de *THD*, *DFI* e tensão de modo comum comparados entre duas sequências de comutação diferentes para o inversor proposto. Também, os valores desses índices são comparados com outras técnicas de modulação (modulação por síntese de formas de onda quase-quadradas (QQ) e a modulação híbrida). O desenvolvimento e os resultados das simulações da modulação *SV* na topologia híbrida assimétrica de nove níveis proposta, assim como as análises das comparações, apontam resultados satisfatórios, identificando um potencial grandioso da modulação *SV* desenvolvida.

Palavras-chave: Conversor multinível. Modulação. *Space vector*.

ABSTRACT

This dissertation proposes to develop the space vector (SV) modulation for a three phase hybrid asymmetric multilevel inverter of nine levels per phase with cascaded H-bridge (CHB). Performance verification occurs through software simulations, and subsequent comparisons between two simulations performed, as well as the comparison of the best performance simulation with simulations obtained with the step wave modulation and hybrid modulation. To do this, the topologies of more traditional frequency inverters are reviewed in the literature, identifying their characteristics to justify the choice of hybrid asymmetric topology. Subsequently, the modulation methods for frequency inverters are reviewed, identifying the advantages of vector modulation for the synthesis of line voltages. Afterwards, works involving the space vector modulation applied in multilevel inverters are related. Then, the SV modulation is developed for a three phase hybrid asymmetric multilevel inverter of nine levels per phase with cascaded H-bridge (CHB). The following steps are performed: definition of the possible switching vectors (switching states) of the proposed inverter in three-dimensional space and in the plane α - β ; identification of boundary planes and separation plans of sectors in the α - β plane; obtaining the decomposition matrices e ; definition of the switching sequence. The results, obtained through mathematical simulation software, of the phase voltages and line voltages graphs, as well as the values of total harmonic distortion (THD), first order distortion factor (DF1), common mode voltage, harmonic spectrum of the voltage signals (phase and line) are analyzed, with THD, DF1 and common mode voltage indices being compared between two different switching sequences for the proposed inverter. In addition, the values of these indices are compared with other modulation techniques (step wave modulation and hybrid modulation). The development and results of the SV modulation simulations in the nine-level hybrid asymmetric topology proposed, as well as the comparative analyzes, indicate satisfactory results, identifying a great potential for SV modulation developed.

Keywords: Multilevel converter. Modulation. Space Vector.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Detalhes das três partes do conversor	20
Figura 2 - Sinal obtido na saída do inversor multinível	22
Figura 3 - Fase de um conversor <i>NPC</i> de três níveis.....	28
Figura 4 - Tensão de fase e acionamento das chaves semicondutoras	28
Figura 5 - Gráfico da tensão de fase V_{an} similar a uma onda senoidal.....	29
Figura 6 - Conversor <i>NPC</i> de cinco níveis	30
Figura 7 - Fase de um conversor capacitor flutuante de três níveis	31
Figura 8 - Fase de um conversor capacitor flutuante de cinco níveis.....	31
Figura 9 - Célula ponte-H.....	33
Figura 10 - Uma fase do conversor em cascata de nove níveis simétrico	34
Figura 11 - Fase de um conversor nove níveis com módulos híbridos simétricos	35
Figura 12 - Fase de um conversor multinível com módulos híbridos assimétricos	36
Figura 13 - Níveis de tensão do conversor multinível com módulos híbridos assimétricos	36
Figura 14 - (a) Comparação dos sinais da portadora e moduladora (b) Pulsos <i>PWM</i> (MLP) oriundos da comparação do sinal de referência e da portadora.....	39
Figura 15 - Tensão de uma célula Ponte-H resultante da comparação da onda senoidal de referência com o sinal da portadora triangular	40
Figura 16 - Projeção no espaço dos oito vetores de chaveamento de um inversor de dois níveis	41
Figura 17 - Destaque dos vértices que serão alinhados ao girar o cubo	42
Figura 18 - Alinhamento dos vértices do cubo no espaço formando um hexágono.....	42
Figura 19 - Os três vetores mais próximos ao vetor V_{ref} dentro do hexágono	43
Figura 20 - Diagrama de blocos de um inversor utilizando a modulação <i>SV</i>	44
Figura 21 - Simplificação de um diagrama vetorial de três níveis em um diagrama de dois níveis para eliminação da tensão de modo comum	47
Figura 22 - Fase de um inversor simétrico de três níveis por fase	50
Figura 23 - Fase de um inversor simétrico de cinco níveis por fase	52
Figura 24 - Fase de um inversor simétrico de sete níveis por fase.....	52
Figura 25 - Inversor trifásico multinível híbrido assimétrico proposto de nove níveis por fase	53
Figura 26 - Sinal de saída de tensão de uma fase do inversor assimétrico de nove níveis.....	56

Figura 27 - 729 combinações de chaveamento das três fases do inversor assimétrico projetadas em um espaço “abc” formando um cubo	85
Figura 28 - Rotacionando as 729 combinações de chaveamento das três fases do inversor assimétrico projetadas em um espaço “abc” gerando um hexágono (a) vista 1; (b) vista 2	85
Figura 29 - 729 vetores de comutação de chaveamento das três fases do inversor assimétrico projetados em um plano α - β	92
Figura 30 - Identificação dos 217 pontos no plano α - β	92
Figura 31 - Representação dos planos limites (PL) de hexágono do inversor assimétrico de nove níveis	96
Figura 32 - Todos os planos de separação (PS) e planos limites (PL) do hexágono	98
Figura 33 - Plano de separação 1 (PS1) em destaque	99
Figura 34 - Identificação dos setores do hexágono (plano α - β)	101
Figura 35 - Destaque das grandes regiões do hexágono (plano α - β)	102
Figura 36 - Diagrama de blocos sobre a rotina de busca do setor em que o vetor V_{ref} se localiza	104
Figura 37 - Destaque do setor 70 no hexágono (plano α - β)	104
Figura 38 - Fluxograma da parte I e II do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono	105
Figura 39 - Destaque da região A e do setor 70 do hexágono (plano α - β) - parte I e II do algoritmo	105
Figura 40 - Fluxograma da parte III do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono	106
Figura 41 - O setor 70 do hexágono (plano α - β) está entre os planos PS33 e PS34 - parte III do algoritmo	107
Figura 42 - Fluxograma da parte IV do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono	107
Figura 43 - O setor 70 do hexágono (plano α - β) está entre os planos PS16 e PS17 - parte IV do algoritmo	108
Figura 44 - Localização do setor 70 do hexágono (plano α - β) abaixo do plano PS6 - parte V do algoritmo	108
Figura 45 - Fluxograma da parte V do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono	108
Figura 46 - Identificação dos três pontos do setor 1 no plano α - β	111
Figura 47 - Rampa utilizada para comparar os sinais de tensão de fase do inversor de nove níveis híbrido assimétrico	126
Figura 48 - Setor 85 localizado no hexágono	128

Figura 49 - Níveis de tensão de fase no setor 85	128
Figura 50 - Setores em que o vetor de referência percorre com “ m_a ” variando – primeira simulação	132
Figura 51 - Tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” variando – primeira simulação	132
Figura 52 - Setores em que o vetor de referência percorre com: (a) “ m_a ” = 0,7; (b) “ m_a ” = 1 – segunda e terceira simulações, respectivamente.....	133
Figura 53 - Tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com: (a) “ m_a ” = 0,7; (b) “ m_a ” = 1 – segunda e terceira simulações, respectivamente	133
Figura 54 - Tensões de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com: (a) “ m_a ” = 0,7; (b) “ m_a ” = 1 – segunda e terceira simulações, respectivamente	134
Figura 55 - Destaque do sinal V_{an} no nível +4 – terceira simulação	136
Figura 56 - Zoom na região em que houve o nivelamento indesejado do sinal V_{an} em +4 – terceira simulação	137
Figura 57 - Primeiro setor encontrado (setor 38) entre os valores 0,001583 a 0,007205 – terceira simulação	137
Figura 58 - Resultado de V_{an} com as mudanças de chaveamento de nove setores, eliminando o nivelamento em +4 – quarta simulação	138
Figura 59 - Resultados de V_{an} , V_{bn} e V_{cn} com três ciclos, indicando as regiões em que devem ser melhoradas – quarta simulação	139
Figura 60 - Tensões de fase V_{an} , V_{bn} e V_{cn} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação	146
Figura 61 - Tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação	146
Figura 62 - Espectros harmônicos das tensões de fase do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 e com a primeira harmônica – quinta simulação	147
Figura 63 - Espectros harmônicos das tensões de linha do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 e com a primeira harmônica – quinta simulação	148
Figura 64 - Zoom do espectro harmônico da tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação	148
Figura 65 - Zoom do espectro harmônico da tensão de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação	148
Figura 66 - Espectros harmônicos das tensões de linha do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 e sem a primeira harmônica – quinta simulação	149

Figura 67 - Espectros harmônicos das tensões de linha do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ”= 1 e sem a primeira harmônica – quinta simulação	149
Figura 68 - Destaque no valor de pico da tensão de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação	150
Figura 69 - Setores em que o vetor de referência percorre com $V_{cc} = 735$ V e “ m_a ” = 1 – sexta simulação	151
Figura 70 - Destaque no valor de pico da tensão de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com $V_{cc} = 735$ V e “ m_a ” = 1 – sexta simulação	151
Figura 71 - Espectros harmônicos das tensões de fase do inversor de nove níveis proposto com $V_{cc} = 735$ V e “ m_a ” = 1 – sexta simulação	151
Figura 72 - Zoom do espectro harmônico da tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com $V_{cc} = 735$ V e “ m_a ” = 1 – sexta simulação	152
Figura 73 - Inversor de dois níveis trifásico a três fios	166
Figura 74 - Combinações de chaveamento de um inversor dois níveis	167
Figura 75 - Combinações dos oito vetores de chaveamento do inversor de dois níveis trifásico em coordenadas “abc”	170
Figura 76 - Projeção dos oito vetores de chaveamento do inversor dois níveis no plano α - β	175
Figura 77 - Planos limites (PL) do inversor de dois níveis	176
Figura 78 - Identificação dos dois pontos no plano de separação (PS1)	177
Figura 79 - PS1 para o inversor de dois níveis	178
Figura 80 - Planos de separação (PS) do inversor de dois níveis	178
Figura 81 - Vetor V_{ref} no setor A do inversor trifásico de dois níveis	179
Figura 82 - Zoom da tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 indicando o nivelamento do sinal em +4 no tempo igual a 0,001984	183
Figura 83 - Zoom do gráfico de identificação dos setores destacando o setor 48 do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 no tempo igual a 0,001984	183
Figura 84 - Zoom do gráfico V_{an} indicando alteração de nível no tempo próximo a 0,001984	185
Figura 85 - (a) Circuito trifásico simétrico; (b) Circuito bifásico simétrico	196
Figura 86 - Vetores F_α e F_β em função de F_a , F_b e F_c	196
Figura 87 - Decomposição do vetor F_α em função de F_a , F_b e F_c	197
Figura 88 - Decomposição do vetor F_β em função de F_a , F_b e F_c	198

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Acionamento das chaves semicondutoras para o conversor <i>NPC</i> de cinco níveis..	30
Tabela 2 - Ligação das chaves semicondutoras de um conversor capacitor flutuante de cinco níveis.....	32
Tabela 3 - Acionamento das chaves semicondutoras de uma célula ponte-H.....	33
Tabela 4 - Estados de chaveamento de uma célula ponte-H e tensão de fase de um inversor simétrico de três níveis	51
Tabela 5 - Reorganização da tabela dos estados de chaveamento de uma célula ponte-H e tensão de fase de um inversor simétrico de três níveis.....	51
Tabela 6 - Estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis organizados em função de V_{an}	54
Tabela 7 - Primeira redução dos estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis	58
Tabela 8 - Segunda redução dos estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis	60
Tabela 9 - Última redução dos estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis	61
Tabela 10 - Todos os 729 estados de chaveamento das três fases, tensão de fase e tensão de linha de um inversor assimétrico de nove níveis.....	62
Tabela 11 - Todos os 729 estados de chaveamento das três fases do inversor assimétrico de nove níveis em coordenadas α - β	88
Tabela 12 - Identificação dos 217 pontos e seus respectivos vetores no plano α - β	93
Tabela 13 - Planos limites (PL) do inversor assimétrico trifásico de nove níveis.....	98
Tabela 14 - Planos de separação (PS) do inversor assimétrico trifásico de nove níveis	100
Tabela 15 - Identificação dos três pontos de cada um dos 384 setores no plano α - β	109
Tabela 16 - Seleção dos três vetores de cada um dos pontos dos 384 setores no plano α - β ..	112
Tabela 17 - Sequência de chaveamento aleatória dos 384 setores	118
Tabela 18 - Sequência de comutação aleatória e os níveis de tensão das fases de cada vetor de comutação dos 384 setores	121
Tabela 19 - Dados utilizados no programa para simulações com " m_a " = 1	130
Tabela 20 - Valores de <i>THD</i> , <i>DFI</i> e do tensão no modo comum inversor de nove níveis proposto com " m_a " = 1 – terceira simulação	135
Tabela 21 - Vetores que foram substituídos para alterar a sequência de comutação do setor	138

Tabela 22 - Nova sequência de comutação e os níveis de tensão das fases de cada vetor de comutação dos 384 setores	141
Tabela 23 - Valores de <i>THD</i> , <i>DFI</i> e do tensão no modo comum inversor de nove níveis proposto com “ma” = 1 – quinta simulação	147
Tabela 24 - Comparação entre os valores de <i>THD</i> e <i>DFI</i> entre a modulação <i>SV</i> , híbrida e quase quadrada para um inversor de nove níveis híbrido assimétrico	154
Tabela 25 - Comparação entre os valores de tensão de modo comum entre a modulação <i>SV</i> , híbrida e quase quadrada para um inversor de nove níveis híbrido assimétrico	154
Tabela 26 - Estados de chaveamento de uma fase do inversor de dois níveis	166
Tabela 27 - Estados de chaveamento de um inversor de dois níveis trifásico.....	167
Tabela 28 - Estados de chaveamento e tensões V_{a0} , V_{b0} e V_{c0} de um inversor de dois níveis trifásico	169
Tabela 29 - Estados de chaveamento e tensões de fase-neutro e fase-fase de um inversor de dois níveis trifásico.....	169
Tabela 30 - Coordenadas dos vetores no plano α - β	174
Tabela 31 - Planos limites (PL) do inversor trifásico de dois níveis.....	176
Tabela 32 - Planos de separação (PS) para um inversor de dois níveis.....	178
Tabela 33- Dados do setor 48 sem alteração do vetor de comutação.....	184
Tabela 34 - Dados do setor 48 com alteração do vetor de comutação	184
Tabela 35 - Lista os 217 pontos do hexágono e todos os vetores redundantes em cada ponto, além de mostrar o nível de tensão de cada vetor em cada uma das fases.....	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_m	matriz quadrada com determinante diferente de zero
A_m^{-1}	matriz inversa de A_m
A_n	matriz qualquer
A, B, C, D, E, F	regiões do diagrama hexagonal α - β
$a_1, a_2, \dots, q_1, q_2, \dots$	pontos (vetores) do diagrama hexagonal α - β
abc	eixos do sistema tridimensional
<i>ANPC</i>	<i>active neutral point clamped</i>
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
Comp ₁ , Comp ₂ , Comp ₃	comparadores
<i>CHB</i>	<i>cascaded H-bridge</i>
<i>DFI</i>	<i>first order distortion factor</i>
<i>DSP</i>	<i>digital signal process</i>
<i>EMI</i>	<i>electromagnetic interference</i>
ESH	eliminação seletiva de harmônicas
F_a, F_b, F_c	forças magnetomotrizes de uma máq. de indução simétrica trifásica
F_α, F_β	forças magnetomotrizes de uma máq. de indução simétrica bifásica
<i>FC</i>	<i>flying capacitors</i>
<i>GTO</i>	<i>gate turn-off thyristor</i>
h	corresponde a componente harmônica
H	número de células ponte-H por fase
<i>H-bridge</i>	inversor monofásico em ponte completa
I	matriz identidade
<i>IGBT</i>	<i>insulated gate bipolar transistor</i>
m_a	índice de modulação
MLP	modulação por largura de pulso
M	matriz de decomposição
M_A	matriz de decomposição (M) do setor A
M_s	matriz com vetores que compõem a nova base sem normalização
M_c	matriz com vetores que compõem a nova base com normalização
n	ponto neutro
N	representação de tensão negativa de uma célula ponte-H
<i>NPC</i>	<i>neutral point clamped</i>

<i>NSTV</i>	<i>new selected three vectors</i>
<i>NTV</i>	<i>nearest three vectors</i>
o	referência do barramento CC do inversor
O, O1, O2	representação de tensão nula de uma célula ponte-H
P	representação de tensão positiva de uma célula ponte-H
PL	plano limite
PS	plano de separação
<i>PWM</i>	<i>pulse width modulation</i>
<i>SPWM</i>	<i>carrier-based sinusoidal PWM</i>
<i>SV</i>	<i>space vector</i>
<i>SVM</i>	<i>space vector modulation</i>
<i>SVPWM</i>	<i>space vector pulse width modulation</i>
T	período
$T_{\alpha\beta} = M_c^T$	matriz transformação de mudança de base
<i>THD</i>	<i>total harmonic distortion</i>
T_{per}	número de pontos de amostragem por período
<i>UPS</i>	<i>uninterruptible power supply</i>
V0, V1, V2, ...	vetores de comutação
V_a, V_b, V_c	tensões de entrada no sistema de transformação para V_α, V_β
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	tensões de linha do inversor
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	tensões de fase do inversor em relação ao ponto "n"
V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	tensões do inversor em relação ao ponto "o"
$V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}, V_{C4}$	tensões de saída da célula ponte-H
V_{cc}	Tensão base do barramento CC
V_{ef1}	tensão do valor eficaz da parcela da fundamental
V_{Frms}	valor rms da tensão de fase
V_{Lrms}	valor rms da tensão de linha
V_{Fpico}	valor de pico da tensão de fase
V_{Lpico}	valor de pico da tensão de linha
V_{no}	tensão no modo comum
V_h	tensão do valor eficaz do conteúdo harmônico
V_{ref}	vetor de referência da modulação <i>space vector</i>
$V_{ref\alpha}, V_{ref\beta}$	coordenadas do vetor V_{ref} no plano α, β
V_α, V_β	coordenadas dos vetores de comutação no plano α, β
w	número de níveis por fase de um inversor

X_α, X_β	vetores da base do plano α, β
$\widehat{X}_\alpha, \widehat{X}_\beta$	vetores normalizados
$x'_\alpha, x'_\beta, y'_\alpha, y'_\beta,$	componentes dos vetores X_α e X_β da base do plano
$z'_\alpha, z'_\beta,$	
α, β	eixos do sistema bidimensional
$\Delta t_0, \Delta t_1, \Delta t_2$	tempos de comutação dos vetores

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	20
1.2. OBJETIVO GERAL	24
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	26
2.1.1. <i>Conversores com ponto neutro grampeado (neutral point clamped converters – NPC)</i>	<i>27</i>
2.1.2. <i>Conversores com capacitores flutuantes (flying capacitors converters – FC).....</i>	<i>30</i>
2.1.3. <i>Conversores com ponte-H em cascata (cascaded H-bridge converters – CHB)</i>	<i>33</i>
2.1.4. <i>Conversor multinível com módulos híbridos simétricos.....</i>	<i>35</i>
2.1.5. <i>Conversor multinível com módulos híbridos assimétricos</i>	<i>36</i>
2.2. MODULAÇÃO	37
2.2.1. <i>Modulação por eliminação seletiva de harmônicas (ESH):.....</i>	<i>38</i>
2.2.2. <i>Modulação baseada em portadora (carrier based sinusoidal PWM - SPWM):</i>	<i>39</i>
2.2.3. <i>Modulação vetorial ou space vector (SV):</i>	<i>40</i>
2.3. REVISÃO SOBRE MODULAÇÃO SPACE VECTOR APLICADA A INVERSORES MULTINÍVEIS	45
3. DESENVOLVIMENTO DA MODULAÇÃO SPACE VECTOR (SV) NA TOPOLOGIA PROPOSTA	50
3.1. DEFINIÇÃO DOS ESTADOS DE CHAVEAMENTO DAS TRÊS FASES DO INVERSOR ASSIMÉTRICO (ESPAÇO TRIIMENSIONAL) DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO.....	57
3.2. DEFINIÇÃO DOS POSSÍVEIS VETORES DE COMUTAÇÃO NO PLANO A-B DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO	86
3.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS LIMITES (PL) DO HEXÁGONO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO.....	96
3.4. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS SEPARAÇÃO (PS) DO HEXÁGONO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO	98
3.4.1. <i>Lógica de busca do vetor de referência (V_{ref})</i>	<i>101</i>
3.5. OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE DECOMPOSIÇÃO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO	109
3.6. DEFINIÇÃO DA SEQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO	117
3.7. SIMULAÇÕES	129
3.7.1. <i>Dados utilizados nas simulações com “m_a” = 1</i>	<i>129</i>

3.7.2. Resultados das simulações	131
3.7.2.1. Primeira simulação – índice de modulação variando no tempo.....	131
3.7.2.2. Segunda e terceira simulação – índice de modulação = 0,7 e 1	132
3.7.2.3. Quarta simulação – índice de modulação = 1 – substituição de vetores.....	135
3.7.2.3.1. Método de análise para substituição de vetores na sequência de comutação – índice de modulação = 1	136
3.7.2.4. Quinta simulação – índice de modulação = 1 e com nova sequência de vetores de comutação	138
3.7.2.5. Sexta simulação – índice de modulação = 1 e com $V_{cc} = 735 V$	150
3.8. COMPARAÇÃO DOS VALORES DE THD, DF1 E TENSÃO DE MODO COMUM DA TERCEIRA E DA QUINTA SIMULAÇÃO	152
3.9. COMPARAÇÃO ENTRE A MODULAÇÃO SV NO INVERSOR PROPOSTO COM OUTRAS MODULAÇÕES	153
4. CONCLUSÃO	156
4.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	157
REFERENCIAS	159
APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DA MODULAÇÃO SPACE VECTOR (SV) EM UM INVERSOR DE DOIS NÍVEIS	165
A.1. DEFINIÇÃO DOS POSSÍVEIS VETORES DE COMUTAÇÃO (ESTADOS DE CHAVEAMENTO) DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS NO ESPAÇO TRIDIMENSIONAL	165
A.2. DEFINIÇÃO DOS POSSÍVEIS VETORES DE COMUTAÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS NO ESPAÇO BIDIMENSIONAL	170
A.2.1 Obtenção da matriz de transformação.....	170
A.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS LIMITES DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS	175
A.4. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS DE SEPARAÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS	177
A.5. OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE DECOMPOSIÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS	179
A.6. DEFINIÇÃO DA SEQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS	182
APÊNDICE B – IDENTIFICAÇÃO DO SETOR E SUBSTITUIÇÃO DA SEQUÊNCIA DOS VETORES DO SETOR.....	183
APÊNDICE C – TABELA QUE IDENTIFICA QUAIS VETORES PODEM SER UTILIZADOS EM CADA PONTO NO PLANO A-B.....	186
APÊNDICE D – DEDUÇÃO DA FORMAÇÃO DA BASE A-B	196

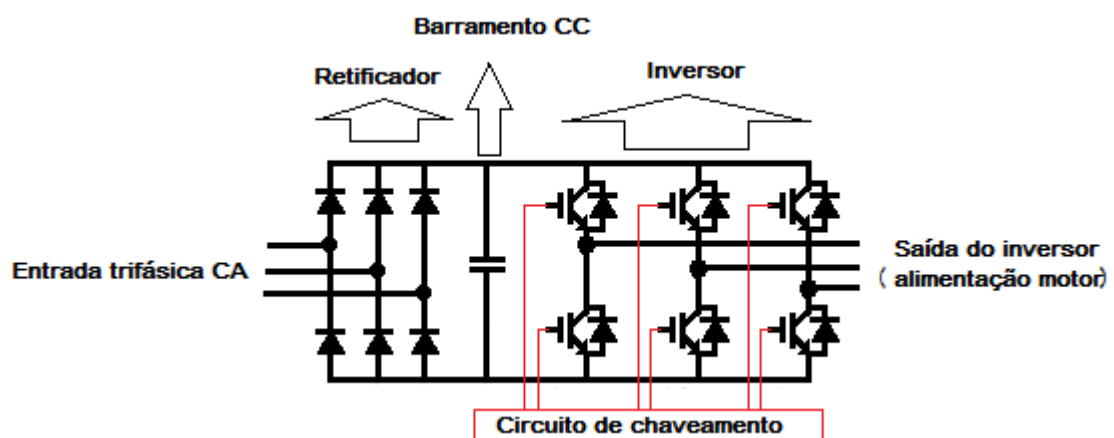
1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é abordada a caracterização do problema, onde são apontadas as singularidades e o cenário dos inversores de frequência. Após, são elencados os objetivos (geral e específicos) deste trabalho. Por fim, há um subcapítulo que apresenta a estrutura desta dissertação.

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os conversores de frequência comerciais utilizados para o controle de velocidade de motores de indução trifásicos, popularmente conhecidos como inversores de frequência, são equipamentos elétricos divididos em três partes: retificação, barramento CC e inversão (Figura 1). O retificador é responsável por converter um sinal de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), o barramento CC tem a função de minimizar a ondulação da tensão ou da corrente proveniente do retificador, enquanto que o inversor tem a função de converter o sinal CC novamente em CA, com amplitude e frequência fixa ou variável, utilizada para energizar (alimentar) a carga, um motor, por exemplo (KHARJULE, 2015; PETRUZELLA, 2013). Na região do inversor, há diferentes estruturas/configurações dos semicondutores, assim como há diversos modos de realizar o acionamento dos mesmos através do circuito de chaveamento. Portanto, existem inúmeras topologias e estratégias de modulação para os inversores de frequência, e não há uma estratégia específica para cada topologia, ou seja, uma determinada técnica de modulação pode ser empregada em diversas topologias de inversores.

Figura 1 - Detalhes das três partes do conversor



Fonte: Adaptado de FILIPPO (2013).

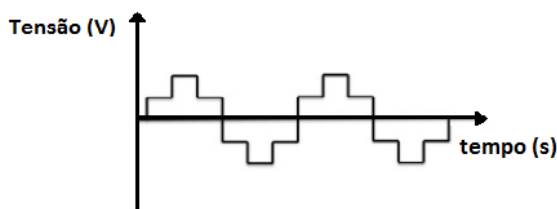
Os inversores podem ser alimentados por fonte de tensão ou por fonte de corrente. Um inversor é alimentado por fonte de tensão quando o barramento CC é formado por capacitores, e é alimentado por fonte de corrente quando o barramento CC é formado por indutores (ALVES, 2016; ROLIM, 2015). A saída CA pode ser monofásica ou trifásica (KHARJULE, 2015), e esses inversores são utilizados para o controle de velocidade de máquinas CA, em sistemas ininterruptos de energia (*uninterruptible power supply – UPS – no-break* para sistemas de grande porte) e sistemas de geração de energia a partir de fontes alternativas (NGUYEN; TUONG, 2016).

Aparelhos eletroeletrônicos, em sua maior parte, são compostos por dispositivos como: fontes chaveadas, retificadores e inversores, que ocasionam distúrbios nas formas de onda da tensão e/ou da corrente que consomem, aumentando a distorção harmônica e difundindo o problema da qualidade para toda a instalação. Estes dispositivos são chamados de cargas não-lineares, e o aumento destes equipamentos pode causar redução na qualidade da energia, fator que contribui para o aumento nas perdas de potência em sistemas de transmissão e distribuição de energia (PINTO et al., 2012; NETO et al., 2010).

Na área Elétrica, uma das formas de melhorar o rendimento de uma instalação ou equipamento consiste em elevar os níveis de diferença de potencial, de forma a reduzir os níveis de corrente quando se trabalha com uma potência constante (ZAMBRA, 2010). Com isto, as perdas Ôhmicas são minimizadas, uma vez que elas são obtidas pelo produto da resistência do elemento com a corrente elétrica que o atravessa elevada ao quadrado (COPEL, 2005). Dentro deste contexto, destacam-se os motores de indução, que são alimentados convencionalmente em média tensão (2,3 kV a 13,8 kV) quando apresentam potência igual ou superior a 450 kW (WEG, 2015). Para estes níveis de tensão, os semicondutores utilizados para implementação dos inversores tornam-se restritivos, porque possuem limitação quanto à diferença de potencial a qual podem ser submetidos, bem como a corrente elétrica que podem conduzir (CARROLL; KLAKA; LINDER, 1997). Uma maneira de contornar a restrição imposta pelas características dos semicondutores é através dos inversores multiníveis, que permitem a utilização de potência e níveis de tensão superiores (SILVA, 2008). Isto pode ser alcançado através da geração de forma de onda da tensão com aspecto de “escada”, ou seja, em degraus (conforme Figura 2), utilizando-se semicondutores conectados em série e grampeados por fontes de tensão CC inferiores, tais como capacitores, baterias ou fontes de tensão obtidas a partir de energia renováveis (HEMALATHA; KUMAR CHINNAIYAN, 2014). Estes inversores possuem mais passos de tensão conforme se aumenta o número de

níveis. Este processo de aumentar o número de níveis da tensão faz com que o sinal de saída destes inversores assemelhe-se a uma onda senoidal pura (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Figura 2 - Sinal obtido na saída do inversor multinível



Como já mencionado, existem diversas topologias (estruturas/configurações dos semicondutores) de inversores de frequência, e algumas destas são: conversor convencional (dois níveis), conversores multiníveis com ponto neutro grampeado (*neutral point clamped converters - NPC*), com capacitores flutuantes (*flying capacitors converters - FC*), com ponte-H em cascata (*cascaded H-bridge converters - CHB*), com módulos híbridos, entre outros (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016). Entre estas topologias destaca-se o inversor multiníveis híbrido assimétrico, que possui como uma das principais vantagens atingir o mesmo número de níveis de saída que um inversor simétrico, porém, utilizando menos células de chaveamento (redução de componentes), o que acarreta em uma diminuição da estrutura e do custo (COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016). Também, por ter uma estrutura híbrida, esta topologia permite que sejam utilizados diferentes tipos de modulações para cada célula ponte-H, e/ou permite a aplicação de diferentes tecnologias de dispositivos semicondutores em cada célula ponte-H. O inversor multiníveis híbrido assimétrico não é comercializado por nenhum fabricante de inversores de frequência multinível (ZAMBRA, 2010).

A forma como geram-se os sinais de comando para os dispositivos semicondutores dos inversores é chamada de técnica de modulação, sendo a modulação por largura de pulso (MLP) ou *pulse width modulation (PWM)* a mais empregada (JOSHI; SHETH, 2015; KHARJULE, 2015). Com a técnica *PWM* é possível reduzir a distorção harmônica do sinal de saída do inversor, aumentar a amplitude da tensão de saída, aumentar o rendimento do inversor, e também é possível desenvolver diferentes estratégias de modulação para todas as topologias de inversores de frequência (BIABANI; ALI, 2016; SILVA, 2008). Algumas estratégias de modulação *PWM* mais tradicionais são: senoidal, eliminação seletiva de harmônicas (ESH) (*selected harmonic elimination PWM*) e modulação vetorial (também conhecida como *space vector - SV*) (BIABANI; ALI, 2016).

As estratégias de modulação visam minimizar as perdas de potência nas chaves semicondutoras e o conteúdo harmônico no sinal de saída. A modulação tipo *space vector* pode ser implementada para vários tipos de topologias, e em comparação com a modulação baseada em portadora triangular, tem um melhor desempenho com relação a eliminação de harmônicas (CARNIELUTTI, 2012), além de permitir flexibilidade para otimização das formas de chaveamento (CASTRO; CORRÊA, 2012). Desta forma, é a técnica estudada neste trabalho.

O percentual de distorção harmônica total (*THD*) é um indicativo da qualidade da onda de saída do inversor de frequência (KHARJULE, 2015). A *THD* na tensão de um inversor multinível pode ser minimizada através do aumento do número de níveis na tensão de saída do conversor. A estratégia de modulação influencia na geração dos níveis do inversor e nas perdas de energia, uma vez que esta atua nos aspectos de controle dos inversores multiníveis. Portanto, a estratégia a ser utilizada é um fator importante no estudo dos conversores (KANG et al., 2005; KANG et al., 2004).

A técnica de modulação vetorial (*space vector – SV*) exige processadores de alto desempenho e oferece flexibilidade para otimização das formas de onda de chaveamento, sendo aplicada desde inversores de dois níveis até inversores multiníveis. A modulação vetorial para os inversores multiníveis é mais complexa, visto que estes possuem uma estrutura mais elaborada do que os inversores de dois níveis (BIABANI; ALI, 2016; PEREIRA, 2007). Uma das desvantagens está relacionada ao gerenciamento de todos os estados de chaveamento possíveis, já que quanto maior o número de níveis, mais difícil se torna gerenciar estes estados, devido o aumento da complexidade do hardware e do software necessários (SAEEDIFARD et al., 2007).

Os inversores multiníveis são empregados para efetuar o acionamento de motores de média tensão de elevada potência, convencionalmente de centenas de Quilowatts até Megawatts. Nesta faixa de potência, o rendimento do sistema e a qualidade da energia entregue a carga são características imprescindíveis. Desta forma, justifica-se a utilização da modulação *space vector* para inversores híbridos assimétricos, posto que esta oferece diversos graus de liberdade e possui vetores redundantes, permitindo mais combinações de chaveamento para um mesmo nível. Assim, é possível alcançar as características associadas a este tipo de sistema. Também, através de pesquisas bibliográficas realizadas, constatou-se que

a modulação *SV* não foi desenvolvida, até o momento, em um inversor multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase.

1.2. OBJETIVO GERAL

Desenvolver, simular e analisar a modulação *space vector* aplicada ao inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase com ponte-H em cascata.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Revisar a bibliografia sobre as topologias de inversores de frequência, as estratégias convencionais de modulação de inversores multiníveis e sobre a modulação *space vector* (*SV*) aplicada a inversores multiníveis;
- b) Desenvolver a modulação *SV* para o inversor proposto;
- c) Simular a modulação *space vector* para o inversor proposto;
- d) Obter resultados de simulação para diferentes sequências de chaveamento;
- e) Comparar os resultados de simulação da modulação *SV* entre duas sequências de chaveamento distintas;
- f) Comparar os resultados otimizados da modulação *SV* desenvolvida com outras modulações.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos. A introdução foi o primeiro, o qual apresenta uma caracterização de todos os assuntos que são abordados no trabalho, como a estrutura de um conversor de frequência e características sobre modulação relevantes para o trabalho. Também salienta o objetivo geral e os objetivos específicos. Neste subtópico, está apresentada a estrutura desta dissertação.

O segundo capítulo contempla o referencial teórico, onde estão descritos os tipos mais comuns na literatura de conversores de frequência e suas características; assim como os alguns processos de modulação para os inversores e a relação de trabalhos existentes que abordam a modulação *space vector* em conversores multiníveis.

No terceiro capítulo está relatado o desenvolvimento da modulação *space vector* para o inversor de nove níveis proposto. Além de descrever a metodologia, também estão apresentados os resultados obtidos das simulações realizadas. Esse capítulo três contempla as

análises das comparações entre duas simulações da modulação *SV*, e a comparação de uma simulação *SV*, de melhor resultado, com outras duas modulações de inversores de frequência.

Por fim, o quarto capítulo apresenta as conclusões obtidas nesta dissertação, bem como, propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos dois primeiros subcapítulos estão apresentadas as principais topologias de inversores multiníveis e os métodos de modulação para os conversores de frequência. Estes subtópicos são importantes para conhecer as características de cada topologia e as estratégias de modulação que podem ser empregadas em inversores multiníveis. Desta forma, pode-se verificar as vantagens e desvantagens que a topologia híbrida assimétrica tem em relação as demais, assim como os benefícios da modulação *space vector*. Em seguida estão apresentados os trabalhos existentes na literatura a respeito da modulação *space vector* (SV) aplicada à inversores multiníveis.

2.1. CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

As topologias de conversores multiníveis estão sendo estudadas devido ao seu bom desempenho em aplicações de média tensão e alta potência (COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016). Entre os seus diferenciais pode-se destacar: a diminuição dos esforços de tensão sobre os semicondutores; menor taxa de distorção harmônica nas tensões de saída e maior rendimento (NGUYEN; TUONG, 2016; WANG et al, 2016; MAHESHWARI et al., 2016; ANUJA; ANANTH; MARY, 2016).

Anteriormente aos conversores multiníveis, foram desenvolvidos conversores de dois níveis que produziam tensão de saída de zero a V_{cc} , ou de $+V_{cc}$ a $-V_{cc}$. Um dos problemas nesses conversores é que para garantir um sinal de qualidade, existe a necessidade de comutação em alta frequência, e isto acarreta elevadas perdas de comutação e restrições na seleção de dispositivos semicondutores. Já nos conversores multiníveis esta limitação pode ser superada (RAO; KUMAR; BABU, 2013).

Segundo Hyun; Hong; Won (2016); Rushiraj; Kapil (2016) e Beigi et al. (2012), em comparação com inversores de dois níveis, a característica da onda de saída de um inversor multinível apresenta uma baixa distorção harmônica total (THD) e maiores tensões nominais, sendo mais apropriados para aplicações de alta potência.

Em geral, os conversores multiníveis são classificados em três estruturas básicas: (RATHOR, 2016; COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016; RUSHIRAJ; KAPIL, 2016).

- Conversores com ponto neutro grampeado (*neutral point clamped converters – NPC*);
- Conversores com capacitores flutuantes (*flying capacitors converters – FC*);
- Conversores com ponte-H em cascata, (*cascaded H-bridge converters – CHB*).

Uma desvantagem comum a essas topologias é a necessidade de aumentar o número de dispositivos semicondutores conforme se deseja aumentar o número de níveis. De modo geral, para “w” número de níveis por fase, o número de comutadores exigido é de $[2.(w - 1)]$ para as topologias citadas. Quanto maior for o número de interruptores em um inversor multinível, maior é a sua complexidade, podendo causar dificuldades no controle de acionamento das chaves semicondutoras e baixa eficiência (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016; BEIGI et al., 2012).

Um exemplo é o inversor de cinco níveis por fase, que precisa de oito interruptores por fase da topologia *CHB* simétrico. Este elevado número de comutadores torna o circuito de controle maior e mais difícil de elaborar. O interessante são inversores com o mesmo número de níveis, mas com redução no número de interruptores. Esta redução contribui para obter-se: menos perdas, controle mais simples, redução de custo e redução de peso (BEIGI et al., 2012).

A partir das três estruturas básicas *NPC*, *FC* e *CHB*, diversas outras topologias foram propostas, como, por exemplo, o conversor com grampeamento ativo do neutro (*active neutral point clamped - ANPC*). Essa topologia tem como objetivo melhorar a distribuição das perdas nos semicondutores, que é a principal desvantagem da estrutura *NPC* (LEE et al., 2015; BRÜCKNER; BERNET; GÜLDNER, 2005).

Desta forma, há inúmeras possibilidades de se desenvolver um conversor multinível, e cada uma delas possui as suas vantagens e desvantagens. A seguir estão expostas características das topologias clássicas.

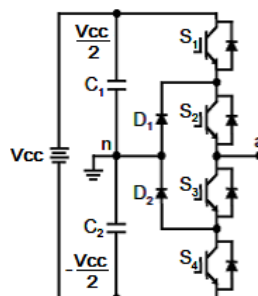
2.1.1. Conversores com ponto neutro grampeado (*neutral point clamped converters – NPC*)

Na década de 80 prevaleceu o conceito do conversor utilizando diodos grampeados. Este inversor foi denominado conversor com ponto neutro grampeado. Com esta topologia, teve-se como objetivo desenvolver um conversor de três níveis (*neutral point clamped - NPC*) (BRÜCKNER; BERNET; GÜLDNER, 2005; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Este conversor é utilizado para operar com motores CA, sistemas de energias renováveis, entre outros (HYUN; HONG; WON, 2016). Esta topologia pode ter vários níveis, sendo o de três níveis o mais utilizado em aplicações de acionamento de máquinas (ZAMBRA, 2010). A Figura 3 mostra uma fase de um conversor de três níveis com ponto

neutro grampeado (*NPC*), cujo barramento CC do conversor é formado por dois capacitores conectados em série, C_1 e C_2 . Cada capacitor é carregado com o valor equivalente a metade da tensão total do barramento CC ($= V_{cc}/2$). Entre os dois capacitores existe o ponto “n”, conhecido como ponto neutro. Ligados ao ponto neutro há dois diodos D_1 e D_2 que são os diodos de grampeamento. São esses diodos que grampeiam (fixam) a tensão na chave semicondutora para o valor de metade da tensão do barramento CC (SILVA, 2008). A tensão de saída V_{an} possui três estados (três níveis): ativando as chaves S_1 e S_2 , $V_{an} = V_{cc}/2$ volts; ativando as chaves S_2 e S_3 , $V_{an} = 0$ volt; e ativando S_3 e S_4 , $V_{an} = -V_{cc}/2$ volts (WANG et al, 2016; ANUJA; ANANTH; MARY, 2016). Para este circuito as chaves semicondutoras (S_1 e S_3) e (S_2 e S_4) não podem ser ligadas simultaneamente, ou seja, ligando a chave semicondutora S_1 , a chave S_3 deve estar desligada, assim como as chaves S_2 e S_4 devem ser complementares, logo, uma estando ligada (em posição fechada), a outra obrigatoriamente deve estar desligada (em posição aberta) (JOSHI; SHETH, 2015; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). A carga deve ser conectada aos pontos de saída “n” e “a” do inversor.

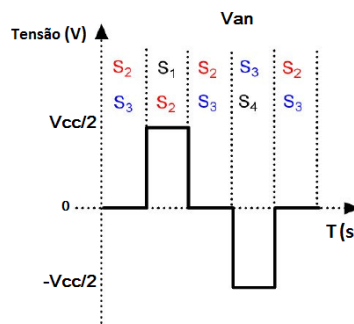
Figura 3 - Fase de um conversor *NPC* de três níveis



Fonte: MERÇON, (2007).

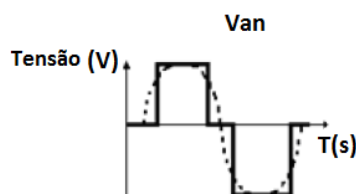
Na Figura 4 está representada a sequência de comutação dos interruptores (chaves semicondutoras) que formam os três níveis de tensão. Já na Figura 5 pode-se perceber o gráfico da tensão de fase V_{an} , a qual se familiariza com a forma senoidal da tensão (traçado pontilhado).

Figura 4 - Tensão de fase e acionamento das chaves semicondutoras



Fonte: GIARETTA (2009).

Figura 5 - Gráfico da tensão de fase V_{an} similar a uma onda senoidal



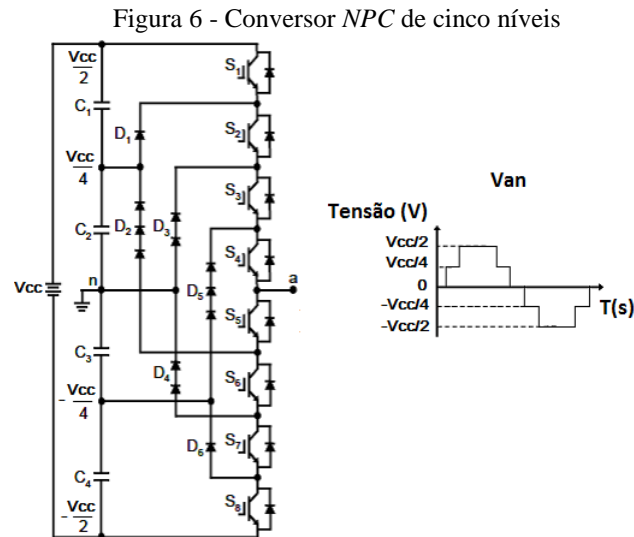
Fonte: GIARETTA (2009).

Uma característica dos conversores multiníveis *NPC*, devido a sua estrutura e das possibilidades de combinações de acionamento das chaves semicondutoras, é que para a obtenção de cada nível da tensão de saída, existe apenas uma única combinação das chaves semicondutoras por fase, como pode-se perceber na Figura 4. Este fator é restritivo, pois dificulta o controle de carga e descarga de energia dos capacitores, podendo ser crítico para o controle de potência (MERÇON, 2007).

Em um conversor *NPC* de cinco níveis, gera-se uma tensão de fase com um formato mais similar a uma forma senoidal, como pode-se verificar na Figura 6. Nesta mesma imagem, também está ilustrada a estrutura da topologia *NPC* de cinco níveis, e é notável que há mais elementos que a topologia de três níveis.

Através da estrutura do conversor, verifica-se que o barramento CC do conversor *NPC* de cinco níveis é composto por quatro capacitores ($C1$, $C2$, $C3$ e $C4$). Cada um deles deve acumular uma tensão igual a $[V_{cc}/(w - 1)]$. Desta forma, a tensão sobre cada diodo de grampeamento é $V_{cc}/4$. Os diodos de grampeamento também estão presentes em maior número em comparação ao conversor de três níveis para manter a tensão $V_{cc}/4$ sobre eles (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). O aumento do número de dispositivos eletrônicos de potência é necessário devido ao nível de tensão aos quais os diodos são submetidos na topologia de cinco níveis, podendo chegar até três vezes o valor máximo de tensão limite de $V_{cc}/4$ em certos estados de chaveamento (MERÇON, 2007; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). Por exemplo, na situação em que as chaves semicondutoras $S1$, $S2$ e $S3$ estão ligadas (referente a Figura 6), somando-se as tensões dos capacitores $C1$, $C2$ e $C3$, uma vez que estas chaves estão em paralelo com os capacitores. Desta forma, a tensão sobre o diodo $D5$ é igual a $3.V_{cc}/4$, e o restante da tensão da fonte ($V_{cc}/4$) fica sobre $D6$. Logo, para que um diodo não assuma um valor de tensão igual a $3.V_{cc}/4$ se coloca três diodos de $V_{cc}/4$ em série no local de $D5$, uma vez que capacitores com valores menores de tensão são mais baratos. O mesmo ocorre quando as chaves $S6$, $S7$ e $S8$

estão ligadas, sendo a tensão sobre o diodo D2 igual a $3V_{cc}/4$ devido aos capacitores C2, C3 e C4 e; sobre D1, a tensão é igual a $V_{cc}/4$, referente ao capacitor C1 (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016; MERÇON, 2007; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). Na Tabela 1 está indicado o acionamento das chaves semicondutoras para formar cada nível de tensão de fase V_{an} (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016).



Fonte: MERÇON, (2007).

Tabela 1 - Acionamento das chaves semicondutoras para o conversor NPC de cinco níveis

Chaves acionadas	Tensão de saída (V_{an})
S1, S2, S3, S4	$V_{cc}/2$
S2, S3, S4, S5	$V_{cc}/4$
S3, S4, S5, S6	0
S4, S5, S6, S7	$-V_{cc}/4$
S5, S6, S7, S8	$-V_{cc}/2$

Fonte: GIARETTA (2009).

O inconveniente desta topologia com maior número de níveis é o maior número de componentes, sendo que em um conversor trifásico este número aumenta consideravelmente e, como consequência, o custo do equipamento também se eleva (SILVA, 2008; MERÇON, 2007).

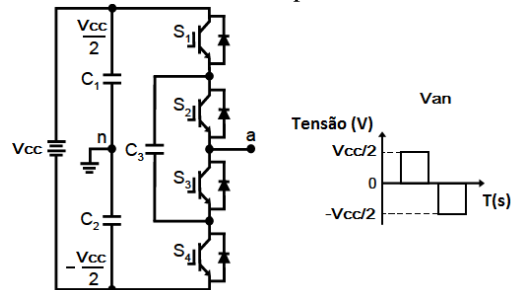
2.1.2. Conversores com capacitores flutuantes (*flying capacitors converters – FC*)

Introduzida na década de 90, esta topologia é conhecida pelas nomenclaturas conversores multiníveis grampeados a capacitores (*capacitor-clamped*), chamada também de conversor multinível com capacitores de tensão flutuante (*flying capacitors - FC*) (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Neste conversor, a soma das tensões dos capacitores conectados em série é que determina a tensão de saída (SILVA, 2008). A diferença em relação à topologia anterior é que

são capacitores que grampeiam a tensão de fase de saída, e não diodos. Uma das fases (V_{an}) de um conversor trifásico de três níveis está representada na Figura 7, assim como a sua forma de onda.

Figura 7 - Fase de um conversor capacitor flutuante de três níveis

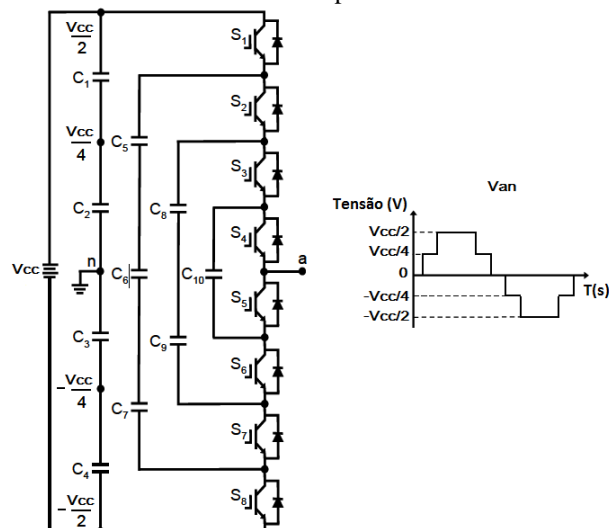


Fonte: MERÇON (2007).

Do mesmo modo que na topologia *NPC* de três níveis, esta topologia possui os mesmos três valores de tensão de saída $V_{an} = V_{cc}/2$ volts (ativando as chaves S_1 e S_2), 0 volt (ativando as chaves S_1 e S_3 ou S_2 e S_4) e $-V_{cc}/2$ volts (ativando as chaves S_3 e S_4). O capacitor de grampeamento C_3 , carrega quando as chaves semicondutoras S_1 e S_3 estão fechadas; e descarrega quando S_2 e S_4 estão fechadas (MOCHIDATE; MATSUO; OBARA; SATO, 2016; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

No caso do conversor de cinco níveis, representado na Figura 8, pode-se perceber que existe mais componentes na sua estrutura, assim como pode-se verificar que o seu sinal de saída de tensão V_{an} é mais similar a uma onda senoidal do que o conversor de três níveis, uma vez que agora existe mais um nível intermediário entre 0 e $V_{cc}/2$ (RAMANI; KRISHNAN, 2010).

Figura 8 - Fase de um conversor capacitor flutuante de cinco níveis



Fonte: MERÇON (2007).

Nesta topologia de cinco níveis também há casos de redundância, ou seja, para uma mesma tensão de saída há mais de uma combinação de chaveamento. É o caso, por exemplo, quando se tem na saída do conversor o nível de tensão igual a $-V_{cc}/4$, que pode ser obtido através de três combinações distintas das chaves. Uma delas é a combinação de fechamento das chaves S4, S6, S7 e S8, onde o nível $-V_{cc}/4$ é obtido pela soma das tensões sobre os capacitores C3, C4 e C10 conectados em série (MERÇON, 2007). Uma vez que cada capacitor possui uma tensão de $\pm V_{cc}/4$ (dependendo do sentido da corrente), a soma da tensão sobre os capacitores C3 e C4 é igual a $-V_{cc}/2$; e a tensão sobre o capacitor C10 é de $+V_{cc}/4$. Sendo assim, a resultante é igual a $-V_{cc}/4$. Todas as possíveis combinações das chaves semicondutoras e a tensão de saída V_{an} estão relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Ligação das chaves semicondutoras de um conversor capacitor flutuante de cinco níveis

Possíveis combinações de acionamento das chaves	Tensão de saída (V_{an})
1) S1, S2, S3, S4	$V_{cc}/2$
1) S1, S2, S3, S5 2) S2, S3, S4, S8 3) S1, S3, S4, S7	$V_{cc}/4$
1) S1, S2, S5, S6 2) S3, S4, S7, S8 3) S1, S3, S5, S7 4) S1, S4, S6, S7 5) S2, S4, S6, S8	0
1) S1, S5, S6, S7 2) S4, S6, S7, S8 3) S3, S5, S7, S8	$-V_{cc}/4$
1) S5, S6, S7, S8	$-V_{cc}/2$

Fonte: MERÇON (2007).

Assim como no conversor *NPC*, a tensão sobre cada uma das chaves semicondutoras também é limitada. Neste caso o valor pré-determinado é igual ao valor máximo de tensão sobre cada capacitor do circuito, sendo $V_{cc}/2$ para o conversor de três níveis e $V_{cc}/4$ para o conversor de cinco níveis (RAMANI; KRISHNAN, 2010; MERÇON, 2007). Esta redução de tensão sobre cada capacitor no conversor de cinco níveis se justifica devido ao custo do capacitor de menor tensão ser mais barato.

Esta topologia com capacitores grampeados possui como vantagens, em comparação com a *NPC*, uma maior flexibilidade no controle de chaveamento dos dispositivos semicondutores devido a existência de combinações redundantes para geração de um determinado nível e (BROADMEADOW; WALKER; BULMER, 2016; GIARETTA, 2009); a redução da distorção harmônica das tensões geradas nos terminais do conversor (MERÇON, 2007).

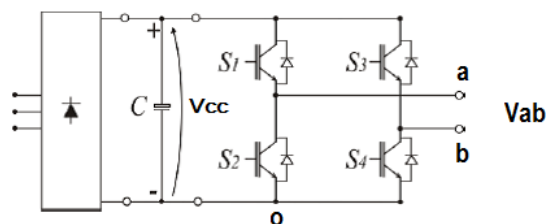
O que pode inviabilizar a aplicação deste conversor multinível é o elevado custo por consequência do número de capacitores, uma vez que para se aumentar o número de níveis do conversor, se exige um número maior de capacitores de grampeamento, bem como exige o desenvolvimento de um controle mais complexo (SILVA, 2008).

2.1.3. Conversores com ponte-H em cascata (*cascaded H-bridge converters – CHB*)

A topologia de conversores multiníveis com ponte-H (*H-bridge*) em cascata apresenta módulos de inversores monofásicos conectados em série, alimentados por fontes de tensão isoladas. Ou seja, é formada por uma cascata de células pontes-H configuradas em série (RAO; KUMAR; BABU, 2013; CASTRO; CORRÊA, 2012).

A primeira conexão de módulos monofásicos em série para sintetizar formas de onda de tensão multinível foi realizada na metade da década de 70 (RECH et al., 2004). Cada célula ponte-H (*H-bridge*) possui a estrutura ilustrada na Figura 9, onde há um retificador de tensão (monofásico ou trifásico), um capacitor de barramento CC e o inversor monofásico de ponte completa, denominado como ponte-H (CASTRO; CORRÊA, 2012). Através das comutações das chaves semicondutoras do inversor, que possuem dispositivos ativos com diodos em antiparalelo, é possível gerar três valores na tensão de saída: $+V_{cc}$, 0 e $-V_{cc}$, como mostra a Tabela 3 (RAO; KUMAR; BABU, 2013; CASTRO; CORRÊA, 2012).

Figura 9 - Célula ponte-H



Fonte: Adaptado de CASTRO; CORRÊA (2012).

Tabela 3 - Acionamento das chaves semicondutoras de uma célula ponte-H

Chaves acionadas	V_{ao}	V_{bo}	Tensão de saída ($V_{ab} = V_{ao} - V_{bo}$)
S1,S4	V_{cc}	0	$+V_{cc}$
S2,S3	0	V_{cc}	$-V_{cc}$
S1,S3	V_{cc}	V_{cc}	0
S2,S4	0	0	0

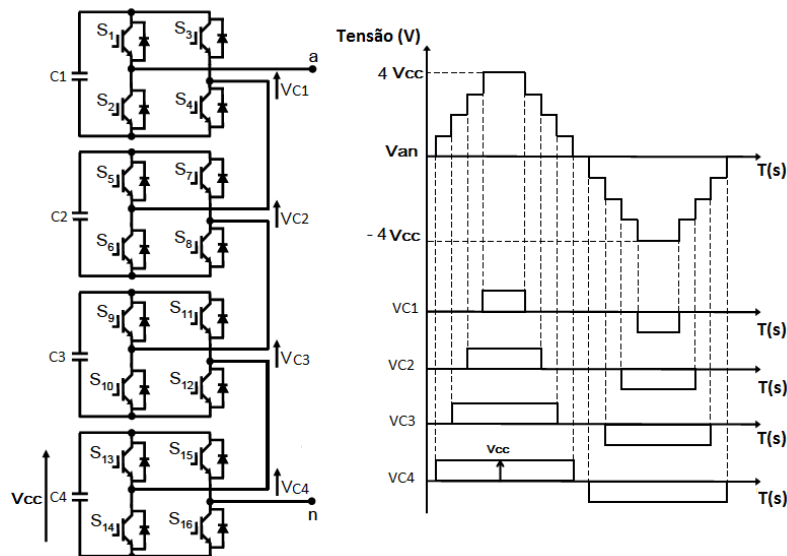
Fonte: Adaptado de RAO; KUMAR; BABU (2013).

Se o inversor tiver mais de uma ponte-H conectada em série e suas fontes de alimentação apresentarem a mesma amplitude (simétricas), o número de níveis do conversor é

dados por $(1 + 2.H)$, sendo “H” o número de células ponte-H conectadas em série em cada fase (RAO; KUMAR; BABU, 2013). A soma da tensão de saída de cada módulo ponte-H gera a tensão de fase de saída do inversor (SANZ, 2016; BOOBALAN; DHANASEKARAN, 2014).

A Figura 10 ilustra uma fase de um inversor de nove níveis $(1 + 2.H)$, que contém 4 módulos ponte-H conectados em série, com o objetivo de obter uma forma de onda mais similar se comparada com um sinal senoidal (SILVA, 2008; MERÇON, 2007). A tensão de fase de saída (V_{an}) é a soma das tensões de saída de cada célula individual, ou seja, $V_{an} = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4}$. Desta forma, é possível gerar quatro níveis positivos, o nível 0 V, e quatro níveis negativos na tensão de fase de saída, como está representado na Figura 10. Sendo assim, níveis de tensão mais elevados podem ser obtidos através da ligação em série de módulos ponte-H, mesmo que se usem dispositivos semicondutores de baixa tensão (BOOBALAN; DHANASEKARAN, 2014; RAO; KUMAR; BABU, 2013).

Figura 10 - Uma fase do conversor em cascata de nove níveis simétrico



Fonte: MERÇON (2007).

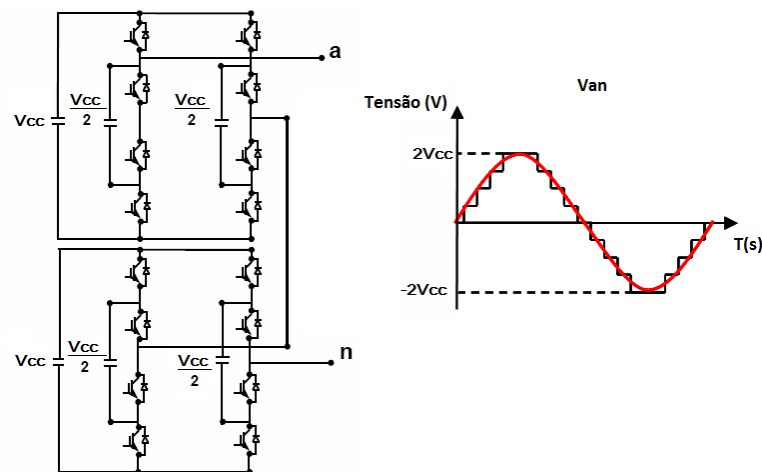
Uma das vantagens desta topologia em relação aos conversores *NPC* e *FC* é a utilização de um menor número de componentes (diodos e capacitores) para se gerar o mesmo número de níveis na tensão de saída, uma vez que esta topologia não necessita de diodos e/ou capacitores de grampeamento. Outra vantagem associada a esta topologia, refere-se ao aumento da potência do inversor, o qual pode ser obtido através do aumento do número de ponte-H conectadas em série. Isto é possível devido ao fato de que esta topologia é formada por módulos eletrônicos de potência idênticos (MERÇON, 2007).

Uma desvantagem deste inversor, é que cada barramento CC (retificadores monofásicos/trifásicos) precisa ser alimentado por fontes isoladas. Para a alimentação destes retificadores é normalmente exigido um número elevado de transformadores, ou transformador com projeto especial (ZAMBRA, 2010).

2.1.4. Conversor multinível com módulos híbridos simétricos

Além das topologias clássicas de inversores multiníveis, existe também a possibilidade de combinar diferentes conversores, gerando novas topologias com novas características. Estas topologias são chamadas de híbridas, e tem por característica reduzir o número de fontes isoladas. As suas configurações são conhecidas por misturar a topologia multinível em cascata com outras topologias que possuem dispositivos grampeadores de tensão, como exemplo, os conversores híbridos com capacitores grampeados na configuração ponte-H (*H-bridge*) com módulos em série, utilizados em aplicações em alta tensão e alta potência (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). A Figura 11 apresenta um conversor de nove níveis com módulos com capacitores de grampeamento conectados em série, bem como a sua forma de onda da tensão de fase V_{an} .

Figura 11 - Fase de um conversor nove níveis com módulos híbridos simétricos



Fonte: SILVA, (2008).

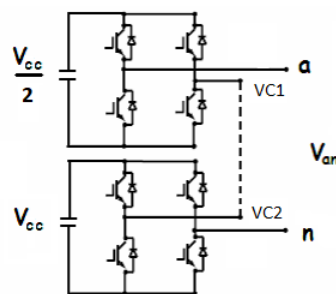
Percebe-se que na topologia apresentada na Figura 10 foi necessária uma fonte de tensão contínua para cada célula ponte-H, totalizando em quatro fontes para cada fase do inversor. Se fosse um conversor trifásico seriam doze fontes. No caso da topologia híbrida da Figura 11, para alcançar os mesmos nove níveis de tensão para cada fase, foram utilizadas apenas duas fontes CC isoladas, totalizando seis para um inversor trifásico (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

2.1.5. Conversor multinível com módulos híbridos assimétricos

A topologia do conversor com células ponte-H conectadas em série pode ser classificada como híbrida e/ou assimétrica. Esta topologia é classificada como híbrida, quando utiliza modulação diferente para cada célula ponte-H, e/ou quando apresenta diferentes tecnologias de dispositivos semicondutores em cada célula ponte-H. É classificada como assimétrica quando pelo menos uma das fontes CC apresenta amplitude diferente das demais (ZAMBRA, 2010). Na topologia clássica (simétrica) os níveis de tensão por células são iguais, e na assimétrica são diferentes (COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

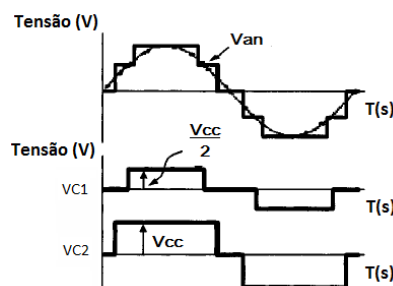
Portanto, um grande diferencial é o fato de se trabalhar com diferentes níveis de tensão entre as células ponte-H (COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). Desta maneira, cada módulo do conversor pode ter um nível de tensão diferente do outro, como, por exemplo, o conversor ilustrado na Figura 12, que mostra dois módulos, sendo um deles com nível de tensão de $V_{cc}/2$ e o outro módulo alimentado com nível de tensão de V_{cc} (COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016; SILVA, 2008). Pode-se perceber que a forma de onda em degraus da tensão de fase V_{an} de saída, representada em um ciclo (um período T) na Figura 13, se torna similar a uma onda senoidal. O sinal V_{an} é oriundo da soma das tensões de saída (V_{C1} e V_{C2}) de cada célula ponte-H.

Figura 12 - Fase de um conversor multinível com módulos híbridos assimétricos



Fonte: SILVA (2008).

Figura 13 - Níveis de tensão do conversor multinível com módulos híbridos assimétricos



Fonte: RODRIGUEZ; LAI; PENG (2002).

Com esta topologia, é possível obter um determinado número de níveis na tensão de saída com menos células conectadas em série, reduzindo desta forma o número de componentes do conversor (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). Como utiliza diferentes fontes de tensão para alimentar cada módulo, os dispositivos de potência são submetidos a diferentes valores de tensão. Desta forma, pode-se combinar a utilização de componentes que suportam altos níveis de tensão e potência, como os *GTO's (Gate Turn-Off Thyristor)*, com componentes capazes de operar em alta frequência, como os *IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor)* (RECH et al., 2004).

Através das características da aplicação é que se escolhe qual topologia de inversor multinível será utilizada. Os conversores podem ser escolhidos pelo custo, complexidade de controle, pela taxa de distorção harmônica da tensão de saída, pelo rendimento, entre outras características (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016; SILVA, 2008). No entanto, o conversor que tem sido utilizado para aumentar o número de níveis sem aumentar o número de dispositivos de potência (módulos ponte-H) é o conversor multinível assimétrico (RECH et al., 2004). Destaca-se que este conversor não é comercializado por nenhum fabricante de conversores multiníveis (ZAMBRA, 2010).

2.2. MODULAÇÃO

A estratégia de modulação em um conversor CC/CA têm como objetivos: a) a geração de um sinal para acionamento dos dispositivos semicondutores; b) a redução da distorção harmônica da tensão de saída; c) a equalização das frequências de chaveamento dos semicondutores, conduzindo a um balanceamento térmico, d) o aumento do rendimento; e) o balanceamento das tensões do barramento CC (GIARETTA, 2009; SILVA, 2008).

Dentre as estratégias convencionais de modulação de conversores multiníveis há: (MAHESHWARI et al., 2016; BIABANI; ALI, 2016).

- Modulação eliminação seletiva de harmônicas (ESH) ou *selected harmonic elimination PWM*;
- Modulação baseada em portadora, ou modulação senoidal, ou *carrier based sinusoidal PWM strategies (SPWM)*;
- Modulação *space vector (SV ou SVM)* ou estratégias vetoriais ou *space vector PWM strategies (SVPWM)*.

Devido as suas características positivas, a modulação vetorial tem sido uma das técnicas mais populares. Dentre os benefícios, cita-se: alto aproveitamento da tensão do barramento CC; baixa distorção harmônica; perdas de chaveamento são passíveis de otimização, entre outras (BIABANI; ALI, 2016; PEREIRA, 2007).

A topologia do inversor é um fator determinante no tocante ao tipo de estratégia a ser utilizada. Um exemplo é o inversor multinível em cascata, que frequentemente utiliza a modulação baseada em portadora ou a modulação *space vector*. Este último método é mais complexo de implementar para inversores que apresentam mais do que cinco níveis na tensão de saída, uma vez que apresentam um número muito elevado de vetores de chaveamento (RAO; KUMAR; BABU, 2013).

2.2.1. Modulação por eliminação seletiva de harmônicas (ESH):

A técnica de modulação que visa eliminação seletiva de harmônicas (ESH) (ou *selective harmonic elimination*), também conhecida como MLP Ótima (PEREIRA, 2007; SUH et al., 1998), como o próprio nome diz, tem como objetivo de realizar a eliminação dos harmônicos de baixa ordem da tensão de saída dos inversores (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Os métodos de modulação utilizados em conversores multiníveis podem ser classificados de acordo com a frequência de chaveamento, sendo a modulação por eliminação seletiva de harmônicas um dos métodos utilizados para aplicações em baixa frequência de comutação (PINTO, 2005; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). Uma das vantagens em se trabalhar com baixas frequências é a redução das perdas de comutação nos dispositivos semicondutores (CARNIELUTTI, 2012).

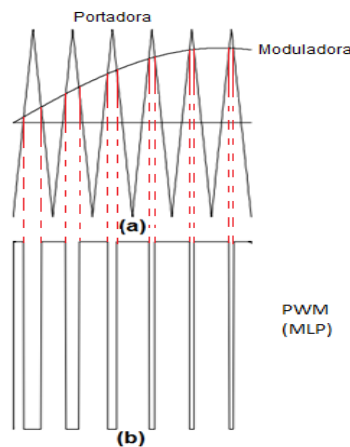
No método ESH, para eliminar harmônicas específicas, são criadas formas de tensão em degraus através da seleção dos ângulos de disparo dos semicondutores (PINTO, 2005; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002; SUH et al., 1998). De modo geral, entre os diferentes níveis dos conversores, o método de seleção dos ângulos de disparo é utilizado para remover os harmônicos de baixa frequência mais significativos. Já o conteúdo harmônico de alta frequência pode ser removido através de adição de filtros passivos (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002). Os cálculos para se obter os ângulos de comutação para a eliminação dos componentes harmônicos específicos são feitos previamente (*off-line*) e armazenados em tabelas de consulta, uma vez que o sistema é complexo e difícil de ser realizado em tempo real (CARNIELUTTI, 2012; SUH et al., 1998). Desta forma, a sua performance dinâmica se

torna um fator negativo (PEREIRA, 2007). Este método também pode ter como limitação a capacidade de armazenamento dos ângulos de disparo, o tempo de compilação dos resultados, bem como oferece uma estreita faixa de índice de modulação em amplitude “ m_a ” (SUH et al., 1998).

2.2.2. Modulação baseada em portadora (*carrier based sinusoidal PWM - SPWM*):

Neste método, o sinal *PWM* é gerado para comandar as chaves semicondutoras, sendo obtido através da comparação de um sinal modulador (sinal de referência) com uma portadora (sinal periódico triangular ou dente de serra) (BIABANI; ALI, 2016; KHARJULE, 2015). Também é conhecida como *Sinusoidal-pulse PWM* (BIABANI; ALI, 2016). A Figura 14 (a) apresenta o sinal da moduladora e da portadora, onde o ponto de cruzamento entre os dois sinais determina o disparo ou bloqueio de um dispositivo semicondutor, o sinal de comando do dispositivo semicondutor pode ser verificado na Figura 14 (b). Observa-se que no período no qual o sinal da moduladora for maior do que o sinal da portadora, o sinal que comanda a chave permanece em nível “alto”, mantendo a chave em condução; caso contrário a chave estará aberta (BIABANI; ALI, 2016).

Figura 14 - (a) Comparação dos sinais da portadora e moduladora (b) Pulsos *PWM* (MLP) oriundos da comparação do sinal de referência e da portadora

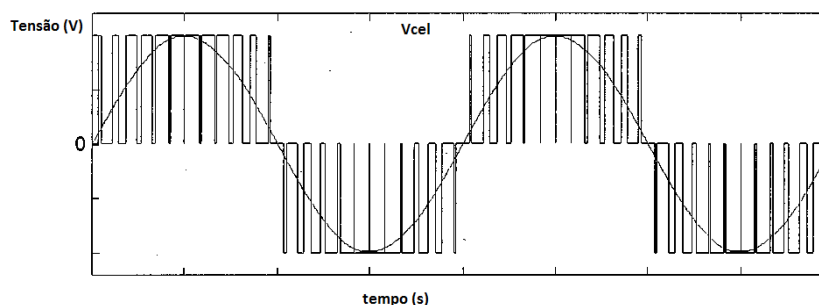


Fonte: PEREIRA (2007).

A frequência da onda portadora define a frequência de comutação das chaves, sendo esta frequência maior do que a frequência do sinal que se pretende gerar. Esta característica permite controlar a amplitude da tensão de saída (BIABANI; ALI, 2016). Também é possível reduzir o conteúdo harmônico e sua lógica é de fácil implementação (BIABANI; ALI, 2016; KHARJULE, 2015).

Na Figura 15 está representada a tensão de saída gerada por uma célula de um inversor de frequência monofásico de ponte completa. Este resultado é obtido através da comparação da onda senoidal de referência com o sinal da portadora triangular (RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Figura 15 - Tensão de uma célula Ponte-H resultante da comparação da onda senoidal de referência com o sinal da portadora triangular



Fonte: RODRIGUEZ; LAI; PENG (2002).

Devido a sua facilidade de implementação, simplicidade e dos bons resultados, é uma técnica de modulação utilizada em aplicações industriais (KHARJULE, 2015; GIARETTA, 2009). Porém, outros métodos alcançam resultados melhores e fornecem maior flexibilidade para implementação, como a modulação *space vector* (BIABANI; ALI, 2016).

2.2.3. Modulação vetorial ou *space vector* (SV):

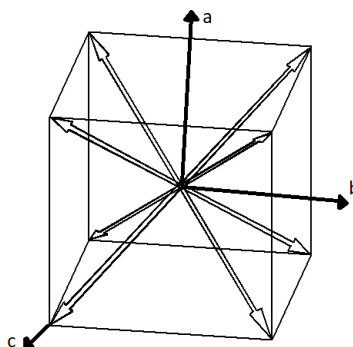
A técnica de modulação vetorial, também conhecida como modulação *space vector* (SV), *space vector modulation* (SVM) ou *space vector pulse width modulation* (SVPWM) tem como destaque o processo para se gerar os sinais de comando para os dispositivos semicondutores de um inversor de frequência (BIABANI; ALI, 2016). Entre os objetivos desta técnica, destaca-se a possibilidade de se obter uma tensão de saída variável tendo um máximo componente fundamental e com o mínimo de distorção harmônica (BIABANI; ALI, 2016; SILVA, 2008).

A modulação SV é realizada através da programação de um circuito eletrônico e, para o seu desenvolvimento, inicialmente deve-se escolher a topologia do inversor. Através da estrutura e do número de semicondutores se identifica todas as combinações de ativação das chaves semicondutoras, e cada combinação forma um vetor de comutação (MAHESHWARI et al., 2016).

Estes vetores de comutação são projetados em um espaço “abc”, formando um cubo, como pode-se visualizar na Figura 16, que ilustra os oito vetores de comutação que pertencem

a um inversor de dois níveis, os quais foram obtidos a partir das oito combinações de chaveamento do mesmo (HEMALATHA; KUMAR CHINNAIYAN, 2014; GIARETTA, 2009; PINHEIRO et al., 2005).

Figura 16 - Projeção no espaço dos oito vetores de chaveamento de um inversor de dois níveis



A partir dos vetores de comutação em coordenadas “abc” são realizadas as projeções destes vetores em um plano, conhecido como plano α - β . Para tanto, utiliza-se uma matriz de transformação, pela qual são obtidos os valores dos vetores em coordenadas α - β (PINHEIRO et al., 2005). Cada combinação de chaveamento (vetor de comutação no espaço “abc”) é representado por um ponto no plano α - β , e estas projeções no plano formam um hexágono. É possível visualizar como é gerado este formato geométrico hexagonal a partir do exemplo do inversor de dois níveis. A Figura 17, que destaca dois vetores de comutação no espaço “abc” e, ao girar o cubo e alinhar os vértices em destaque (pontos vermelhos) no centro da vista, forma um hexágono, como mostra a Figura 18. A partir desta vista, os oito vetores de comutação no espaço, quando projetados em um plano (plano de fundo), mantém o formato hexagonal, gerando o plano α - β . São projetados no plano seis pontos (um em cada vértices) e dois pontos no centro (vetores alinhados), igualmente a Figura 18.

Este diagrama de vetores de comutação no plano α - β está vinculado apenas ao número de níveis dos inversores (número de comutações possíveis do inversor), sendo assim, serve para quaisquer topologias (conversores NPC, capacitores grampeados, módulos em cascata, etc.) (SILVA, 2008; HU; YAO; LU, 2007; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Figura 17 - Destaque dos vértices que serão alinhados ao girar o cubo

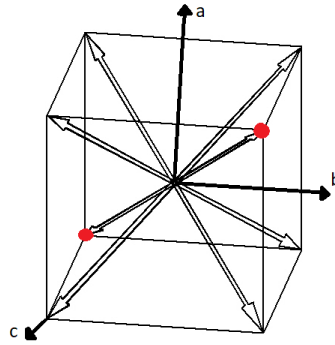
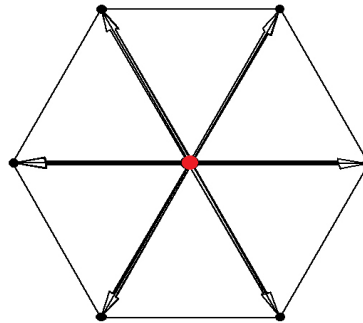


Figura 18 - Alinhamento dos vértices do cubo no espaço formando um hexágono



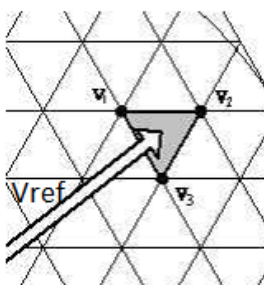
Com a obtenção dos pontos no hexágono, representando os vetores de comutação, são definidos os planos que limitam a região do hexágono (conhecidas como planos limites – PL), como também planos dentro do hexágono (conhecidas como planos de separação – PS). Estas delimitações dos planos formam regiões (triângulos), conhecidos como setores. Cada vértice do setor representa um vetor de comutação. Estes planos são utilizados no processo de busca do setor.

Outro fator importante no modulação *space vector* está relacionado as três tensões senoidais de referência que são geradas no circuito eletrônico. A partir destes três sinais de tensão variantes no tempo se obtém, utilizando novamente a matriz de transformação, um vetor de referência no plano α - β , conhecido como V_{ref} . Deste modo, vetor V_{ref} , a cada instante de tempo, altera as suas coordenadas α - β , girando dentro do plano.

Como este vetor representa as referências das tensões trifásicas desejadas na saída do inversor, as análises da modulação *SV* são realizadas em função das coordenadas do vetor V_{ref} sobre o plano α - β (PINHEIRO et al., 2005). Sendo assim, tendo gerado o hexágono e o vetor V_{ref} , a etapa seguinte da modulação é conhecer o local no plano α - β que este vetor percorre a cada instante de tempo. Para tanto é utilizado um algoritmo de busca do setor ao qual o vetor V_{ref} se situa.

Este processo de busca do setor é desenvolvido com a utilização dos planos PL e PS. Localizado o setor (triângulo) em que o vetor V_{ref} está em um determinado tempo, são identificados, conseqüentemente, os três vetores de comutação mais próximos a ele, conforme Figura 19, que indica que os vetores V_1 , V_2 e V_3 formam o setor em que o vetor V_{ref} se encontra naquele momento. O método da utilização dos vetores de comutação mais próximos do vetor desejado V_{ref} ocorre para poder sintetizar o seu valor e, esta técnica é a mais aplicada devido a menores perdas de comutação e a um menor conteúdo harmônico na tensão de saída (PINHEIRO et al., 2005).

Figura 19 - Os três vetores mais próximos ao vetor V_{ref} dentro do hexágono



Fonte: OH; JIN; LEE (2007).

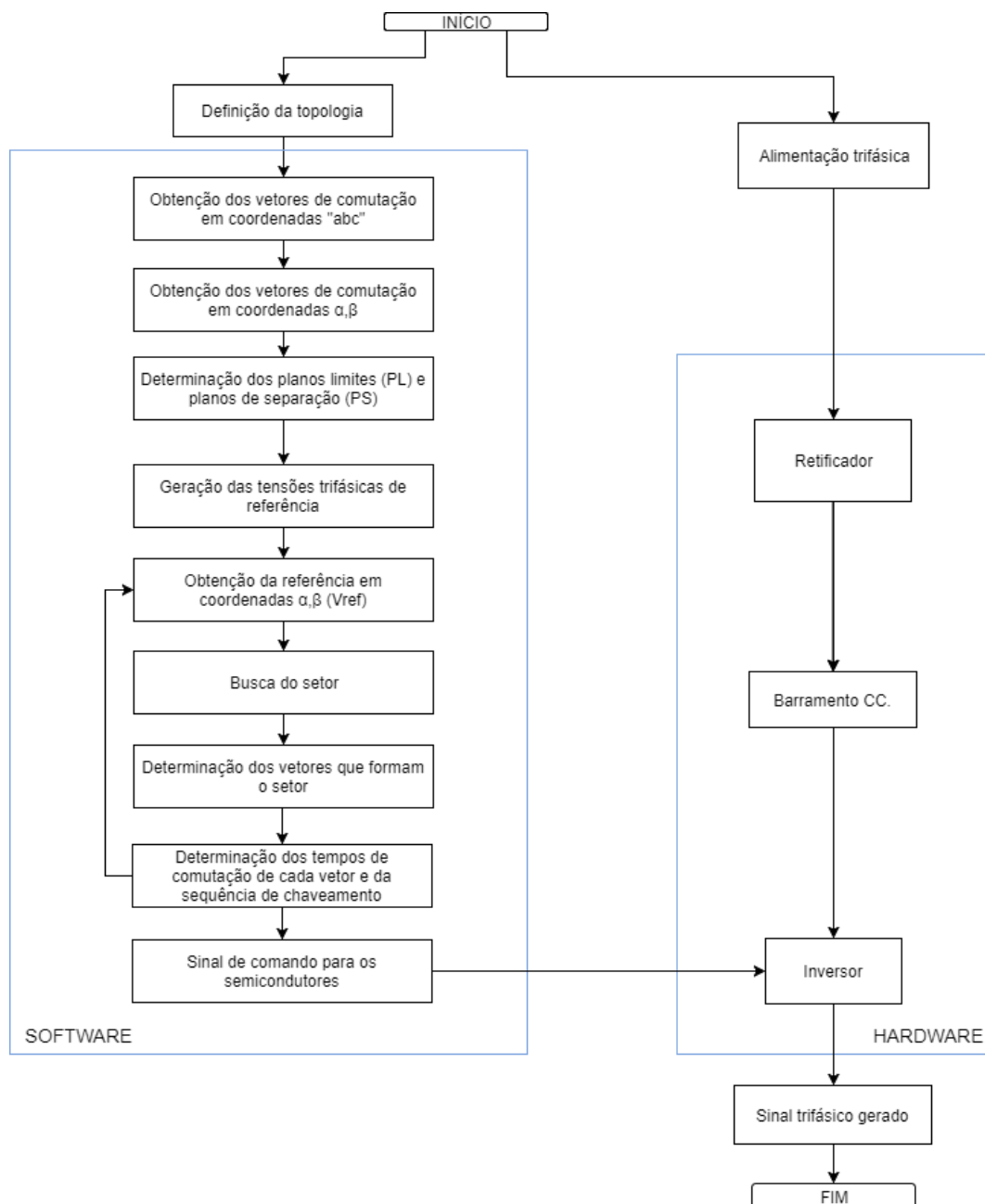
Com a identificação dos três vetores mais próximos ao V_{ref} , resultado da lógica de busca do setor, são determinados os tempos de ativação de cada um dos três vetores, como também a sequência de comutação. É importante determinar a sequência de comutação dos vetores porque, através desta, pode-se obter diversas vantagens, como, por exemplo, a limitação do número de comutações das chaves semicondutoras e a redução do conteúdo harmônico das tensões de saída (MAHESHWARI et al., 2016; CARNIELUTTI, 2012).

Os dois parâmetros (tempo de ativação e sequência de comutação) são utilizados para sintetizar o valor de V_{ref} em cada instante de tempo (GUNASEKARI; DHANALAKSHMI; KISHORE RAJA, 2016; SILVA, 2008). Sendo assim, o vetor V_{ref} é sintetizado, a cada setor, com a comutação dos três vetores, cada um por vez, ativados em um determinado tempo. Uma vez que cada vetor gera um nível de tensão de saída, a média desta sequência formará o valor do vetor V_{ref} (MAHESHWARI et al., 2016; CARNIELUTTI, 2012; GRIGOLETTO; PINHEIRO, 2009; HU; YAO; LU; 2007; PINTO, 2005).

Por fim, ocorre o envio dos sinais de comando do circuito eletrônico para o acionamento físico das chaves semicondutoras do inversor, fazendo com que os sinais de saída do mesmo sejam similares às tensões trifásicas de referência geradas no início do

programa. Para um melhor entendimento da modulação *SV* (software), justamente com o funcionamento da estrutura física do inversor (hardware), foi elaborado, na Figura 20, um diagrama de blocos, identificando a sequência de operações e a interação entre estes dois processos.

Figura 20 - Diagrama de blocos de um inversor utilizando a modulação *SV*



Um grande empecilho do algoritmo *space vector (SV)* é determinar em qual setor no plano α - β o vetor de referência está situado. Esta tarefa se torna muito complexa com o aumento significativo de níveis do inversor, pois assim haverá muitos vetores de comutação, dificultando a lógica de busca do setor (RUSHIRAJ; KAPIL, 2016; SILVA, 2008). Outra

dificuldade desta técnica recai sobre o número de níveis do inversor que, quanto maior este valor, maior vai ser o número de vetores de comutação; de setores no plano α - β e de vetores redundantes (vetores que são projetados no mesmo ponto no plano α - β). Desta forma, é mais difícil realizar o algoritmo de localização do vetor de referência (V_{ref}) e a seleção dos estados de comutação. Isso pode ser um fator limitante, pois exige um grau de complexidade computacional elevado, prejudicando a implementação prática desse algoritmo de controle. Por isso, estudos de algoritmos são realizados para tornar a modulação *SV* atraente para conversores multiníveis (CARNIELUTTI, 2012; SILVA, 2008; RODRIGUEZ; LAI; PENG, 2002).

Uma vantagem de ter um inversor com diversas possibilidades de comutação é obter vetores redundantes e, devido ao inversor possuir estes vetores redundantes, há várias opções para determinar a sequência de comutação. A sequência de comutação é determinada de acordo com objetivo de otimização, como, por exemplo, minimizar as perdas de comutação das chaves semicondutoras, minimizar a distorção harmônica total (*THD*) e reduzir o número de comutações dos interruptores (GRIGOLETTO; PINHEIRO, 2009; HU; YAO; LU; 2007; PINHEIRO et al., 2005). Outra vantagem dos conversores com maior número de níveis é que estes conseguem, devido à diminuição da área dos setores, uma síntese mais precisa do vetor V_{ref} (SILVA, 2008).

A modulação *space vector* é um avanço da técnica computacional *PWM*, sendo uma das melhores técnicas para aplicações em acionamentos de motores, obtendo o melhor aproveitamento da tensão de saída (BIABANI; ALI, 2016; SILVA, 2008).

2.3. REVISÃO SOBRE MODULAÇÃO *SPACE VECTOR* APLICADA A INVERSORES MULTINÍVEIS

O estudo de Castro e Corrêa (2012) teve como foco introduzir um algoritmo generalizado para estratégia de modulação *space vector* que elimina a tensão de modo comum em inversores multiníveis em cascata com um número ímpar de níveis. A tensão de modo comum é a tensão entre o ponto neutro da carga (conectada em estrela) e o ponto de referência zero do inversor.

As tensões de modo comum estão associadas a tensões induzidas no eixo e correntes de circulação de fuga através de capacitâncias parasitas entre os enrolamentos do motor, o rotor e a carcaça. A amplitude e o número de picos dessas correntes são determinados pela

variação de tensão no tempo (dv/dt) e pelo número de comutações presentes na tensão de modo comum. Esses picos de corrente podem causar falhas prematuras nos mancais e interferências eletromagnéticas. Desta maneira, a eliminação da tensão de modo comum é desejável em aplicações de inversores multiníveis em acionamentos de máquinas CA para diminuir a interferência eletromagnética (*electromagnetic interference - EMI*) e prevenir a falha prematura dos mancais (CASTRO; CORRÊA, 2012).

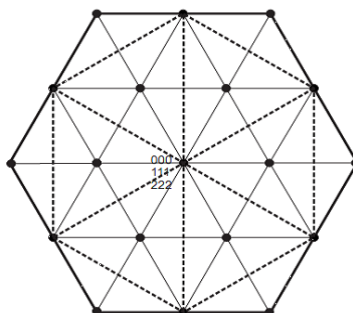
Os inversores multiníveis têm como características gerar vetores com estados redundantes devido à existência de componentes de sequência zero nas tensões de fase. Desta forma, dois estados podem ter o mesmo vetor, porém, em um dos estados as tensões de saída são balanceadas e o outro estado não são balanceadas (CASTRO; CORRÊA, 2012).

Através da utilização apenas dos estados de chaveamento que possuem a tensão de modo comum igual a zero é possível eliminar completamente a tensão de modo comum para inversores com número ímpar de níveis (ZHANG et al., 2000 apud CASTRO; CORRÊA, 2012)¹. Ao utilizar apenas estes vetores, há uma simplificação no diagrama vetorial do inversor, passando de w -níveis para um diagrama vetorial simplificado de $[(w + 1)/2]$ níveis com uma defasagem de 30° , sendo “ w ” o número de níveis por fase do inversor. Desta forma, não há redundâncias, uma vez que cada vetor simplificado possui apenas um estado de chaveamento (CASTRO; CORRÊA, 2012).

A Figura 21 ilustra um diagrama vetorial de um inversor de três níveis ($w = 3$) e sua versão simplificada de dois níveis $[(w + 1)/2]$ (vetores ligados pelas linhas tracejadas), sendo esta formada pela escolha de estados de chaveamento (vetores) que possuem a tensão de modo comum igual a zero. Percebe-se que há uma diminuição na quantidade de vetores que podem ser utilizados para eliminar a tensão de modo comum, sendo que no diagrama simplificado há sete vetores e no diagrama convencional há dezenove vetores. A diminuição na quantidade de vetores acarreta um número maior de comutações das chaves por período. Essa diminuição também ocasiona um aumento significativo nas distorções das tensões e correntes de saída. Por esse motivo, o método apresentado é recomendado para inversores com cinco ou mais níveis, pois há uma maior quantidade de vetores utilizados, garantindo menores distorções (CASTRO; CORRÊA, 2012).

¹ ZHANG, Haoran et al. Multilevel inverter modulation schemes to eliminate common-mode voltages. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 6, p.1645-1653, nov./dec. 2000.

Figura 21 - Simplificação de um diagrama vetorial de três níveis em um diagrama de dois níveis para eliminação da tensão de modo comum



Fonte: CASTRO; CORRÊA (2012).

A estratégia para a eliminação da tensão de modo comum tem como sequência operacional conhecer o vetor de referência; identificar os três vetores mais próximos da referência e; calcular seus respectivos tempos de aplicação (suas respectivas larguras de pulso - *duty cycles*). O último passo do algoritmo consiste na seleção dos estados de chaveamento, que requer a transformação dos vetores obtidos em duas dimensões para o espaço de três dimensões (CASTRO; CORRÊA, 2012).

Com esta estratégia se elimina as tensões de modo comum, mas, como consequência, as tensões de saída de linha do inversor são defasadas 30° em relação as tensões de referência (CASTRO; CORRÊA, 2012). Através de simulações do algoritmo de eliminação da tensão de modo comum para um inversor em cascata de sete níveis, esta manteve-se em zero, comprovando a eficácia do algoritmo.

Grigoletto e Pinheiro (2009) apresentam uma nova estratégia de modulação vetorial para controle da tensão do ponto central do divisor capacitivo do conversor de ponto neutro grampeado – NPC com a justificativa de que nem sempre é possível eliminar as ondulações de baixa frequência nas tensões do barramento CC através das técnicas de modulação SVPWM tradicionais aplicadas a este conversor. Estas técnicas tradicionais utilizam os três vetores de comutação mais próximos (*nearest three vectors - NTV*) e as ondulações no ponto central do divisor capacitivo oriundas da técnica provocam um aumento de tensão sobre as chaves semicondutoras e introduzem componentes harmônicos nas tensões de saída. As tensões no ponto neutro podem aumentar para cargas de baixo fator de potência que operam com altos índices de modulação.

Deste modo, foi proposta uma nova seleção (*new selected three vectors - NSTV*) que possibilita o controle da corrente do ponto central do divisor capacitivo para qualquer fator de

potência de carga, bem como para operação com cargas não-lineares e desequilibradas. A corrente média do ponto central é utilizada para restaurar o equilíbrio das tensões dos capacitores do barramento CC e para eliminar as flutuações de baixa frequência (GRIGOLETTO; PINHEIRO, 2009).

No caso do diagrama vetorial *NTV*, para se conseguir uma corrente média no ponto central igual a zero ou igual a um valor desejado para restaurar o equilíbrio das tensões do divisor capacitivo, um conjunto de restrições devem ser satisfeitas (GRIGOLETTO; PINHEIRO, 2009). Segundo os autores, os vetores médios influenciam na corrente no ponto central do divisor capacitivo do barramento CC do *NPC*.

O novo diagrama vetorial proposto (*NSTV*) também utiliza o critério dos três vetores mais próximos, porém, eliminando os vetores médios. Com a retirada destes vetores foi possível realizar o controle da corrente média no ponto central independente do fator de potência e da natureza da carga (GRIGOLETTO; PINHEIRO, 2009).

Com o intuito de simplificar a notação e o controle da corrente média no ponto central, o artigo de Grigoletto e Pinheiro (2009) também propõem a definição dos tempos associados aos vetores com redundância, ou seja, ativação desses vetores dentro de um período de comutação. Desta forma, foi possível controlar a corrente média no ponto central do divisor capacitivo e simplificar o projeto do controlador. Por fim, o artigo apresenta duas sequências de comutação, sendo uma com o objetivo de reduzir a *THD* das tensões de saída, e outra sendo mais fácil de implementar, porém, utilizando um maior número de vetores.

Carnielutti (2012) apresenta novas propostas de modulação para conversores multiníveis em cascata simétrico e assimétrico compostos por células ponte-H conectas em série por fase. O intuito foi fazer com que o conversor continue alimentando a carga mesmo que uma ou mais células apresentem falhas, sendo retirada de operação. Desta forma, a confiabilidade do processo aumentaria.

Referente às estratégias de modulação baseada em portadora, Carnielutti (2012) apresentou uma estratégia generalizada de modulação para conversores multiníveis em cascata com qualquer número de níveis, tanto simétricos como assimétricos, em operação normal ou sob falhas. Já no caso da modulação *space vector*, a autora desenvolveu uma estratégia apenas para conversores multiníveis em cascata assimétricos de sete níveis por fase.

O novo método de modulação *space vector* proposto por Carnielutti (2012) considera um conversor multinível assimétrico com duas células por fase, sendo uma de 1pu e outra de 2pu, e sem considerar falhas. Nesse conversor há células de alta tensão que operam em baixa frequência e células de baixa tensão que operam em alta frequência, uma para cada fase.

Carnielutti (2012) utilizou o algoritmo descrito em Celanovic e Boroyevic (2001) para modular as células, sendo que a proposta da autora foi fazer com que o estado de condução (vetor de comutação) das células de alta tensão e baixa frequência tenha sido definido pela escolha do vetor mais próximo da referência através de cálculos de norma Euclidiana. Já nas células de baixa tensão e alta frequência, os sinais *PWM* para os interruptores para as células de baixa tensão e alta frequência foram gerados através da comparação dos valores dos comparadores com a portadora triangular. As equações que formam os valores dos comparadores, assim como sequências de comutação, foram escolhidos *off-line* e armazenadas na memória de um microprocessador especializado em processamento digital de sinal (*digital signal process - DSP*). Para cada setor do diagrama *SV* foi definida uma sequência de comutação específica.

Carnielutti (2012) escolheu as sequências de comutação, dentro de um período de atualização da ação de controle, que garantem o menor número de comutações. Devido a esta maneira de seleção, as perdas de comutação diminuíram e a qualidade das tensões de linha de saída melhoraram, atenuando as amplitudes das componentes harmônicas de baixa ordem. Quanto menos interruptores alterar o seu estado de condução na mudança de um vetor de comutação para o outro, melhor. Desta forma, foi almejado que apenas um interruptor altere o seu estado. Porém, para as células de baixa tensão e alta frequência, não foi possível realizar este procedimento, uma vez que é um processo trabalhoso para conseguir essa situação, pois as referências para as células são descontínuas, com saltos entre setores não adjacentes. Mesmo assim, em alguns casos, se obteve apenas uma mudança de estado de comutação.

Após a realização de testes de simulação e experimentais Carnielutti (2012) concluiu que a modulação *SV* possui bom desempenho quanto ao fator de distorção harmônica (*first order distortion factor - DF1*) e *THD*.

Através das referências citadas, pode-se perceber a vasta utilização da modulação *space vector* para conversores multiníveis. Porém, no caso de conversores multiníveis híbridos assimétricos a literatura não apresenta muitas referências, tendo-se a possibilidade de se fazer grandes contribuições.

3. DESENVOLVIMENTO DA MODULAÇÃO *SPACE VECTOR* (SV) NA TOPOLOGIA PROPOSTA

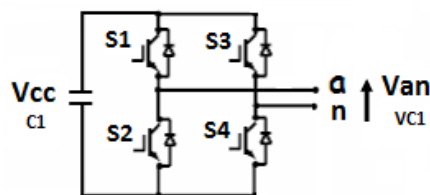
Neste capítulo está desenvolvida a modulação *space vector* (SV) para um inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase com ponte-H em cascata (*cascaded H-bridge – CHB*), assim como as simulações e comparações realizadas para a verificação de desempenho da modulação.

No Apêndice A foi descrita toda a técnica *space vector* aplicada a um inversor de dois níveis por fase (topologia mais simples) com objeto de auxiliar o entendimento da modulação SV aplicada a um inversor de frequência. No referido Apêndice está explicado de forma mais detalhada a sequência de operações que a modulação exige, incluindo deduções matemáticas.

Em relação ao desenvolvimento da modulação SV para a topologia de nove níveis por fase, inicialmente, para uma melhor assimilação do processo de chaveamento do inversor proposto, há uma explanação sobre as topologias dos inversores CHB simétricos de três, cinco e sete níveis. Através destas, além de auxiliar no entendimento de como ocorre a comutação das chaves semicondutoras do inversor assimétrico e as tensões geradas, também servem como comparativo sobre a relação do número de células ponte-H versus o número de níveis alcançados pelos inversores. Posteriormente, através dos subcapítulos, estão implementados todos os passos da modulação SV para o inversor híbrido assimétrico de nove níveis (inversor proposto).

O inversor simétrico de três níveis possui apenas uma célula ponte-H (*H-bridge*) (Figura 9) conectada em cada fase. Esta estrutura pode ser simbolizada de forma mais simplificada, conforme Figura 22. O número de células ponte-H por fase que um inversor simétrico possui deve ser calculado por: $H = (w - 1)/2$; onde “H” é o número de células por fase e “w” é o número de níveis por fase do inversor (RAO; KUMAR; BABU, 2013; SILVA, 2008).

Figura 22 - Fase de um inversor simétrico de três níveis por fase



As possibilidades de chaveamento da ponte-H e as respectivas tensões de fase estão representadas na Tabela 4, onde o número 1 significa que a chave está acionada (conduzindo), e o zero a chave está aberta. Há também as simbologias P, O e N que se referem ao sinal de tensão de saída, sendo P para o sinal positivo, O para sinal de zero volts, e N para o sinal negativo.

Tabela 4 - Estados de chaveamento de uma célula ponte-H e tensão de fase de um inversor simétrico de três níveis

Símbolo	Estados das chaves de uma fase do inversor				Tensão de fase de saída
	S1	S2	S3	S4	
P	1	0	0	1	+ Vcc
O	1	0	1	0	0
	0	1	0	1	
N	0	1	1	0	-Vcc

Fonte: Adaptado de GIARETTA (2009).

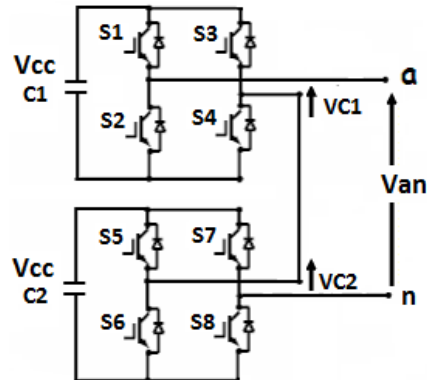
Como as chaves S1 e S2 são complementares, assim como S3 e S4, logo é possível simplificar a tabela acima e realizar uma análise de chaveamento de uma célula ponte-H através de apenas duas chaves: S1 e S3. Também, como há duas possibilidades de gerar a tensão de 0 V (símbolo O), a Tabela 4 pode ser reorganizada com a simbologia P, O1, O2 e N, conforme a Tabela 5. Nota-se, então, que uma ponte-H gera quatro combinações diferentes. Esta reformulação é necessária para futuramente ficar mais fácil realizar as combinações entre as chaves nos inversores que possuem mais níveis, inclusive para o inversor assimétrico proposto.

Tabela 5 - Reorganização da tabela dos estados de chaveamento de uma célula ponte-H e tensão de fase de um inversor simétrico de três níveis

Nº de combinações	Símbolo	Célula		Tensão de fase
		S1	S3	
1	P	1	0	+ Vcc
2	O1	0	0	0
3	O2	1	1	0
4	N	0	1	-Vcc

Um inversor simétrico de cinco níveis possui duas células ponte-H em cada fase. Verifica-se esta quantidade mediante o cálculo: $H = (w - 1)/2 \rightarrow H = (5 - 1)/2 \rightarrow H = 2$ células. A representação deste inversor com uma fase está ilustrada na Figura 23.

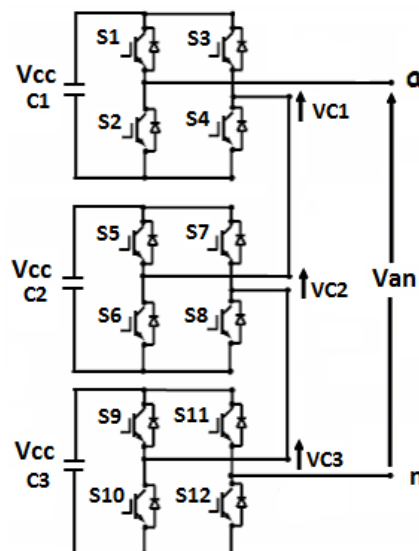
Figura 23 - Fase de um inversor simétrico de cinco níveis por fase



Através das combinações de chaveamento de uma célula, analisadas no caso anterior do inversor de três níveis, é possível determinar os estados das chaves (S1, S3) e (S5, S7) para um inversor simétrico de cinco níveis com duas células. Como cada ponte-H possui quatro estados de chaveamento (vide Tabela 5), então duas pontes possuem dezesseis possibilidades ($4^2 = 16$), gerando cinco níveis de tensão de fase V_{an} diferentes ($+2V_{cc}, +V_{cc}, 0, -V_{cc}, -2V_{cc}$). Logo, este inversor é nomeado de cinco níveis e a tensão de saída é gerada pelo somatório das tensões das células V_{C1} e V_{C2} .

O inversor simétrico de sete níveis, representado com uma fase pela Figura 24, possui em cada fase três células ponte-H conectadas em série.

Figura 24 - Fase de um inversor simétrico de sete níveis por fase



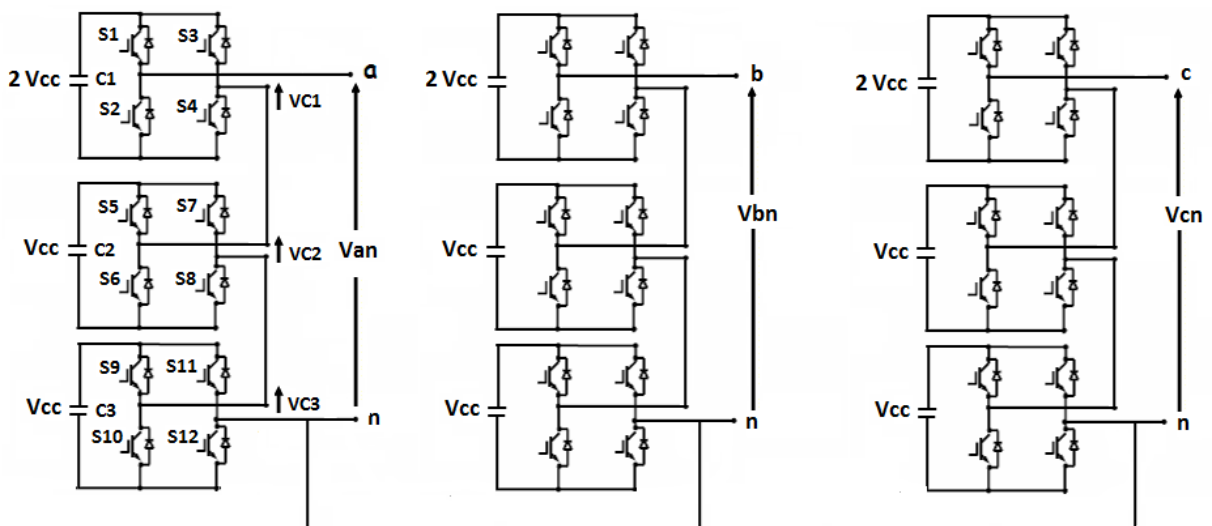
Assim como nos casos anteriores de três e cinco níveis, é possível obter todas as combinações de chaveamento de cada célula (ponte-H) e a tensão de saída V_{an} das referidas comutações. No caso deste inversor simétrico existem sessenta e quatro possibilidades de

chaveamento por fase, uma vez que cada uma das três ponte-H possui quatro possibilidades ($4^3 = 64$). Também possui sete níveis de tensão de fase V_{an} diferentes ($+3V_{cc}$, $+2V_{cc}$, $+V_{cc}$, 0 , $-V_{cc}$, $-2V_{cc}$, $-3V_{cc}$), fazendo jus a sua nomenclatura. A tensão de saída V_{an} representa o somatório das tensões das células ponte-H (V_{C1} , V_{C2} e V_{C3}).

Na topologia do inversor simétrico de nove níveis o número de células por fase é: $H = (w - 1)/2 \rightarrow H = (9 - 1)/2 \rightarrow H = 4$ células. Logo, este inversor possui quatro células ponte-H conectadas em série por fase. O total de comutações é de duzentos e cinquenta e seis (256) por fase ($4^4 = 256$). A Figura 10 ilustra este inversor com uma fase e seus sinais de tensão resultantes de cada ponte-H (V_{C1} , V_{C2} , V_{C3} e V_{C4}), assim como a tensão de saída V_{an} com os nove níveis $+4V_{cc}$, $+3V_{cc}$, $+2V_{cc}$, $+V_{cc}$, 0 , $-V_{cc}$, $-2V_{cc}$, $-3V_{cc}$, $-4V_{cc}$.

O inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase proposto possui as fases conectadas em estrela, onde cada fase possui três células ponte-H (*H-bridge*), similar ao inversor simétrico trifásico de sete níveis visto anteriormente (vide Figura 24). Porém, agora, uma das tensões do barramento CC de uma das células é diferente das demais, sendo o dobro, como ilustrado na Figura 25. Esta característica traz como vantagem obter, com o mesmo número de células de um inversor simétrico de sete níveis, mais níveis nas tensões de fase.

Figura 25 - Inversor trifásico multinível híbrido assimétrico proposto de nove níveis por fase



Analisando apenas uma fase, como foi feito até o momento neste capítulo, nota-se que na primeira célula a tensão do barramento CC é de $2.V_{cc}$ e nas duas últimas células há uma tensão igual a V_{cc} . Esta característica é que dá o nome “assimétrico” ao inversor. Este

inversor é híbrido porque os dispositivos de cada célula devem ser diferentes, uma vez que a tensão suportada por cada dispositivo varia entre as células, como também pode variar a frequência de comutação das chaves.

Como este inversor possui três células ponte-H em cada fase, a relação dos estados de chaveamento é a mesma do inversor simétrico de sete níveis (se obtém sessenta e quatro combinações) ($4^3 = 64$), porém, o que altera é a tensão de fase (V_{an}) resultante. Todas as combinações de chaveamento por fase, em função dos valores da tensão de fase V_{an} , estão divulgadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis organizados em função de V_{an}

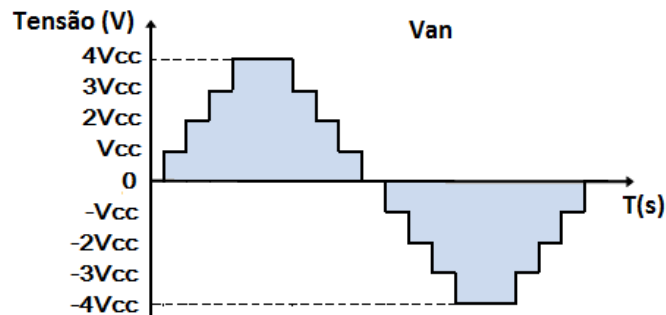
Nº de combinações	Célula 1 (S1,S3) Símbolo	Tensão na Célula 1 (V_{C1})	Célula 2 (S5,S7) Símbolo	Tensão na Célula 2 (V_{C2})	Célula 3 (S9,S11) Símbolo	Tensão na Célula 3 (V_{C3})	Tensão de fase (V_{an})
1	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+4Vcc
2	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+3Vcc
3	(1,0) P	+2Vcc	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	+3Vcc
4	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(0,0) O1	0	+3Vcc
5	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(1,1) O2	0	+3Vcc
6	(1,0) P	+2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(1,0) P	+Vcc	+2Vcc
7	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	+2Vcc
8	(1,0) P	+2Vcc	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	+2Vcc
9	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	+2Vcc
10	(1,0) P	+2Vcc	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	+2Vcc
11	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(0,1) N	-Vcc	+2Vcc
12	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+2Vcc
13	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+2Vcc
14	(1,0) P	+2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,0) O1	0	+Vcc
15	(1,0) P	+2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(1,1) O2	0	+Vcc
16	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	+Vcc
17	(1,0) P	+2Vcc	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	+Vcc
18	(0,0) O1	0	(1,0) P	0	(0,0) O1	+Vcc	+Vcc
19	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	(1,1) O2	0	+Vcc
20	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	(1,1) O2	0	+Vcc

Nº de combinações	Célula 1 (S1,S3) Símbolo	Tensão na Célula 1 (V _{C1})	Célula 2 (S5,S7) Símbolo	Tensão na Célula 2 (V _{C2})	Célula 3 (S9,S11) Símbolo	Tensão na Célula 3 (V _{C3})	Tensão de fase (V _{an})
21	(1,1) O2	0	(1,0) P	+V _{cc}	(0,0) O1	0	+V _{cc}
22	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(1,0) P	+V _{cc}	+V _{cc}
23	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(1,0) P	+V _{cc}	+V _{cc}
24	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(1,0) P	+V _{cc}	+V _{cc}
25	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(1,0) P	+V _{cc}	+V _{cc}
26	(1,0) P	+2V _{cc}	(0,1) N	-V _{cc}	(0,1) N	-V _{cc}	0
27	(0,0) O1	0	(0,1) N	-V _{cc}	(1,0) P	+V _{cc}	0
28	(1,1) O2	0	(0,1) N	-V _{cc}	(1,0) P	+V _{cc}	0
29	(0,0) O1	0	(1,0) P	+V _{cc}	(0,1) N	-V _{cc}	0
30	(1,1) O2	0	(1,0) P	+V _{cc}	(0,1) N	-V _{cc}	0
31	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	0
32	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	0
33	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	0
34	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	0
35	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	0
36	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	0
37	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	0
38	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	0
39	(0,1) N	-2V _{cc}	(1,0) P	+V _{cc}	(1,0) P	+V _{cc}	0
40	(0,0) O1	0	(0,1) N	-V _{cc}	(0,0) O1	0	-V _{cc}
41	(1,1) O2	0	(0,1) N	-V _{cc}	(1,1) O2	0	-V _{cc}
42	(0,0) O1	0	(0,1) N	-V _{cc}	(1,1) O2	0	-V _{cc}
43	(1,1) O2	0	(0,1) N	-V _{cc}	(0,0) O1	0	-V _{cc}
44	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,1) N	-V _{cc}	-V _{cc}
45	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(0,1) N	-V _{cc}	-V _{cc}
46	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(0,1) N	-V _{cc}	-V _{cc}
47	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(0,1) N	-V _{cc}	-V _{cc}
48	(0,1) N	-2V _{cc}	(1,0) P	+V _{cc}	(0,0) O1	0	-V _{cc}
49	(0,1) N	-2V _{cc}	(1,0) P	+V _{cc}	(1,1) O2	0	-V _{cc}
50	(0,1) N	-2V _{cc}	(0,0) O1	0	(1,0) P	+V _{cc}	-V _{cc}
51	(0,1) N	-2V _{cc}	(1,1) O2	0	(1,0) P	+V _{cc}	-V _{cc}

Nº de combinações	Célula 1 (S1,S3) Símbolo	Tensão na Célula 1 (V_{C1})	Célula 2 (S5,S7) Símbolo	Tensão na Célula 2 (V_{C2})	Célula 3 (S9,S11) Símbolo	Tensão na Célula 3 (V_{C3})	Tensão de fase (V_{an})
52	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-2Vcc
53	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-2Vcc
54	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(1,0) P	+Vcc	-2Vcc
55	(0,1) N	-2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(0,1) N	-Vcc	-2Vcc
56	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	-2Vcc
57	(0,1) N	-2Vcc	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	-2Vcc
58	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	-2Vcc
59	(0,1) N	-2Vcc	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	-2Vcc
60	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,0) O1	0	-3Vcc
61	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(1,1) O2	0	-3Vcc
62	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-3Vcc
63	(0,1) N	-2Vcc	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	-3Vcc
64	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-4Vcc

Percebe-se pelos resultados da Tabela 6 que este inversor assimétrico consegue variar nove valores da tensão de fase (V_{an}), sendo seus valores igual a: $+4V_{cc}$, $+3V_{cc}$, $+2V_{cc}$, $+V_{cc}$, 0 , $-V_{cc}$, $-2V_{cc}$, $-3V_{cc}$, $-4V_{cc}$. Já o inversor simétrico com três células (Figura 24) atinge apenas sete níveis de tensão em V_{an} e, esse resultado de nove níveis foi obtido em um inversor simétrico utilizando quatro células por fase (Figura 10). Desta maneira, com um inversor multinível assimétrico, se consegue obter o mesmo número de níveis de um inversor simétrico, porém, com menos células. Este fato implica em redução de componentes e custo na construção do inversor. Na Figura 26 está representada a tensão de fase (V_{an}) do inversor assimétrico de nove níveis.

Figura 26 - Sinal de saída de tensão de uma fase do inversor assimétrico de nove níveis



Através da análise de uma das fases verifica-se vantagens do inversor assimétrico de nove níveis em relação aos inversores simétricos de sete e de nove níveis. Desta maneira foram desenvolvidas as etapas da modulação *space vector* (SV) para o inversor proposto, sendo que, neste momento é interessante relembrar os passos da modulação SV, que são:

1. definição dos estados de chaveamento (espaço tridimensional);
2. definição dos vetores de comutação no plano α - β ;
3. identificação dos planos limites;
4. identificação dos planos de separação;
5. obtenção das matrizes de decomposição e;
6. definição da sequência de comutação.

Logo, para o desenvolvimento da modulação SV para o inversor de nove níveis proposto, foi indispensável listar todos os estados de comutação (combinações de chaveamento), considerando as três fases do inversor assimétrico.

3.1. DEFINIÇÃO DOS ESTADOS DE CHAVEAMENTO DAS TRÊS FASES DO INVERSOR ASSIMÉTRICO (ESPAÇO TRIIMENSIONAL) DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO

Os sessenta e quatro resultados da Tabela 6 representam as combinações de apenas uma fase de um inversor assimétrico de nove níveis. Sendo assim, utilizando os estados das três fases, o resultado é de 262144 combinações (64^3). Este valor alto significa que um único nível do inversor pode ser gerado por vários estados de chaveamento. Então, para viabilizar o desenvolvimento da estratégia *space vector*, foi necessário reduzir o número de estados por fase. Esta redução teve como intenção fazer com que apenas uma combinação representasse um dos nove níveis por fase. Assim, primeiramente, foram excluídos da Tabela 6 os estados que geravam uma energia circulante, o que significa que a corrente circula entre células em uma mesma fase e não é fornecida à carga, gerando a redução do fator de potência. Ou seja, foram extraídos aqueles em que haviam sinais positivo e negativo das tensões das células (V_{C1} , V_{C2} , V_{C3}) na mesma combinação, como, por exemplo, a combinação número 6 da Tabela 6, que possui: $V_{C1} = P (+2V_{cc})$, $V_{C2} = N (-V_{cc})$ e $V_{C3} = P (+V_{cc})$. Dessa forma, como há os dois sinais (positivo e negativo) nesta combinação, logo esta foi retirada da tabela.

Assim, os números das combinações 6, 11, 14, 15, 16, 17, 26, 27, 28, 29, 30, 39, 48, 49, 50, 51, 54 e 55 foram excluídas, restando quarenta e seis estados, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Primeira redução dos estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis

Nº de combinações	Célula 1 (S1,S3) Símbolo	Tensão na Célula 1 (V _{C1})	Célula 2 (S5,S7) Símbolo	Tensão na Célula 2 (V _{C2})	Célula 3 (S9,S11) Símbolo	Tensão na Célula 3 (V _{C3})	Tensão de fase (V _{an})
1	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+4Vcc
2	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+3Vcc
3	(1,0) P	+2Vcc	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	+3Vcc
4	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(0,0) O1	0	+3Vcc
5	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(1,1) O2	0	+3Vcc
6	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	+2Vcc
7	(1,0) P	+2Vcc	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	+2Vcc
8	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	+2Vcc
9	(1,0) P	+2Vcc	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	+2Vcc
10	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+2Vcc
11	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+2Vcc
12	(0,0) O1	0	(1,0) P	0	(0,0) O1	+Vcc	+Vcc
13	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	(1,1) O2	0	+Vcc
14	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	(1,1) O2	0	+Vcc
15	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	(0,0) O1	0	+Vcc
16	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+Vcc
17	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	+Vcc
18	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(1,0) P	+Vcc	+Vcc
19	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+Vcc
20	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	0
21	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	0
22	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	0
23	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	0
24	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	0
25	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	0
26	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	0
27	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	0

Nº de combinações	Célula 1 (S1,S3) Símbolo	Tensão na Célula 1 (V_{C1})	Célula 2 (S5,S7) Símbolo	Tensão na Célula 2 (V_{C2})	Célula 3 (S9,S11) Símbolo	Tensão na Célula 3 (V_{C3})	Tensão de fase (V_{an})
28	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	(0,0) O1	0	-Vcc
29	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	(1,1) O2	0	-Vcc
30	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	(1,1) O2	0	-Vcc
31	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	(0,0) O1	0	-Vcc
32	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-Vcc
33	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	-Vcc
34	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	-Vcc
35	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-Vcc
36	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-2Vcc
37	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-2Vcc
38	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	-2Vcc
39	(0,1) N	-2Vcc	(1,1) O2	0	(1,1) O2	0	-2Vcc
40	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(1,1) O2	0	-2Vcc
41	(0,1) N	-2Vcc	(1,1) O2	0	(0,0) O1	0	-2Vcc
42	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,0) O1	0	-3Vcc
43	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(1,1) O2	0	-3Vcc
44	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-3Vcc
45	(0,1) N	-2Vcc	(1,1) O2	0	(0,1) N	-Vcc	-3Vcc
46	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-4Vcc

Outro método para reduzir mais os estados de chaveamento foi utilizar apenas um estado de chaveamento que resultasse em zero volt, uma vez que pode-se obter zero volt com duas opções (O1 e O2), conforme pode-se identificar na combinação número 2 e 3 da Tabela 5. Sendo assim, foi escolhida a comutação das chaves inferiores da células ponte-H, ou seja, as chaves superiores devem estar desligadas = O1 (0,0). Assim, foram retiradas da Tabela 7 quaisquer combinações V_{C1} , V_{C2} ou V_{C3} que tinham uma das chaves em O2 (1,1). Por exemplo, o nível que possui $V_{an} = -3V_{cc}$, que foi gerado pelas combinações 42, 43, 44 e 45 na Tabela 7, terá após esta segunda simplificação, apenas duas possibilidades (42 e 44), as outras duas (43 e 45) serão retiradas. Desta maneira foram excluídas da Tabela 7 as linhas: 3, 5, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 41,

43, 45. Retirando estas trinta e uma linhas, as quinze combinações restantes estão representadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Segunda redução dos estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis

Nº de combinações	Célula 1 (S1,S3) Símbolo	Tensão na Célula 1 (V_{C1})	Célula 2 (S5,S7) Símbolo	Tensão na Célula 2 (V_{C2})	Célula 3 (S9,S11) Símbolo	Tensão na Célula 3 (V_{C3})	Tensão de fase (V_{an})
1	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+4Vcc
2	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+3Vcc
3	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(0,0) O1	0	+3Vcc
4	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	+2Vcc
5	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+2Vcc
6	(0,0) O1	0	(1,0) P	0	(0,0) O1	+Vcc	+Vcc
7	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+Vcc
8	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	0
9	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	(0,0) O1	0	-Vcc
10	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-Vcc
11	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-2Vcc
12	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	-2Vcc
13	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,0) O1	0	-3Vcc
14	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-3Vcc
15	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-4Vcc

A última redução das combinações da tensão V_{an} foi realizada para que cada nível de tensão tivesse apenas uma combinação. Desta forma, foram eliminadas da Tabela 8 as linhas: 3, 4, 6, 9, 12 e 13. Neste caso, o critério de escolha foi realizado de forma aleatória, ou seja, não houve critério de seleção devido os valores de tensão de cada célula.

A Tabela 9 mostra os resultados finais das nove possibilidades de chaveamento escolhidas da tensão de fase V_{an} . Desta maneira, foi possível reduzir um estado de chaveamento para cada nível.

Tabela 9 - Última redução dos estados de chaveamento de três células ponte-H e tensão de fase de um inversor assimétrico de nove níveis

Nº de comb.	Célula 1 (S1,S3) Símbolo	Tensão na Célula 1 (V_{C1})	Célula 2 (S5,S7) Símbolo	Tensão na Célula 2 (V_{C2})	Célula 3 (S9,S11) Símbolo	Tensão na Célula 3 (V_{C3})	Tensão de fase (V_{an})	Nível da fase (V_{an})
1	(1,0) P	+2Vcc	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+4Vcc	N1
2	(1,0) P	+2Vcc	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+3Vcc	N2
3	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	(1,0) P	+Vcc	+2Vcc	N3
4	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(1,0) P	+Vcc	+Vcc	N4
5	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	0	N5
6	(0,0) O1	0	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-Vcc	N6
7	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-2Vcc	N7
8	(0,1) N	-2Vcc	(0,0) O1	0	(0,1) N	-Vcc	-3Vcc	N8
9	(0,1) N	-2Vcc	(0,1) N	-Vcc	(0,1) N	-Vcc	-4Vcc	N9

Com esta redução para nove combinações por fase, o inversor trifásico originou setecentos e vinte e nove (729) estados possível (9^3), lembrando que no início eram 262144 combinações, ou seja, desejou-se utilizar menos de 0,28% das combinações possíveis que o inversor permite. O próximo passo foi definir todas as combinações possíveis do inversor assimétrico de nove níveis, isto é, todos os setecentos e vinte e nove (729) estados. A Tabela 10 mostra toda a relação dos estados para o sistema completo, ou seja, considerando as três fases, a partir dos níveis N1 a N9. Esta tabela também indica as tensões de fase (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) e as tensões de linha (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) geradas pelas comutações. Os valores das tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} , foram calculadas considerando as fórmulas: $V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$; $V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$ e $V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$.

Como exemplo, no Nº de combinação 6 da Tabela 10, V_{ab} é igual a zero, pois V_{an} (+4Vcc) - V_{bn} (+4Vcc) resulta em 0Vcc. V_{bc} é igual a 5Vcc, pois V_{bn} (+4Vcc) - V_{cn} (-Vcc) resulta em +5Vcc. Por fim, V_{ca} é igual a -5Vcc, pois V_{cn} (-Vcc) - V_{an} (+4Vcc) resulta em -5Vcc.

Tabela 10 - Todos os 729 estados de chaveamento das três fases, tensão de fase e tensão de linha de um inversor assimétrico de nove níveis

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
1	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	0	0	0
2	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	0	1	-1
3	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	0	2	-2
4	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	0	3	-3
5	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	0	4	-4
6	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	0	5	-5
7	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	0	6	-6
8	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	0	7	-7
9	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	0	8	-8
10	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	1	-1	0
11	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	1	0	-1
12	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	1	1	-2
13	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	1	2	-3
14	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	1	3	-4
15	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	1	4	-5
16	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	1	5	-6
17	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	1	6	-7
18	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	1	7	-8
19	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	2	-2	0
20	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	2	-1	-1
21	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	2	0	-2
22	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	2	1	-3
23	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	2	2	-4
24	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	2	3	-5
25	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	2	4	-6
26	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	2	5	-7
27	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	2	6	-8
28	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	3	-3	0
29	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	3	-2	-1
30	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	3	-1	-2
31	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	3	0	-3

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
32	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N5	0	3	1	-4
33	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	3	2	-5
34	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	3	3	-6
35	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	3	4	-7
36	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	3	5	-8
37	N1	+4Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	4	-4	0
38	N1	+4Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	4	-3	-1
39	N1	+4Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	4	-2	-2
40	N1	+4Vcc	N5	0	N4	+Vcc	4	-1	-3
41	N1	+4Vcc	N5	0	N5	0	4	0	-4
42	N1	+4Vcc	N5	0	N6	-Vcc	4	1	-5
43	N1	+4Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	4	2	-6
44	N1	+4Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	4	3	-7
45	N1	+4Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	4	4	-8
46	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	5	-5	0
47	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	5	-4	-1
48	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	5	-3	-2
49	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	5	-2	-3
50	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N5	0	5	-1	-4
51	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	5	0	-5
52	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	5	1	-6
53	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	5	2	-7
54	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	5	3	-8
55	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	6	-6	0
56	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	6	-5	-1
57	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	6	-4	-2
58	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	6	-3	-3
59	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	6	-2	-4
60	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	6	-1	-5
61	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	6	0	-6
62	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	6	1	-7
63	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	6	2	-8
64	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	7	-7	0

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
65	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	7	-6	-1
66	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	7	-5	-2
67	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	7	-4	-3
68	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	7	-3	-4
69	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	7	-2	-5
70	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	7	-1	-6
71	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	7	0	-7
72	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	7	1	-8
73	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	8	-8	0
74	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	8	-7	-1
75	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	8	-6	-2
76	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	8	-5	-3
77	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	8	-4	-4
78	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	8	-3	-5
79	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	8	-2	-6
80	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	8	-1	-7
81	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	8	0	-8
82	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-1	0	1
83	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-1	1	0
84	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-1	2	-1
85	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-1	3	-2
86	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	-1	4	-3
87	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-1	5	-4
88	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-1	6	-5
89	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-1	7	-6
90	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-1	8	-7
91	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	0	-1	1
92	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	0	0	0
93	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	0	1	-1
94	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	0	2	-2
95	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	0	3	-3
96	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	0	4	-4
97	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	0	5	-5

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
98	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	0	6	-6
99	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	0	7	-7
100	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	1	-2	1
101	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	1	-1	0
102	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	1	0	-1
103	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	1	1	-2
104	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	1	2	-3
105	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	1	3	-4
106	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	1	4	-5
107	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	1	5	-6
108	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	1	6	-7
109	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	2	-3	1
110	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	2	-2	0
111	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	2	-1	-1
112	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	2	0	-2
113	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N5	0	2	1	-3
114	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	2	2	-4
115	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	2	3	-5
116	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	2	4	-6
117	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	2	5	-7
118	N2	+3Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	3	-4	1
119	N2	+3Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	3	-3	0
120	N2	+3Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	3	-2	-1
121	N2	+3Vcc	N5	0	N4	+Vcc	3	-1	-2
122	N2	+3Vcc	N5	0	N5	0	3	0	-3
123	N2	+3Vcc	N5	0	N6	-Vcc	3	1	-4
124	N2	+3Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	3	2	-5
125	N2	+3Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	3	3	-6
126	N2	+3Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	3	4	-7
127	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	4	-5	1
128	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	4	-4	0
129	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	4	-3	-1
130	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	4	-2	-2

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
131	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N5	0	4	-1	-3
132	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	4	0	-4
133	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	4	1	-5
134	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	4	2	-6
135	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	4	3	-7
136	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	5	-6	1
137	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	5	-5	0
138	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	5	-4	-1
139	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	5	-3	-2
140	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	5	-2	-3
141	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	5	-1	-4
142	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	5	0	-5
143	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	5	1	-6
144	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	5	2	-7
145	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	6	-7	1
146	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	6	-6	0
147	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	6	-5	-1
148	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	6	-4	-2
149	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	6	-3	-3
150	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	6	-2	-4
151	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	6	-1	-5
152	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	6	0	-6
153	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	6	1	-7
154	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	7	-8	1
155	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	7	-7	0
156	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	7	-6	-1
157	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	7	-5	-2
158	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	7	-4	-3
159	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	7	-3	-4
160	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	7	-2	-5
161	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	7	-1	-6
162	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	7	0	-7
163	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-2	0	2

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
164	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-2	1	1
165	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-2	2	0
166	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-2	3	-1
167	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	-2	4	-2
168	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-2	5	-3
169	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-2	6	-4
170	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-2	7	-5
171	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-2	8	-6
172	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	-1	-1	2
173	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	-1	0	1
174	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	-1	1	0
175	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	-1	2	-1
176	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	-1	3	-2
177	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	-1	4	-3
178	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	-1	5	-4
179	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	-1	6	-5
180	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	-1	7	-6
181	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	0	-2	2
182	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	0	-1	1
183	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	0	0	0
184	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	0	1	-1
185	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	0	2	-2
186	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	0	3	-3
187	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	0	4	-4
188	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	0	5	-5
189	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	0	6	-6
190	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	1	-3	2
191	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	1	-2	1
192	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	1	-1	0
193	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	1	0	-1
194	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N5	0	1	1	-2
195	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	1	2	-3
196	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	1	3	-4

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
197	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	1	4	-5
198	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	1	5	-6
199	N3	+2Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	2	-4	2
200	N3	+2Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	2	-3	1
201	N3	+2Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	2	-2	0
202	N3	+2Vcc	N5	0	N4	+Vcc	2	-1	-1
203	N3	+2Vcc	N5	0	N5	0	2	0	-2
204	N3	+2Vcc	N5	0	N6	-Vcc	2	1	-3
205	N3	+2Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	2	2	-4
206	N3	+2Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	2	3	-5
207	N3	+2Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	2	4	-6
208	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	3	-5	2
209	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	3	-4	1
210	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	3	-3	0
211	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	3	-2	-1
212	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N5	0	3	-1	-2
213	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	3	0	-3
214	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	3	1	-4
215	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	3	2	-5
216	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	3	3	-6
217	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	4	-6	2
218	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	4	-5	1
219	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	4	-4	0
220	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	4	-3	-1
221	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	4	-2	-2
222	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	4	-1	-3
223	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	4	0	-4
224	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	4	1	-5
225	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	4	2	-6
226	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	5	-7	2
227	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	5	-6	1
228	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	5	-5	0
229	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	5	-4	-1

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
230	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	5	-3	-2
231	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	5	-2	-3
232	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	5	-1	-4
233	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	5	0	-5
234	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	5	1	-6
235	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	6	-8	2
236	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	6	-7	1
237	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	6	-6	0
238	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	6	-5	-1
239	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	6	-4	-2
240	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	6	-3	-3
241	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	6	-2	-4
242	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	6	-1	-5
243	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	6	0	-6
244	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-3	0	3
245	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-3	1	2
246	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-3	2	1
247	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-3	3	0
248	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	-3	4	-1
249	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-3	5	-2
250	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-3	6	-3
251	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-3	7	-4
252	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-3	8	-5
253	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	-2	-1	3
254	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	-2	0	2
255	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	-2	1	1
256	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	-2	2	0
257	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	-2	3	-1
258	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	-2	4	-2
259	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	-2	5	-3
260	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	-2	6	-4
261	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	-2	7	-5
262	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	-1	-2	3

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
263	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	-1	-1	2
264	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	-1	0	1
265	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	-1	1	0
266	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	-1	2	-1
267	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	-1	3	-2
268	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	-1	4	-3
269	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	-1	5	-4
270	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	-1	6	-5
271	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	0	-3	3
272	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	0	-2	2
273	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	0	-1	1
274	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	0	0	0
275	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N5	0	0	1	-1
276	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	0	2	-2
277	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	0	3	-3
278	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	0	4	-4
279	N4	+Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	0	5	-5
280	N4	+Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	1	-4	3
281	N4	+Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	1	-3	2
282	N4	+Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	1	-2	1
283	N4	+Vcc	N5	0	N4	+Vcc	1	-1	0
284	N4	+Vcc	N5	0	N5	0	1	0	-1
285	N4	+Vcc	N5	0	N6	-Vcc	1	1	-2
286	N4	+Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	1	2	-3
287	N4	+Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	1	3	-4
288	N4	+Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	1	4	-5
289	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	2	-5	3
290	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	2	-4	2
291	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	2	-3	1
292	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	2	-2	0
293	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N5	0	2	-1	-1
294	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	2	0	-2
295	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	2	1	-3

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
296	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	2	2	-4
297	N4	+Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	2	3	-5
298	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	3	-6	3
299	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	3	-5	2
300	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	3	-4	1
301	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	3	-3	0
302	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	3	-2	-1
303	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	3	-1	-2
304	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	3	0	-3
305	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	3	1	-4
306	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	3	2	-5
307	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	4	-7	3
308	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	4	-6	2
309	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	4	-5	1
310	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	4	-4	0
311	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	4	-3	-1
312	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	4	-2	-2
313	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	4	-1	-3
314	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	4	0	-4
315	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	4	1	-5
316	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	5	-8	3
317	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	5	-7	2
318	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	5	-6	1
319	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	5	-5	0
320	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	5	-4	-1
321	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	5	-3	-2
322	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	5	-2	-3
323	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	5	-1	-4
324	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	5	0	-5
325	N5	0	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-4	0	4
326	N5	0	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-4	1	3
327	N5	0	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-4	2	2
328	N5	0	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-4	3	1

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
329	N5	0	N1	+4Vcc	N5	0	-4	4	0
330	N5	0	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-4	5	-1
331	N5	0	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-4	6	-2
332	N5	0	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-4	7	-3
333	N5	0	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-4	8	-4
334	N5	0	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	-3	-1	4
335	N5	0	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	-3	0	3
336	N5	0	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	-3	1	2
337	N5	0	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	-3	2	1
338	N5	0	N2	+3Vcc	N5	0	-3	3	0
339	N5	0	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	-3	4	-1
340	N5	0	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	-3	5	-2
341	N5	0	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	-3	6	-3
342	N5	0	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	-3	7	-4
343	N5	0	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	-2	-2	4
344	N5	0	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	-2	-1	3
345	N5	0	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	-2	0	2
346	N5	0	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	-2	1	1
347	N5	0	N3	+2Vcc	N5	0	-2	2	0
348	N5	0	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	-2	3	-1
349	N5	0	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	-2	4	-2
350	N5	0	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	-2	5	-3
351	N5	0	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	-2	6	-4
352	N5	0	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	-1	-3	4
353	N5	0	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	-1	-2	3
354	N5	0	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	-1	-1	2
355	N5	0	N4	+Vcc	N4	+Vcc	-1	0	1
356	N5	0	N4	+Vcc	N5	0	-1	1	0
357	N5	0	N4	+Vcc	N6	-Vcc	-1	2	-1
358	N5	0	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	-1	3	-2
359	N5	0	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	-1	4	-3
360	N5	0	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	-1	5	-4
361	N5	0	N5	0	N1	+4Vcc	0	-4	4

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
362	N5	0	N5	0	N2	+3Vcc	0	-3	3
363	N5	0	N5	0	N3	+2Vcc	0	-2	2
364	N5	0	N5	0	N4	+Vcc	0	-1	1
365	N5	0	N5	0	N5	0	0	0	0
366	N5	0	N5	0	N6	-Vcc	0	1	-1
367	N5	0	N5	0	N7	-2Vcc	0	2	-2
368	N5	0	N5	0	N8	-3Vcc	0	3	-3
369	N5	0	N5	0	N9	-4Vcc	0	4	-4
370	N5	0	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	1	-5	4
371	N5	0	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	1	-4	3
372	N5	0	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	1	-3	2
373	N5	0	N6	-Vcc	N4	+Vcc	1	-2	1
374	N5	0	N6	-Vcc	N5	0	1	-1	0
375	N5	0	N6	-Vcc	N6	-Vcc	1	0	-1
376	N5	0	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	1	1	-2
377	N5	0	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	1	2	-3
378	N5	0	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	1	3	-4
379	N5	0	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	2	-6	4
380	N5	0	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	2	-5	3
381	N5	0	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	2	-4	2
382	N5	0	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	2	-3	1
383	N5	0	N7	-2Vcc	N5	0	2	-2	0
384	N5	0	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	2	-1	-1
385	N5	0	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	2	0	-2
386	N5	0	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	2	1	-3
387	N5	0	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	2	2	-4
388	N5	0	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	3	-7	4
389	N5	0	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	3	-6	3
390	N5	0	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	3	-5	2
391	N5	0	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	3	-4	1
392	N5	0	N8	-3Vcc	N5	0	3	-3	0
393	N5	0	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	3	-2	-1
394	N5	0	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	3	-1	-2

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
395	N5	0	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	3	0	-3
396	N5	0	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	3	1	-4
397	N5	0	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	4	-8	4
398	N5	0	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	4	-7	3
399	N5	0	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	4	-6	2
400	N5	0	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	4	-5	1
401	N5	0	N9	-4Vcc	N5	0	4	-4	0
402	N5	0	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	4	-3	-1
403	N5	0	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	4	-2	-2
404	N5	0	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	4	-1	-3
405	N5	0	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	4	0	-4
406	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-5	0	5
407	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-5	1	4
408	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-5	2	3
409	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-5	3	2
410	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	-5	4	1
411	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-5	5	0
412	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-5	6	-1
413	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-5	7	-2
414	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-5	8	-3
415	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	-4	-1	5
416	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	-4	0	4
417	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	-4	1	3
418	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	-4	2	2
419	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	-4	3	1
420	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	-4	4	0
421	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	-4	5	-1
422	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	-4	6	-2
423	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	-4	7	-3
424	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	-3	-2	5
425	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	-3	-1	4
426	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	-3	0	3
427	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	-3	1	2

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
428	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	-3	2	1
429	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	-3	3	0
430	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	-3	4	-1
431	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	-3	5	-2
432	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	-3	6	-3
433	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	-2	-3	5
434	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	-2	-2	4
435	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	-2	-1	3
436	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	-2	0	2
437	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N5	0	-2	1	1
438	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	-2	2	0
439	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	-2	3	-1
440	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	-2	4	-2
441	N6	-Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	-2	5	-3
442	N6	-Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	-1	-4	5
443	N6	-Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	-1	-3	4
444	N6	-Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	-1	-2	3
445	N6	-Vcc	N5	0	N4	+Vcc	-1	-1	2
446	N6	-Vcc	N5	0	N5	0	-1	0	1
447	N6	-Vcc	N5	0	N6	-Vcc	-1	1	0
448	N6	-Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	-1	2	-1
449	N6	-Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	-1	3	-2
450	N6	-Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	-1	4	-3
451	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	0	-5	5
452	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	0	-4	4
453	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	0	-3	3
454	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	0	-2	2
455	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N5	0	0	-1	1
456	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	0	0	0
457	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	0	1	-1
458	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	0	2	-2
459	N6	-Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	0	3	-3
460	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	1	-6	5

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
461	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	1	-5	4
462	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	1	-4	3
463	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	1	-3	2
464	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	1	-2	1
465	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	1	-1	0
466	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	1	0	-1
467	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	1	1	-2
468	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	1	2	-3
469	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	2	-7	5
470	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	2	-6	4
471	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	2	-5	3
472	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	2	-4	2
473	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	2	-3	1
474	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	2	-2	0
475	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	2	-1	-1
476	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	2	0	-2
477	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	2	1	-3
478	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	3	-8	5
479	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	3	-7	4
480	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	3	-6	3
481	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	3	-5	2
482	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	3	-4	1
483	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	3	-3	0
484	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	3	-2	-1
485	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	3	-1	-2
486	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	3	0	-3
487	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-6	0	6
488	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-6	1	5
489	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-6	2	4
490	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-6	3	3
491	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	-6	4	2
492	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-6	5	1
493	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-6	6	0

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
494	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-6	7	-1
495	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-6	8	-2
496	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	-5	-1	6
497	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	-5	0	5
498	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	-5	1	4
499	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	-5	2	3
500	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	-5	3	2
501	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	-5	4	1
502	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	-5	5	0
503	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	-5	6	-1
504	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	-5	7	-2
505	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	-4	-2	6
506	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	-4	-1	5
507	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	-4	0	4
508	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	-4	1	3
509	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	-4	2	2
510	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	-4	3	1
511	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	-4	4	0
512	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	-4	5	-1
513	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	-4	6	-2
514	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	-3	-3	6
515	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	-3	-2	5
516	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	-3	-1	4
517	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	-3	0	3
518	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N5	0	-3	1	2
519	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	-3	2	1
520	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	-3	3	0
521	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	-3	4	-1
522	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	-3	5	-2
523	N7	-2Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	-2	-4	6
524	N7	-2Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	-2	-3	5
525	N7	-2Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	-2	-2	4
526	N7	-2Vcc	N5	0	N4	+Vcc	-2	-1	3

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
527	N7	-2Vcc	N5	0	N5	0	-2	0	2
528	N7	-2Vcc	N5	0	N6	-Vcc	-2	1	1
529	N7	-2Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	-2	2	0
530	N7	-2Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	-2	3	-1
531	N7	-2Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	-2	4	-2
532	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	-1	-5	6
533	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	-1	-4	5
534	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	-1	-3	4
535	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	-1	-2	3
536	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N5	0	-1	-1	2
537	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	-1	0	1
538	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	-1	1	0
539	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	-1	2	-1
540	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	-1	3	-2
541	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	0	-6	6
542	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	0	-5	5
543	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	0	-4	4
544	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	0	-3	3
545	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	0	-2	2
546	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	0	-1	1
547	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	0	0	0
548	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	0	1	-1
549	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	0	2	-2
550	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	1	-7	6
551	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	1	-6	5
552	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	1	-5	4
553	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	1	-4	3
554	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	1	-3	2
555	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	1	-2	1
556	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	1	-1	0
557	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	1	0	-1
558	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	1	1	-2
559	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	2	-8	6

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
560	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	2	-7	5
561	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	2	-6	4
562	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	2	-5	3
563	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	2	-4	2
564	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	2	-3	1
565	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	2	-2	0
566	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	2	-1	-1
567	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	2	0	-2
568	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-7	0	7
569	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-7	1	6
570	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-7	2	5
571	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-7	3	4
572	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	-7	4	3
573	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-7	5	2
574	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-7	6	1
575	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-7	7	0
576	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-7	8	-1
577	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	-6	-1	7
578	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	-6	0	6
579	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	-6	1	5
580	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	-6	2	4
581	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	-6	3	3
582	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	-6	4	2
583	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	-6	5	1
584	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	-6	6	0
585	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	-6	7	-1
586	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	-5	-2	7
587	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	-5	-1	6
588	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	-5	0	5
589	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	-5	1	4
590	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	-5	2	3
591	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	-5	3	2
592	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	-5	4	1

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
593	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	-5	5	0
594	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	-5	6	-1
595	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	-4	-3	7
596	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	-4	-2	6
597	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	-4	-1	5
598	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	-4	0	4
599	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N5	0	-4	1	3
600	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	-4	2	2
601	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	-4	3	1
602	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	-4	4	0
603	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	-4	5	-1
604	N8	-3Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	-3	-4	7
605	N8	-3Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	-3	-3	6
606	N8	-3Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	-3	-2	5
607	N8	-3Vcc	N5	0	N4	+Vcc	-3	-1	4
608	N8	-3Vcc	N5	0	N5	0	-3	0	3
609	N8	-3Vcc	N5	0	N6	-Vcc	-3	1	2
610	N8	-3Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	-3	2	1
611	N8	-3Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	-3	3	0
612	N8	-3Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	-3	4	-1
613	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	-2	-5	7
614	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	-2	-4	6
615	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	-2	-3	5
616	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	-2	-2	4
617	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N5	0	-2	-1	3
618	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	-2	0	2
619	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	-2	1	1
620	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	-2	2	0
621	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	-2	3	-1
622	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	-1	-6	7
623	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	-1	-5	6
624	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	-1	-4	5
625	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	-1	-3	4

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
626	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	-1	-2	3
627	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	-1	-1	2
628	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	-1	0	1
629	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	-1	1	0
630	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	-1	2	-1
631	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	0	-7	7
632	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	0	-6	6
633	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	0	-5	5
634	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	0	-4	4
635	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	0	-3	3
636	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	0	-2	2
637	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	0	-1	1
638	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	0	0	0
639	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	0	1	-1
640	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	1	-8	7
641	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	1	-7	6
642	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	1	-6	5
643	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	1	-5	4
644	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	1	-4	3
645	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	1	-3	2
646	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	1	-2	1
647	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	1	-1	0
648	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	1	0	-1
649	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N1	+4Vcc	-8	0	8
650	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N2	+3Vcc	-8	1	7
651	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N3	+2Vcc	-8	2	6
652	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N4	+Vcc	-8	3	5
653	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N5	0	-8	4	4
654	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N6	-Vcc	-8	5	3
655	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N7	-2Vcc	-8	6	2
656	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N8	-3Vcc	-8	7	1
657	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	N9	-4Vcc	-8	8	0
658	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N1	+4Vcc	-7	-1	8

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
659	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N2	+3Vcc	-7	0	7
660	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N3	+2Vcc	-7	1	6
661	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N4	+Vcc	-7	2	5
662	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N5	0	-7	3	4
663	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N6	-Vcc	-7	4	3
664	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N7	-2Vcc	-7	5	2
665	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N8	-3Vcc	-7	6	1
666	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	N9	-4Vcc	-7	7	0
667	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N1	+4Vcc	-6	-2	8
668	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N2	+3Vcc	-6	-1	7
669	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N3	+2Vcc	-6	0	6
670	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N4	+Vcc	-6	1	5
671	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N5	0	-6	2	4
672	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N6	-Vcc	-6	3	3
673	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N7	-2Vcc	-6	4	2
674	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N8	-3Vcc	-6	5	1
675	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	N9	-4Vcc	-6	6	0
676	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N1	+4Vcc	-5	-3	8
677	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N2	+3Vcc	-5	-2	7
678	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N3	+2Vcc	-5	-1	6
679	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N4	+Vcc	-5	0	5
680	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N5	0	-5	1	4
681	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N6	-Vcc	-5	2	3
682	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N7	-2Vcc	-5	3	2
683	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N8	-3Vcc	-5	4	1
684	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	N9	-4Vcc	-5	5	0
685	N9	-4Vcc	N5	0	N1	+4Vcc	-4	-4	8
686	N9	-4Vcc	N5	0	N2	+3Vcc	-4	-3	7
687	N9	-4Vcc	N5	0	N3	+2Vcc	-4	-2	6
688	N9	-4Vcc	N5	0	N4	+Vcc	-4	-1	5
689	N9	-4Vcc	N5	0	N5	0	-4	0	4
690	N9	-4Vcc	N5	0	N6	-Vcc	-4	1	3
691	N9	-4Vcc	N5	0	N7	-2Vcc	-4	2	2

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha V_{ab} (Vcc)	Tensão de linha V_{bc} (Vcc)	Tensão de linha V_{ca} (Vcc)
692	N9	-4Vcc	N5	0	N8	-3Vcc	-4	3	1
693	N9	-4Vcc	N5	0	N9	-4Vcc	-4	4	0
694	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N1	+4Vcc	-3	-5	8
695	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N2	+3Vcc	-3	-4	7
696	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N3	+2Vcc	-3	-3	6
697	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N4	+Vcc	-3	-2	5
698	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N5	0	-3	-1	4
699	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N6	-Vcc	-3	0	3
700	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N7	-2Vcc	-3	1	2
701	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N8	-3Vcc	-3	2	1
702	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	N9	-4Vcc	-3	3	0
703	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N1	+4Vcc	-2	-6	8
704	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N2	+3Vcc	-2	-5	7
705	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N3	+2Vcc	-2	-4	6
706	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N4	+Vcc	-2	-3	5
707	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N5	0	-2	-2	4
708	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N6	-Vcc	-2	-1	3
709	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N7	-2Vcc	-2	0	2
710	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N8	-3Vcc	-2	1	1
711	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	N9	-4Vcc	-2	2	0
712	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N1	+4Vcc	-1	-7	8
713	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N2	+3Vcc	-1	-6	7
714	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N3	+2Vcc	-1	-5	6
715	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N4	+Vcc	-1	-4	5
716	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N5	0	-1	-3	4
717	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N6	-Vcc	-1	-2	3
718	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N7	-2Vcc	-1	-1	2
719	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N8	-3Vcc	-1	0	1
720	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	N9	-4Vcc	-1	1	0
721	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N1	+4Vcc	0	-8	8
722	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N2	+3Vcc	0	-7	7
723	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N3	+2Vcc	0	-6	6
724	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N4	+Vcc	0	-5	5

Nº de comb. (vetores)	Nível da fase V_{an}	Tensão de fase V_{an}	Nível da fase V_{bn}	Tensão de fase V_{bn}	Nível da fase V_{cn}	Tensão de fase V_{cn}	Tensão de linha $V_{ab} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{bc} (V_{cc})$	Tensão de linha $V_{ca} (V_{cc})$
725	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N5	0	0	-4	4
726	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N6	-Vcc	0	-3	3
727	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N7	-2Vcc	0	-2	2
728	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N8	-3Vcc	0	-1	1
729	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	N9	-4Vcc	0	0	0

Para a continuidade da modulação *space vector*, todas as setecentos e vinte e nove (729) combinações referente as três fases do inversor assimétrico são consideradas vetores de comutação, os quais, utilizando seus valores de tensão V_{an} , V_{bn} e V_{cn} (vide Tabela 10) divididos por V_{cc} , foram projetadas em um espaço tridimensional “abc”, conforme a Figura 27. Percebe-se que as projeções no espaço tridimensional forma um cubo, condizente com a explicação da Figura 16, da mesma forma que, girando o cubo da Figura 27 é possível visualizar um hexágono, conforme as duas vistas (a) e (b) da Figura 28, em concordância com a explanação da Figura 18. No caso da Figura 28, o vetores ainda não foram projetados no plano.

Figura 27 - 729 combinações de chaveamento das três fases do inversor assimétrico projetadas em um espaço “abc” formando um cubo

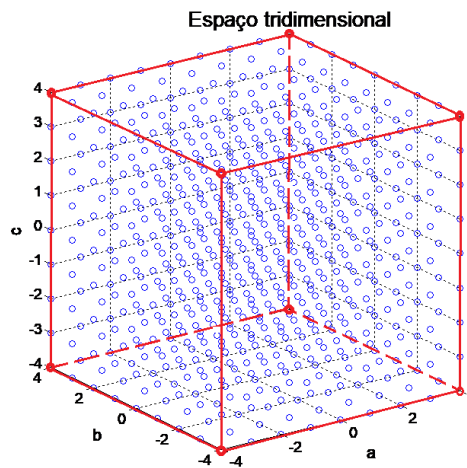
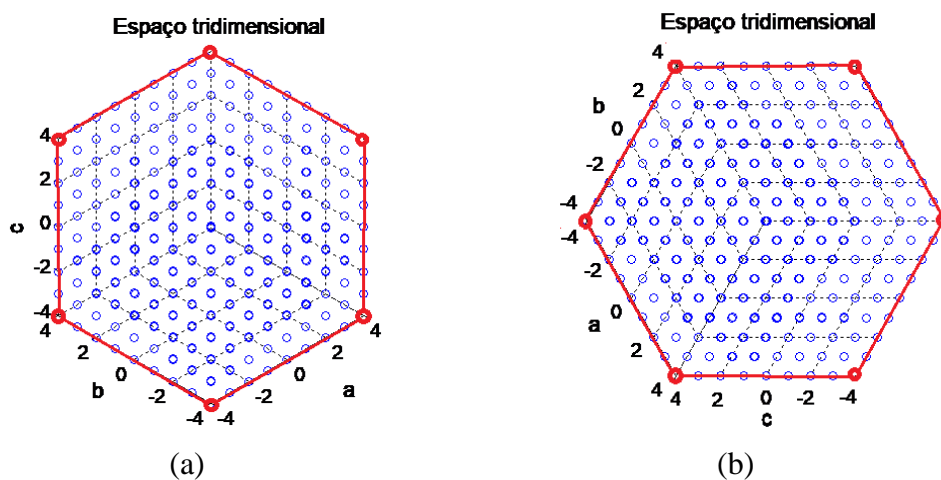


Figura 28 - Rotacionando as 729 combinações de chaveamento das três fases do inversor assimétrico projetadas em um espaço “abc” gerando um hexágono (a) vista 1; (b) vista 2



Para implementar a modulação SV, deve-se projetar esses pontos do espaço tridimensional em um plano.

3.2. DEFINIÇÃO DOS POSSÍVEIS VETORES DE COMUTAÇÃO NO PLANO α - β DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO

No subcapítulo anterior foram encontradas todas as combinações possíveis referentes às três fases do inversor assimétrico de nove níveis e, o próximo passo da estratégia *space vector*, visa projetar estes estados (pontos do gráfico tridimensional da Figura 27) em um plano, conhecido como plano α - β . Diante disso, foi necessário conhecer as coordenadas em α - β de cada um dos setecentos e vinte e nove (729) pontos (vetores). Para calcular os valores das coordenadas alpha (V_α) e beta (V_β) de cada vetor se aplica a equação (37), deduzida no Apêndice A, onde os valores de entrada do sistema (V_a , V_b e V_c) da referida equação são os valores das colunas das tensões de fase (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) da Tabela 10 divididos por V_{cc} . Logo, os valores utilizados em V_a , V_b e V_c foram -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 e 4, uma vez que estes indicam o valor dos níveis de tensão, que são os multiplicadores da tensão base do barramento CC (V_{cc}).

Para exemplificar a aplicação da transformada, foram calculadas as coordenadas α - β do vetor V_{ref} da segunda combinação da Tabela 10.

Exemplo: O vetor 2 (V_2), segundo a Tabela 10 (coluna N° de comb. = 2), possui os seguintes valores: $V_{an} = +4$; $V_{bn} = +4$ e $V_{cn} = +3$. Desta forma, aplicando a equação (37) e desenvolvendo-a conforme abaixo, tem-se o resultado das coordenadas (V_α) e (V_β) do vetor 2 no plano α - β em (1).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_{2\alpha} \\ V_{2\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Desenvolvendo:

$$\begin{bmatrix} V_{2\alpha} \\ V_{2\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} (1 \cdot 4) + \left(-\frac{1}{2} \cdot 4\right) + \left(-\frac{1}{2} \cdot 3\right) \\ (0 \cdot 4) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4\right) + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3\right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{2\alpha} \\ V_{2\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} (4) + (-2) + \left(-\frac{3}{2}\right) \\ (0) + (2 \cdot \sqrt{3}) + \left(-\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2}\right) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V2_\alpha \\ V2_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$
$$V2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T = [0,4082 \quad 0,7071]^T \quad (1)$$

Seguindo a Tabela 10 e aplicando a transformada (matriz de transformação) em todos os setecentos e vinte e nove (729) vetores, se encontram as coordenadas α - β no plano. Assim, as coordenadas de cada vetor estão representados na Tabela 11.

Tabela 11 - Todos os 729 estados de chaveamento das três fases do inversor assimétrico de nove níveis em coordenadas α - β

Vetor	Coordenada α (V_α)	Coordenada β (V_β)	Vetor	Coordenada α (V_α)	Coordenada β (V_β)	Vetor	Coordenada α (V_α)	Coordenada β (V_β)	Vetor	Coordenada α (V_α)	Coordenada β (V_β)	Vetor	Coordenada α (V_α)	Coordenada β (V_β)
V1	0,0000	0,0000	V147	2,8577	-3,5355	V293	1,2247	-0,7071	V439	-0,4082	2,1213	V585	-2,0412	4,9497
V2	0,4082	0,7071	V148	3,2660	-2,8284	V294	1,6330	0,0000	V440	0,0000	2,8284	V586	-4,8990	-1,4142
V3	0,8165	1,4142	V149	3,6742	-2,1213	V295	2,0412	0,7071	V441	0,4082	3,5355	V587	-4,4907	-0,7071
V4	1,2247	2,1213	V150	4,0825	-1,4142	V296	2,4495	1,4142	V442	-2,4495	-2,8284	V588	-4,0825	0,0000
V5	1,6330	2,8284	V151	4,4907	-0,7071	V297	2,8577	2,1213	V443	-2,0412	-2,1213	V589	-3,6742	0,7071
V6	2,0412	3,5355	V152	4,8990	0,0000	V298	0,0000	-4,2426	V444	-1,6330	-1,4142	V590	-3,2660	1,4142
V7	2,4495	4,2426	V153	5,3072	0,7071	V299	0,4082	-3,5355	V445	-1,2247	-0,7071	V591	-2,8577	2,1213
V8	2,8577	4,9497	V154	2,4495	-5,6569	V300	0,8165	-2,8284	V446	-0,8165	0,0000	V592	-2,4495	2,8284
V9	3,2660	5,6569	V155	2,8577	-4,9497	V301	1,2247	-2,1213	V447	-0,4082	0,7071	V593	-2,0412	3,5355
V10	0,4082	-0,7071	V156	3,2660	-4,2426	V302	1,6330	-1,4142	V448	0,0000	1,4142	V594	-1,6330	4,2426
V11	0,8165	0,0000	V157	3,6742	-3,5355	V303	2,0412	-0,7071	V449	0,4082	2,1213	V595	-4,4907	-2,1213
V12	1,2247	0,7071	V158	4,0825	-2,8284	V304	2,4495	0,0000	V450	0,8165	2,8284	V596	-4,0825	-1,4142
V13	1,6330	1,4142	V159	4,4907	-2,1213	V305	2,8577	0,7071	V451	-2,0412	-3,5355	V597	-3,6742	-0,7071
V14	2,0412	2,1213	V160	4,8990	-1,4142	V306	3,2660	1,4142	V452	-1,6330	-2,8284	V598	-3,2660	0,0000
V15	2,4495	2,8284	V161	5,3072	-0,7071	V307	0,4082	-4,9497	V453	-1,2247	-2,1213	V599	-2,8577	0,7071
V16	2,8577	3,5355	V162	5,7155	0,0000	V308	0,8165	-4,2426	V454	-0,8165	-1,4142	V600	-2,4495	1,4142
V17	3,2660	4,2426	V163	-1,6330	0,0000	V309	1,2247	-3,5355	V455	-0,4082	-0,7071	V601	-2,0412	2,1213
V18	3,6742	4,9497	V164	-1,2247	0,7071	V310	1,6330	-2,8284	V456	0,0000	0,0000	V602	-1,6330	2,8284
V19	0,8165	-1,4142	V165	-0,8165	1,4142	V311	2,0412	-2,1213	V457	0,4082	0,7071	V603	-1,2247	3,5355
V20	1,2247	-0,7071	V166	-0,4082	2,1213	V312	2,4495	-1,4142	V458	0,8165	1,4142	V604	-4,0825	-2,8284
V21	1,6330	0,0000	V167	0,0000	2,8284	V313	2,8577	-0,7071	V459	1,2247	2,1213	V605	-3,6742	-2,1213
V22	2,0412	0,7071	V168	0,4082	3,5355	V314	3,2660	0,0000	V460	-1,6330	-4,2426	V606	-3,2660	-1,4142
V23	2,4495	1,4142	V169	0,8165	4,2426	V315	3,6742	0,7071	V461	-1,2247	-3,5355	V607	-2,8577	-0,7071
V24	2,8577	2,1213	V170	1,2247	4,9497	V316	0,8165	-5,6569	V462	-0,8165	-2,8284	V608	-2,4495	0,0000
V25	3,2660	2,8284	V171	1,6330	5,6569	V317	1,2247	-4,9497	V463	-0,4082	-2,1213	V609	-2,0412	0,7071
V26	3,6742	3,5355	V172	-1,2247	-0,7071	V318	1,6330	-4,2426	V464	0,0000	-1,4142	V610	-1,6330	1,4142
V27	4,0825	4,2426	V173	-0,8165	0,0000	V319	2,0412	-3,5355	V465	0,4082	-0,7071	V611	-1,2247	2,1213
V28	1,2247	-2,1213	V174	-0,4082	0,7071	V320	2,4495	-2,8284	V466	0,8165	0,0000	V612	-0,8165	2,8284
V29	1,6330	-1,4142	V175	0,0000	1,4142	V321	2,8577	-2,1213	V467	1,2247	0,7071	V613	-3,6742	-3,5355
V30	2,0412	-0,7071	V176	0,4082	2,1213	V322	3,2660	-1,4142	V468	1,6330	1,4142	V614	-3,2660	-2,8284
V31	2,4495	0,0000	V177	0,8165	2,8284	V323	3,6742	-0,7071	V469	-1,2247	-4,9497	V615	-2,8577	-2,1213
V32	2,8577	0,7071	V178	1,2247	3,5355	V324	4,0825	0,0000	V470	-0,8165	-4,2426	V616	-2,4495	-1,4142
V33	3,2660	1,4142	V179	1,6330	4,2426	V325	-3,2660	0,0000	V471	-0,4082	-3,5355	V617	-2,0412	-0,7071
V34	3,6742	2,1213	V180	2,0412	4,9497	V326	-2,8577	0,7071	V472	0,0000	-2,8284	V618	-1,6330	0,0000
V35	4,0825	2,8284	V181	-0,8165	-1,4142	V327	-2,4495	1,4142	V473	0,4082	-2,1213	V619	-1,2247	0,7071
V36	4,4907	3,5355	V182	-0,4082	-0,7071	V328	-2,0412	2,1213	V474	0,8165	-1,4142	V620	-0,8165	1,4142
V37	1,6330	-2,8284	V183	0,0000	0,0000	V329	-1,6330	2,8284	V475	1,2247	-0,7071	V621	-0,4082	2,1213
V38	2,0412	-2,1213	V184	0,4082	0,7071	V330	-1,2247	3,5355	V476	1,6330	0,0000	V622	-3,2660	-4,2426

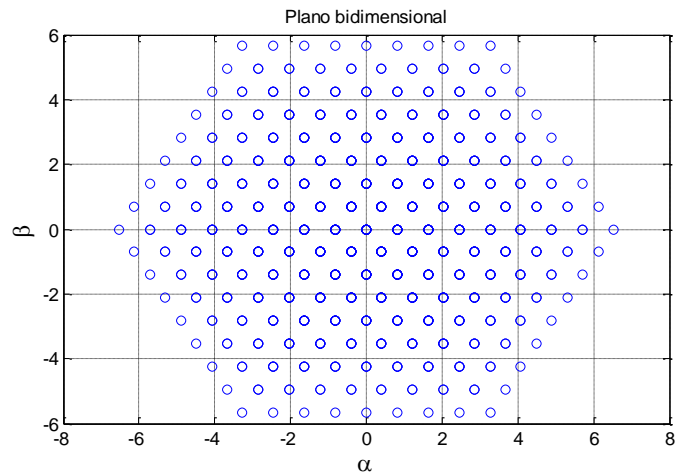
Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)
V39	2,4495	-1,4142	V185	0,8165	1,4142	V331	-0,8165	4,2426	V477	2,0412	0,7071	V623	-2,8577	-3,5355
V40	2,8577	-0,7071	V186	1,2247	2,1213	V332	-0,4082	4,9497	V478	-0,8165	-5,6569	V624	-2,4495	-2,8284
V41	3,2660	0,0000	V187	1,6330	2,8284	V333	0,0000	5,6569	V479	-0,4082	-4,9497	V625	-2,0412	-2,1213
V42	3,6742	0,7071	V188	2,0412	3,5355	V334	-2,8577	-0,7071	V480	0,0000	-4,2426	V626	-1,6330	-1,4142
V43	4,0825	1,4142	V189	2,4495	4,2426	V335	-2,4495	0,0000	V481	0,4082	-3,5355	V627	-1,2247	-0,7071
V44	4,4907	2,1213	V190	-0,4082	-2,1213	V336	-2,0412	0,7071	V482	0,8165	-2,8284	V628	-0,8165	0,0000
V45	4,8990	2,8284	V191	0,0000	-1,4142	V337	-1,6330	1,4142	V483	1,2247	-2,1213	V629	-0,4082	0,7071
V46	2,0412	-3,5355	V192	0,4082	-0,7071	V338	-1,2247	2,1213	V484	1,6330	-1,4142	V630	0,0000	1,4142
V47	2,4495	-2,8284	V193	0,8165	0,0000	V339	-0,8165	2,8284	V485	2,0412	-0,7071	V631	-2,8577	-4,9497
V48	2,8577	-2,1213	V194	1,2247	0,7071	V340	-0,4082	3,5355	V486	2,4495	0,0000	V632	-2,4495	-4,2426
V49	3,2660	-1,4142	V195	1,6330	1,4142	V341	0,0000	4,2426	V487	-4,8990	0,0000	V633	-2,0412	-3,5355
V50	3,6742	-0,7071	V196	2,0412	2,1213	V342	0,4082	4,9497	V488	-4,4907	0,7071	V634	-1,6330	-2,8284
V51	4,0825	0,0000	V197	2,4495	2,8284	V343	-2,4495	-1,4142	V489	-4,0825	1,4142	V635	-1,2247	-2,1213
V52	4,4907	0,7071	V198	2,8577	3,5355	V344	-2,0412	-0,7071	V490	-3,6742	2,1213	V636	-0,8165	-1,4142
V53	4,8990	1,4142	V199	0,0000	-2,8284	V345	-1,6330	0,0000	V491	-3,2660	2,8284	V637	-0,4082	-0,7071
V54	5,3072	2,1213	V200	0,4082	-2,1213	V346	-1,2247	0,7071	V492	-2,8577	3,5355	V638	0,0000	0,0000
V55	2,4495	-4,2426	V201	0,8165	-1,4142	V347	-0,8165	1,4142	V493	-2,4495	4,2426	V639	0,4082	0,7071
V56	2,8577	-3,5355	V202	1,2247	-0,7071	V348	-0,4082	2,1213	V494	-2,0412	-4,9497	V640	-2,4495	-5,6569
V57	3,2660	-2,8284	V203	1,6330	0,0000	V349	0,0000	2,8284	V495	-1,6330	5,6569	V641	-2,0412	-4,9497
V58	3,6742	-2,1213	V204	2,0412	0,7071	V350	0,4082	3,5355	V496	-4,4907	-0,7071	V642	-1,6330	-4,2426
V59	4,0825	-1,4142	V205	2,4495	1,4142	V351	0,8165	4,2426	V497	-4,0825	0,0000	V643	-1,2247	-3,5355
V60	4,4907	-0,7071	V206	2,8577	2,1213	V352	-2,0412	-2,1213	V498	-3,6742	0,7071	V644	-0,8165	-2,8284
V61	4,8990	0,0000	V207	3,2660	2,8284	V353	-1,6330	-1,4142	V499	-3,2660	1,4142	V645	-0,4082	-2,1213
V62	5,3072	0,7071	V208	0,4082	-3,5355	V354	-1,2247	-0,7071	V500	-2,8577	2,1213	V646	0,0000	-1,4142
V63	5,7155	1,4142	V209	0,8165	-2,8284	V355	-0,8165	0,0000	V501	-2,4495	2,8284	V647	0,4082	-0,7071
V64	2,8577	-4,9497	V210	1,2247	-2,1213	V356	-0,4082	0,7071	V502	-2,0412	3,5355	V648	0,8165	0,0000
V65	3,2660	-4,2426	V211	1,6330	-1,4142	V357	0,0000	1,4142	V503	-1,6330	4,2426	V649	-6,5320	0,0000
V66	3,6742	-3,5355	V212	2,0412	-0,7071	V358	0,4082	2,1213	V504	-1,2247	-4,9497	V650	-6,1237	0,7071
V67	4,0825	-2,8284	V213	2,4495	0,0000	V359	0,8165	2,8284	V505	-4,0825	-1,4142	V651	-5,7155	1,4142
V68	4,4907	-2,1213	V214	2,8577	0,7071	V360	1,2247	3,5355	V506	-3,6742	-0,7071	V652	-5,3072	2,1213
V69	4,8990	-1,4142	V215	3,2660	1,4142	V361	-1,6330	-2,8284	V507	-3,2660	0,0000	V653	-4,8990	2,8284
V70	5,3072	-0,7071	V216	3,6742	2,1213	V362	-1,2247	-2,1213	V508	-2,8577	0,7071	V654	-4,4907	3,5355
V71	5,7155	0,0000	V217	0,8165	-4,2426	V363	-0,8165	-1,4142	V509	-2,4495	1,4142	V655	-4,0825	4,2426
V72	6,1237	0,7071	V218	1,2247	-3,5355	V364	-0,4082	-0,7071	V510	-2,0412	-2,1213	V656	-3,6742	4,9497
V73	3,2660	-5,6569	V219	1,6330	-2,8284	V365	0,0000	0,0000	V511	-1,6330	2,8284	V657	-3,2660	5,6569
V74	3,6742	-4,9497	V220	2,0412	-2,1213	V366	0,4082	0,7071	V512	-1,2247	3,5355	V658	-6,1237	-0,7071
V75	4,0825	-4,2426	V221	2,4495	-1,4142	V367	0,8165	1,4142	V513	-0,8165	4,2426	V659	-5,7155	0,0000
V76	4,4907	-3,5355	V222	2,8577	-0,7071	V368	1,2247	2,1213	V514	-3,6742	-2,1213	V660	-5,3072	0,7071
V77	4,8990	-2,8284	V223	3,2660	0,0000	V369	1,6330	2,8284	V515	-3,2660	-1,4142	V661	-4,8990	1,4142
V78	5,3072	-2,1213	V224	3,6742	0,7071	V370	-1,2247	-3,5355	V516	-2,8577	-0,7071	V662	-4,4907	2,1213

Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)
V79	5,7155	-1,4142	V225	4,0825	1,4142	V371	-0,8165	-2,8284	V517	-2,4495	0,0000	V663	-4,0825	2,8284
V80	6,1237	-0,7071	V226	1,2247	-4,9497	V372	-0,4082	-2,1213	V518	-2,0412	0,7071	V664	-3,6742	3,5355
V81	6,5320	0,0000	V227	1,6330	-4,2426	V373	0,0000	-1,4142	V519	-1,6330	1,4142	V665	-3,2660	4,2426
V82	-0,8165	0,0000	V228	2,0412	-3,5355	V374	0,4082	-0,7071	V520	-1,2247	2,1213	V666	-2,8577	4,9497
V83	-0,4082	0,7071	V229	2,4495	-2,8284	V375	0,8165	0,0000	V521	-0,8165	2,8284	V667	-5,7155	-1,4142
V84	0,0000	1,4142	V230	2,8577	-2,1213	V376	1,2247	0,7071	V522	-0,4082	3,5355	V668	-5,3072	-0,7071
V85	0,4082	2,1213	V231	3,2660	-1,4142	V377	1,6330	1,4142	V523	-3,2660	-2,8284	V669	-4,8990	0,0000
V86	0,8165	2,8284	V232	3,6742	-0,7071	V378	2,0412	2,1213	V524	-2,8577	-2,1213	V670	-4,4907	0,7071
V87	1,2247	3,5355	V233	4,0825	0,0000	V379	-0,8165	-4,2426	V525	-2,4495	-1,4142	V671	-4,0825	1,4142
V88	1,6330	4,2426	V234	4,4907	0,7071	V380	-0,4082	-3,5355	V526	-2,0412	-0,7071	V672	-3,6742	2,1213
V89	2,0412	4,9497	V235	1,6330	-5,6569	V381	0,0000	-2,8284	V527	-1,6330	0,0000	V673	-3,2660	2,8284
V90	2,4495	5,6569	V236	2,0412	-4,9497	V382	0,4082	-2,1213	V528	-1,2247	0,7071	V674	-2,8577	3,5355
V91	-0,4082	-0,7071	V237	2,4495	-4,2426	V383	0,8165	-1,4142	V529	-0,8165	1,4142	V675	-2,4495	4,2426
V92	0,0000	0,0000	V238	2,8577	-3,5355	V384	1,2247	-0,7071	V530	-0,4082	2,1213	V676	-5,3072	-2,1213
V93	0,4082	0,7071	V239	3,2660	-2,8284	V385	1,6330	0,0000	V531	0,0000	2,8284	V677	-4,8990	-1,4142
V94	0,8165	1,4142	V240	3,6742	-2,1213	V386	2,0412	0,7071	V532	-2,8577	-3,5355	V678	-4,4907	-0,7071
V95	1,2247	2,1213	V241	4,0825	-1,4142	V387	2,4495	1,4142	V533	-2,4495	-2,8284	V679	-4,0825	0,0000
V96	1,6330	2,8284	V242	4,4907	-0,7071	V388	-0,4082	-4,9497	V534	-2,0412	-2,1213	V680	-3,6742	0,7071
V97	2,0412	3,5355	V243	4,8990	0,0000	V389	0,0000	-4,2426	V535	-1,6330	-1,4142	V681	-3,2660	1,4142
V98	2,4495	4,2426	V244	-2,4495	0,0000	V390	0,4082	-3,5355	V536	-1,2247	-0,7071	V682	-2,8577	2,1213
V99	2,8577	4,9497	V245	-2,0412	0,7071	V391	0,8165	-2,8284	V537	-0,8165	0,0000	V683	-2,4495	2,8284
V100	0,0000	-1,4142	V246	-1,6330	1,4142	V392	1,2247	-2,1213	V538	-0,4082	0,7071	V684	-2,0412	3,5355
V101	0,4082	-0,7071	V247	-1,2247	2,1213	V393	1,6330	-1,4142	V539	0,0000	1,4142	V685	-4,8990	-2,8284
V102	0,8165	0,0000	V248	-0,8165	2,8284	V394	2,0412	-0,7071	V540	0,4082	2,1213	V686	-4,4907	-2,1213
V103	1,2247	0,7071	V249	-0,4082	3,5355	V395	2,4495	0,0000	V541	-2,4495	-4,2426	V687	-4,0825	-1,4142
V104	1,6330	1,4142	V250	0,0000	4,2426	V396	2,8577	0,7071	V542	-2,0412	-3,5355	V688	-3,6742	-0,7071
V105	2,0412	2,1213	V251	0,4082	4,9497	V397	0,0000	-5,6569	V543	-1,6330	-2,8284	V689	-3,2660	0,0000
V106	2,4495	2,8284	V252	0,8165	5,6569	V398	0,4082	-4,9497	V544	-1,2247	-2,1213	V690	-2,8577	0,7071
V107	2,8577	3,5355	V253	-2,0412	-0,7071	V399	0,8165	-4,2426	V545	-0,8165	-1,4142	V691	-2,4495	1,4142
V108	3,2660	4,2426	V254	-1,6330	0,0000	V400	1,2247	-3,5355	V546	-0,4082	-0,7071	V692	-2,0412	2,1213
V109	0,4082	-2,1213	V255	-1,2247	0,7071	V401	1,6330	-2,8284	V547	0,0000	0,0000	V693	-1,6330	2,8284
V110	0,8165	-1,4142	V256	-0,8165	1,4142	V402	2,0412	-2,1213	V548	0,4082	0,7071	V694	-4,4907	-3,5355
V111	1,2247	-0,7071	V257	-0,4082	2,1213	V403	2,4495	-1,4142	V549	0,8165	1,4142	V695	-4,0825	-2,8284
V112	1,6330	0,0000	V258	0,0000	2,8284	V404	2,8577	-0,7071	V550	-2,0412	-4,9497	V696	-3,6742	-2,1213
V113	2,0412	0,7071	V259	0,4082	3,5355	V405	3,2660	0,0000	V551	-1,6330	-4,2426	V697	-3,2660	-1,4142
V114	2,4495	1,4142	V260	0,8165	4,2426	V406	-4,0825	0,0000	V552	-1,2247	-3,5355	V698	-2,8577	-0,7071
V115	2,8577	2,1213	V261	1,2247	4,9497	V407	-3,6742	0,7071	V553	-0,8165	-2,8284	V699	-2,4495	0,0000
V116	3,2660	2,8284	V262	-1,6330	-1,4142	V408	-3,2660	1,4142	V554	-0,4082	-2,1213	V700	-2,0412	0,7071
V117	3,6742	3,5355	V263	-1,2247	-0,7071	V409	-2,8577	2,1213	V555	0,0000	-1,4142	V701	-1,6330	1,4142
V118	0,8165	-2,8284	V264	-0,8165	0,0000	V410	-2,4495	2,8284	V556	0,4082	-0,7071	V702	-1,2247	2,1213

Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)	Vetor	Coordenada α (V_a)	Coordenada β (V_b)
V119	1,2247	-2,1213	V265	-0,4082	0,7071	V411	-2,0412	3,5355	V557	0,8165	0,0000	V703	-4,0825	-4,2426
V120	1,6330	-1,4142	V266	0,0000	1,4142	V412	-1,6330	4,2426	V558	1,2247	0,7071	V704	-3,6742	-3,5355
V121	2,0412	-0,7071	V267	0,4082	2,1213	V413	-1,2247	4,9497	V559	-1,6330	-5,6569	V705	-3,2660	-2,8284
V122	2,4495	0,0000	V268	0,8165	2,8284	V414	-0,8165	5,6569	V560	-1,2247	-4,9497	V706	-2,8577	-2,1213
V123	2,8577	0,7071	V269	1,2247	3,5355	V415	-3,6742	-0,7071	V561	-0,8165	-4,2426	V707	-2,4495	-1,4142
V124	3,2660	1,4142	V270	1,6330	4,2426	V416	-3,2660	0,0000	V562	-0,4082	-3,5355	V708	-2,0412	-0,7071
V125	3,6742	2,1213	V271	-1,2247	-2,1213	V417	-2,8577	0,7071	V563	0,0000	-2,8284	V709	-1,6330	0,0000
V126	4,0825	2,8284	V272	-0,8165	-1,4142	V418	-2,4495	1,4142	V564	0,4082	-2,1213	V710	-1,2247	0,7071
V127	1,2247	-3,5355	V273	-0,4082	-0,7071	V419	-2,0412	2,1213	V565	0,8165	-1,4142	V711	-0,8165	1,4142
V128	1,6330	-2,8284	V274	0,0000	0,0000	V420	-1,6330	2,8284	V566	1,2247	-0,7071	V712	-3,6742	-4,9497
V129	2,0412	-2,1213	V275	0,4082	0,7071	V421	-1,2247	3,5355	V567	1,6330	0,0000	V713	-3,2660	-4,2426
V130	2,4495	-1,4142	V276	0,8165	1,4142	V422	-0,8165	4,2426	V568	-5,7155	0,0000	V714	-2,8577	-3,5355
V131	2,8577	-0,7071	V277	1,2247	2,1213	V423	-0,4082	4,9497	V569	-5,3072	0,7071	V715	-2,4495	-2,8284
V132	3,2660	0,0000	V278	1,6330	2,8284	V424	-3,2660	-1,4142	V570	-4,8990	1,4142	V716	-2,0412	-2,1213
V133	3,6742	0,7071	V279	2,0412	3,5355	V425	-2,8577	-0,7071	V571	-4,4907	2,1213	V717	-1,6330	-1,4142
V134	4,0825	1,4142	V280	-0,8165	-2,8284	V426	-2,4495	0,0000	V572	-4,0825	2,8284	V718	-1,2247	-0,7071
V135	4,4907	2,1213	V281	-0,4082	-2,1213	V427	-2,0412	0,7071	V573	-3,6742	3,5355	V719	-0,8165	0,0000
V136	1,6330	-4,2426	V282	0,0000	-1,4142	V428	-1,6330	1,4142	V574	-3,2660	4,2426	V720	-0,4082	0,7071
V137	2,0412	-3,5355	V283	0,4082	-0,7071	V429	-1,2247	2,1213	V575	-2,8577	4,9497	V721	-3,2660	-5,6569
V138	2,4495	-2,8284	V284	0,8165	0,0000	V430	-0,8165	2,8284	V576	-2,4495	5,6569	V722	-2,8577	-4,9497
V139	2,8577	-2,1213	V285	1,2247	0,7071	V431	-0,4082	3,5355	V577	-5,3072	-0,7071	V723	-2,4495	-4,2426
V140	3,2660	-1,4142	V286	1,6330	1,4142	V432	0,0000	4,2426	V578	-4,8990	0,0000	V724	-2,0412	-3,5355
V141	3,6742	-0,7071	V287	2,0412	2,1213	V433	-2,8577	-2,1213	V579	-4,4907	0,7071	V725	-1,6330	-2,8284
V142	4,0825	0,0000	V288	2,4495	2,8284	V434	-2,4495	-1,4142	V580	-4,0825	1,4142	V726	-1,2247	-2,1213
V143	4,4907	0,7071	V289	-0,4082	-3,5355	V435	-2,0412	-0,7071	V581	-3,6742	2,1213	V727	-0,8165	-1,4142
V144	4,8990	1,4142	V290	0,0000	-2,8284	V436	-1,6330	0,0000	V582	-3,2660	2,8284	V728	-0,4082	-0,7071
V145	2,0412	-4,9497	V291	0,4082	-2,1213	V437	-1,2247	0,7071	V583	-2,8577	3,5355	V729	0,0000	0,0000
V146	2,4495	-4,2426	V292	0,8165	-1,4142	V438	-0,8165	1,4142	V584	-2,4495	4,2426	--	---	----

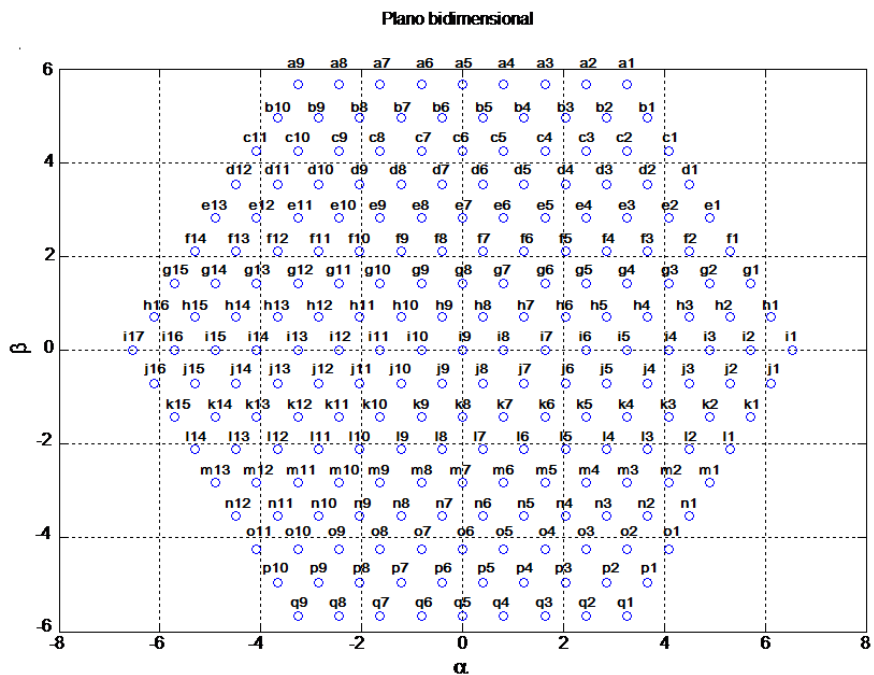
Com todos os vetores de comutação em coordenadas α - β , foi possível realizar a projeção de cada um dos vetores da Tabela 11 em um plano. As projeções estão representadas pela Figura 29.

Figura 29 - 729 vetores de comutação de chaveamento das três fases do inversor assimétrico projetados em um plano α - β



Percebe-se pela Figura 29 acima que os setecentos e estes vinte e nove (729) vetores projetados no plano α - β formam um hexágono gerado por duzentos e dezessete (217) pontos, o que significa que em um ponto pode ter mais de uma vetor projetado. Logo, para conhecer quais vetores pertencem ao mesmo ponto de projeção, os pontos do hexágono foram nomeados por linha de “a” a “q” e números, conforme Figura 30.

Figura 30 - Identificação dos 217 pontos no plano α - β



Através dos valores da Tabela 11, a Tabela 12 abaixo foi formada, agrupando os vetores de iguais coordenadas. Esta mostra, além do ponto de projeção da Figura 30, as coordenadas α - β do ponto e os referidos vetores de comutação que se localizam nele. Desta forma, pode-se perceber quais vetores pertencem ao mesmo ponto de projeção, ou seja, que possuem as mesmas coordenadas α - β .

Tabela 12 - Identificação dos 217 pontos e seus respectivos vetores no plano α - β

Plano α - β			
Ponto	Coordenada α	Coordenada β	Vetores localizados no ponto
a1	3,266	5,657	V9
a2	2,449	5,657	V90
a3	1,633	5,657	V171
a4	0,8165	5,657	V252
a5	0,0000	5,657	V333
a6	-0,8165	5,657	V414
a7	-1,633	5,657	V495
a8	-2,449	5,657	V576
a9	-3,266	5,657	V657
b1	3,674	4,9500	V18
b2	2,858	4,9500	V8 – V99
b3	2,041	4,9500	V89 – V180
b4	1,225	4,9500	V261 – V170
b5	0,4082	4,9500	V251 – V342
b6	-0,4082	4,9500	V332 – V423
b7	-1,225	4,9500	V504 – V413
b8	-2,041	4,9500	V494 – V585
b9	-2,858	4,9500	V575 – V666
b10	-3,674	4,9500	V656
c1	4,082	4,243	V27
c2	3,266	4,243	V17 – V108
c3	2,449	4,243	V7 – V98 – V189
c4	1,633	4,243	V270 – V88 – V179
c5	0,8165	4,243	V260 – V351 – V169
c6	0,0000	4,243	V250 – V341 – V432
c7	-0,8165	4,243	V513 – V331 – V422
c8	-1,633	4,243	V503 – V594 – V412
c9	-2,449	4,243	V493 – V584 – V675
c10	-3,266	4,243	V574 – V665
c11	-4,082	4,243	V655
d1	4,491	3,536	V36
d2	3,674	3,536	V26 – V117
d3	2,858	3,536	V16 – V107 – V198
d4	2,041	3,536	V6 – V279 – V97 – V188
d5	1,225	3,536	V269 – V87 – V360 – V178
d6	0,4082	3,536	V259 – V350 – V168 – V441
d7	-0,4082	3,536	V249 – V522 – V340 – V431
d8	-1,225	3,536	V512 – V330 – V603 – V421
d9	-2,041	3,536	V502 – V593 – V411 – V684
d10	-2,858	3,536	V492 – V583 – V674
d11	-3,674	3,536	V573 – V664
d12	-4,491	3,536	V654
e1	4,899	2,828	V45
e2	4,082	2,828	V35 – V126
e3	3,266	2,828	V25 – V116 – V207
e4	2,449	2,828	V15 – V288 – V106 – V197
e5	1,633	2,828	V5 – V278 – V96 – V369 – V187
e6	0,8165	2,828	V268 – V86 – V359 – V177 – V450
e7	0,0000	2,828	V258 – V531 – V349 – V167 – V440
e8	-0,8165	2,828	V248 – V521 – V339 – V612 – V430
e9	-1,633	2,828	V511 – V329 – V602 – V420 – V693
e10	-2,449	2,828	V501 – V592 – V410 – V683
e11	-3,266	2,828	V491 – V582 – V673
e12	-4,082	2,828	V572 – V663
e13	-4,899	2,828	V653

Plano α - β			
Ponto	Coordenada α	Coordenada β	Vetores localizados no ponto
f1	5,307	2,121	V54
f2	4,491	2,121	V44 – V135
f3	3,674	2,121	V34 – V125 – V216
f4	2,858	2,121	V24 – V297 – V115 – V206
f5	2,041	2,121	V14 – V287 – V105 – V378 – V196
f6	1,225	2,121	V4 – V277 – V95 – V368 – V186 – V459
f7	0,4082	2,121	V267 – V540 – V85 – V358 – V176 – V449
f8	-0,4082	2,121	V257 – V530 – V348 – V621 – V166 – V439
f9	-1,225	2,121	V247 – V520 – V338 – V611 – V429 – V702
f10	-2,041	2,121	V510 – V328 – V601 – V419 – V692
f11	-2,858	2,121	V500 – V591 – V409 – V682
f12	-3,674	2,121	V490 – V581 – V672
f13	-4,491	2,121	V571 – V662
f14	-5,307	2,121	V652
g1	5,715	1,414	V63
g2	4,899	1,414	V53 – V144
g3	4,082	1,414	V43 – V134 – V225
g4	3,266	1,414	V33 – V306 – V124 – V215
g5	2,449	1,414	V23 – V296 – V114 – V387 – V205
g6	1,633	1,414	V13 – V286 – V104 – V377 – V195 – V468
g7	0,8165	1,414	V3 – V276 – V549 – V94 – V367 – V185 – V458
g8	0,0000	1,414	V266 – V539 – V84 – V357 – V630 – V175 – V448
g9	-0,8165	1,414	V256 – V529 – V347 – V620 – V165 – V438 – V711
g10	-1,633	1,414	V246 – V519 – V337 – V610 – V428 – V701
g11	-2,449	1,414	V509 – V327 – V600 – V418 – V691
g12	-3,266	1,414	V499 – V590 – V408 – V681
g13	-4,082	1,414	V489 – V580 – V671
g14	-4,899	1,414	V570 – V661
g15	-5,715	1,414	V651
h1	6,124	0,7071	V72
h2	5,307	0,7071	V62 – V153
h3	4,491	0,7071	V52 – V143 – V234
h4	3,674	0,7071	V42 – V315 – V133 – V224
h5	2,858	0,7071	V32 – V305 – V123 – V396 – V214
h6	2,041	0,7071	V22 – V295 – V113 – V386 – V204 – V477
h7	1,225	0,7071	V12 – V285 – V558 – V103 – V376 – V194 – V467
h8	0,4082	0,7071	V2 – V275 – V548 – V93 – V366 – V639 – V184 – V457
h9	-0,4082	0,7071	V265 – V538 – V83 – V356 – V629 – V174 – V447 – V720
h10	-1,225	0,7071	V255 – V528 – V346 – V619 – V164 – V437 – V710
h11	-2,041	0,7071	V245 – V518 – V336 – V609 – V427 – V700
h12	-2,858	0,7071	V508 – V326 – V599 – V417 – V690
h13	-3,674	0,7071	V498 – V589 – V407 – V680
h14	-4,491	0,7071	V488 – V579 – V670
h15	-5,307	0,7071	V569 – V660
h16	-6,124	0,7071	V650
i1	6,532	0,0000	V81
i2	5,715	0,0000	V71 – V162
i3	4,899	0,0000	V61 – V152 – V243
i4	4,082	0,0000	V51 – V324 – V142 – V233
i5	3,266	0,0000	V41 – V314 – V132 – V405 – V223
i6	2,449	0,0000	V31 – V304 – V122 – V395 – V213 – V486
i7	1,633	0,0000	V21 – V294 – V567 – V112 – V385 – V203 – V476
i8	0,8165	0,0000	V11 – V284 – V557 – V102 – V375 – V648 – V193 – V466
i9	0,0000	0,0000	V1 – V274 – V547 – V92 – V365 – V638 – V183 – V456 – V729
i10	-0,8165	0,0000	V264 – V537 – V82 – V355 – V628 – V173 – V446 – V719
i11	-1,633	0,0000	V254 – V527 – V345 – V618 – V163 – V436 – V709
i12	-2,449	0,0000	V244 – V517 – V335 – V608 – V426 – V699
i13	-3,266	0,0000	V507 – V325 – V598 – V416 – V689
i14	-4,082	0,0000	V497 – V588 – V406 – V679
i15	-4,899	0,0000	V487 – V578 – V669
i16	-5,715	0,0000	V568 – V659
i17	-6,532	0,0000	V649
j1	6,124	-0,7071	V80
j2	5,307	-0,7071	V70 – V161
j3	4,491	-0,7071	V60 – V151 – V242
j4	3,674	-0,7071	V50 – V323 – V141 – V232
j5	2,858	-0,7071	V40 – V313 – V131 – V404 – V222
j6	2,041	-0,7071	V30 – V303 – V121 – V394 – V212 – V485

Plano α - β			
Ponto	Coordenada α	Coordenada β	Vetores localizados no ponto
j7	1,225	-0,7071	V20 – V293 – V566 – V111 – V384 – V202 – V475
j8	0,4082	-0,7071	V10 – V283 – V556 – V101 – V374 – V647 – V192 – V465
j9	-0,4082	-0,7071	V273 – V546 – V91 – V364 – V637 – V182 – V455 – V728
j10	-1,225	-0,7071	V263 – V536 – V354 – V627 – V172 – V445 – V718
j11	-2,041	-0,7071	V253 – V526 – V344 – V617 – V435 – V708
j12	-2,858	-0,7071	V516 – V334 – V607 – V425 – V698
j13	-3,674	-0,7071	V506 – V597 – V415 – V688
j14	-4,491	-0,7071	V496 – V587 – V678
j15	-5,307	-0,7071	V577 – V668
j16	-6,124	-0,7071	V658
k1	5,715	-1,414	V79
k2	4,899	-1,414	V69 – V160
k3	4,082	-1,414	V59 – V150 – V241
k4	3,266	-1,414	V49 – V322 – V140 – V231
k5	2,449	-1,414	V39 – V312 – V130 – V403 – V221
k6	1,633	-1,414	V29 – V302 – V120 – V393 – V211 – V484
k7	0,8165	-1,414	V19 – V292 – V565 – V110 – V383 – V201 – V474
k8	0,0000	-1,414	V282 – V555 – V100 – V373 – V646 – V191 – V464
k9	-0,8165	-1,414	V272 – V545 – V363 – V636 – V181 – V454 – V727
k10	-1,633	-1,414	V262 – V535 – V353 – V626 – V444 – V717
k11	-2,449	-1,414	V525 – V343 – V616 – V434 – V707
k12	-3,266	-1,414	V515 – V606 – V424 – V697
k13	-4,082	-1,414	V505 – V596 – V687
k14	-4,899	-1,414	V586 – V677
k15	-5,715	-1,414	V667
l1	5,307	-2,121	V78
l2	4,491	-2,121	V68 – V159
l3	3,674	-2,121	V58 – V149 – V240
l4	2,858	-2,121	V48 – V321 – V139 – V230
l5	2,041	-2,121	V38 – V311 – V129 – V402 – V220
l6	1,225	-2,121	V28 – V301 – V119 – V392 – V210 – V483
l7	0,4082	-2,121	V291 – V564 – V109 – V382 – V200 – V473
l8	-0,4082	-2,121	V281 – V554 – V372 – V645 – V190 – V463
l9	-1,225	-2,121	V271 – V544 – V362 – V635 – V453 – V726
l10	-2,041	-2,121	V534 – V352 – V625 – V443 – V716
l11	-2,858	-2,121	V524 – V615 – V433 – V706
l12	-3,674	-2,121	V514 – V605 – V696
l13	-4,491	-2,121	V595 – V686
l14	-5,307	-2,121	V676
m1	4,899	-2,828	V77
m2	4,082	-2,828	V67 – V158
m3	3,266	-2,828	V57 – V148 – V239
m4	2,449	-2,828	V47 – V320 – V138 – V229
m5	1,633	-2,828	V37 – V310 – V128 – V401 – V219
m6	0,8165	-2,828	V300 – V118 – V391 – V209 – V482
m7	0,0000	-2,828	V290 – V563 – V381 – V199 – V472
m8	-0,8165	-2,828	V280 – V553 – V371 – V644 – V462
m9	-1,633	-2,828	V543 – V361 – V634 – V452 – V725
m10	-2,449	-2,828	V533 – V624 – V442 – V715
m11	-3,266	-2,828	V523 – V614 – V705
m12	-4,082	-2,828	V604 – V695
m13	-4,899	-2,828	V685
n1	4,491	-3,536	V76
n2	3,674	-3,536	V66 – V157
n3	2,858	-3,536	V56 – V147 – V238
n4	2,041	-3,536	V46 – V319 – V137 – V228
n5	1,225	-3,536	V309 – V127 – V400 – V218
n6	0,4082	-3,536	V299 – V390 – V208 – V481
n7	-0,4082	-3,536	V289 – V562 – V380 – V471
n8	-1,225	-3,536	V552 – V370 – V643 – V461
n9	-2,041	-3,536	V542 – V633 – V451 – V724
n10	-2,858	-3,536	V532 – V623 – V714
n11	-3,674	-3,536	V613 – V704
n12	-4,491	-3,536	V694
o1	4,082	-4,243	V75
o2	3,266	-4,243	V65 – V156
o3	2,449	-4,243	V55 – V146 – V237
o4	1,633	-4,243	V318 – V136 – V227

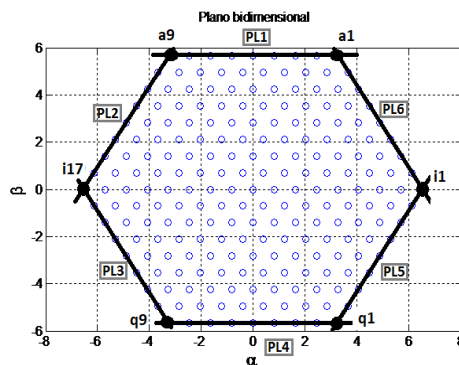
Plano α - β			
Ponto	Coordenada α	Coordenada β	Vetores localizados no ponto
o5	0,8165	-4,243	V308 – V399 – V217
o6	0,0000	-4,243	V298 – V389 – V480
o7	-0,8165	-4,243	V561 – V379 – V470
o8	-1,633	-4,243	V551 – V642 – V460
o9	-2,449	-4,243	V541 – V632 – V723
o10	-3,266	-4,243	V622 – V713
o11	-4,082	-4,243	V703
p1	3,674	-4,9500	V74
p2	2,858	-4,9500	V64 – V155
p3	2,041	-4,9500	V145 – V236
p4	1,225	-4,9500	V317 – V226
p5	0,4082	-4,9500	V307 – V398
p6	-0,4082	-4,9500	V388 – V479
p7	-1,225	-4,9500	V560 – V469
p8	-2,041	-4,9500	V550 – V641
p9	-2,858	-4,9500	V631 – V722
p10	-3,674	-4,9500	V712
q1	3,266	-5,657	V73
q2	2,449	-5,657	V154
q3	1,633	-5,657	V235
q4	0,8165	-5,657	V316
q5	0,0000	-5,657	V397
q6	-0,8165	-5,657	V478
q7	-1,633	-5,657	V559
q8	-2,449	-5,657	V640
q9	-3,266	-5,657	V721

O próximo passo da modulação *SV* foi dividir em setores o hexágono para posteriormente conseguir localizar o vetor desejado (V_{ref}). Para isso, foi necessário identificar os planos limites e os planos de separação.

3.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS LIMITES (PL) DO HEXÁGONO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO

Os planos de limites (PL) são utilizados para delimitar a região do hexágono, logo, são gerados seis planos. Para calcular os planos de limites (PL) do plano α - β foram necessários dois pontos do diagrama hexagonal, ou seja, dois vetores de comutação. Com estes, foi possível encontrar o plano por meio da equação da reta. Os pontos utilizados para os cálculos, que formam os vértices do hexágono, assim como os planos PL gerados estão destacados na Figura 31.

Figura 31 - Representação dos planos limites (PL) de hexágono do inversor assimétrico de nove níveis



A seguir, para exemplificar, está calculado o PL1 de forma detalhada para compreensão do processo.

Cálculo do plano limite 1 (PL1):

Para o cálculo do plano limite 1 (PL1) foram utilizados os pontos a1 e a9 (ver Figura 31). De acordo com a Tabela 12, adquire-se os valores das coordenadas de cada ponto. Neste caso, como há vários vetores de comutação, diferentemente do subitem A.3. referente ao inversor de dois níveis, onde só existe uma possibilidade de formar os planos limites (apenas uma combinação de vetores), logo no inversor de nove níveis pode-se utilizar quaisquer pontos que estão contidos no plano limite para formar a reta. Desta maneira, ao invés de referenciar o vetor como no caso do subitem A.3., se referencia o ponto, uma vez que se tiver vários vetores no mesmo ponto, estes terão as mesmas coordenadas α, β .

- Ponto 1 (a1) = (Va1 $_{\alpha}$, Va1 $_{\beta}$) = (3,2660 ; 5,6569)
- Ponto 2 (a9) = (Va9 $_{\alpha}$, Va9 $_{\beta}$) = (-3,2660 ; 5,6569)

Por meio da equação fundamental da reta representada em (2) e sua complementação em (3), calculando com os valores de Va1 e Va9, se obtém o plano limite PL1 (6). Para tanto, na equação da reta se considera: Va1 $_{\alpha}$ = x1; Va1 $_{\beta}$ = y1; Va9 $_{\alpha}$ = x2 e Va9 $_{\beta}$ = y2.

$$y - y1 = m.(x - x1) \quad \Rightarrow \quad V_{\beta} - y1 = m.(V_{\alpha} - x1) \quad (2)$$

$$m = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} \quad (3)$$

Substituindo os valores das coordenadas dos pontos em (3), tem-se (4).

$$m = \frac{5,6569 - 5,6569}{-3,2660 - 3,2660} = -\frac{0}{-6,5320} = 0 \quad (4)$$

Logo, a equação da reta em (2) fica (5).

$$V_{\beta} - 5,6569 = 0.(V_{\alpha} - 3,2660) \quad (5)$$

Desenvolvendo se obtém o resultado do PL1 em (6).

$$V_{\beta} - 5,6569 = 0.V_{\alpha} - 0$$

$$\text{PL1} \quad \therefore \quad V_{\beta} - 5,6569 = 0 \quad (6)$$

Desta forma, aplicando o cálculo para os outros planos limites, se computam os dados conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Planos limites (PL) do inversor assimétrico trifásico de nove níveis

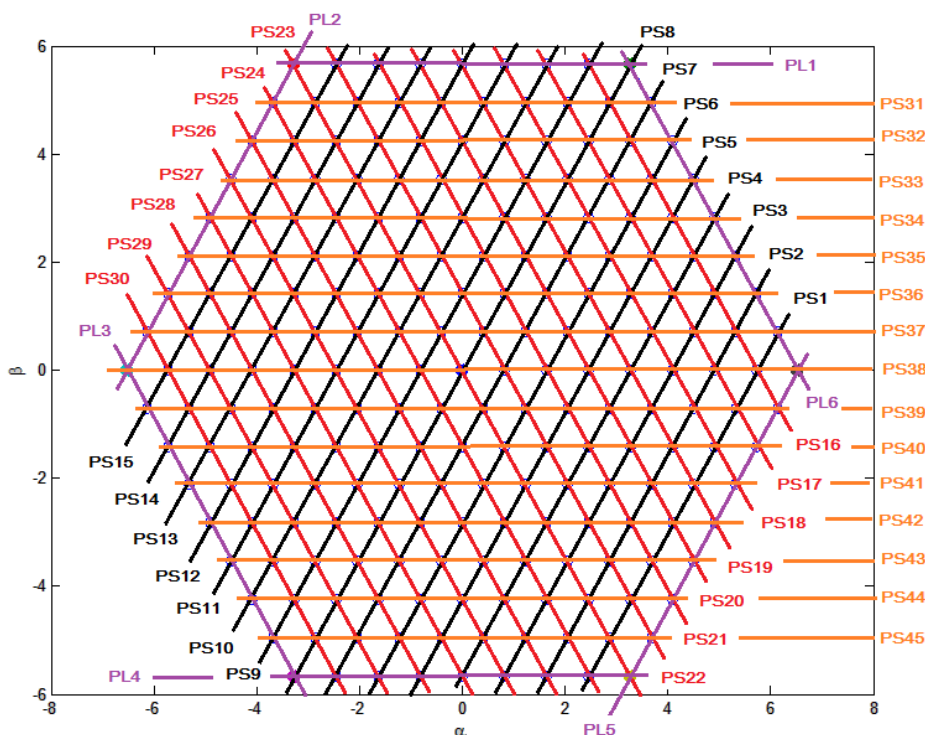
PL	Ponto	Coordenadas		Ponto	Coordenadas		Equação do Plano limite
		α	β		α	β	
PL1	a1	3,2660	5,6569	a9	-3,2660	5,6569	$V_\beta - 5,6569 = 0$
PL2	a9	-3,2660	5,6569	i17	-6,5320	0,0000	$V_\beta - 1,7321.V_\alpha - 11,3138 = 0$
PL3	i17	-6,5320	0,0000	q9	-3,2660	-5,6569	$V_\beta + 1,7321.V_\alpha + 11,3138 = 0$
PL4	q9	-3,2660	-5,6569	q1	3,2660	-5,6569	$V_\beta + 5,6569 = 0$
PL5	q1	3,2660	-5,6569	i1	6,5320	0,0000	$V_\beta - 1,7321.V_\alpha + 11,3138 = 0$
PL6	i1	6,5320	0,0000	a1	3,2660	5,6569	$V_\beta + 1,7321.V_\alpha - 11,3138 = 0$

Determinados os planos extremos do hexágono para que a procura pelo vetor de referência não ultrapasse os seus limites, na sequência, foi necessário separar o interior do hexágono em setores e, para isso, foi fundamental identificar os planos de separação como indica o subcapítulo a seguir.

3.4. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS SEPARAÇÃO (PS) DO HEXÁGONO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO

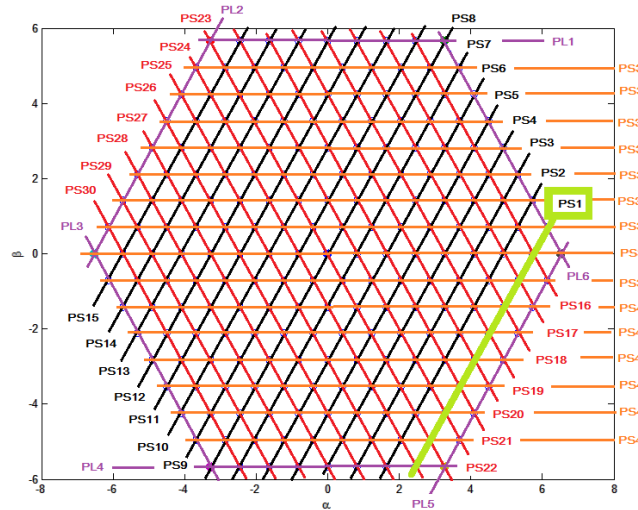
Para realizar a procura do vetor de referência dentro do hexágono foi necessário dividi-lo em setores formados por três vetores, ou seja, o hexágono foi dividido em pequenos triângulos. Para isso, foram utilizadas retas ligando os pontos (vetores de comutação), gerando quarenta e cinco planos de separação, conforme Figura 32.

Figura 32 - Todos os planos de separação (PS) e planos limites (PL) do hexágono



O método para calcular os quarenta e cinco planos de separação foi o mesmo utilizado nos planos limites. Logo, através de dois pontos do hexágono, foi traçada uma reta que passa entre eles, determinando assim, o plano de separação. Como exemplo, foi calculado abaixo o plano de separação 1 (PS1), que está destacado em verde na Figura 33.

Figura 33 - Plano de separação 1 (PS1) em destaque



Para o cálculo do plano de separação 1 (PS1), foram utilizados os pontos h1 e q2 que, por meio da Tabela 12, adquire-se os valores das coordenadas de cada ponto.

Cálculo do plano de separação 1 (PS1):

- Ponto 1 (h1) = (h1_α, h1_β) = (6,124; 0,7071)
- Ponto 2 (q2) = (q2_α, q2_β) = (2,449; -5,657)

Logo, para obter o plano de separação PS1, se calcula, por meio de (2) e (3), a reta que passa por estes dois pontos, conforme a seguir, sendo considerado, nas referidas equações: h1_α = x1; h1_β = y1; q2_α = x2 e q2_β = y2.

Substituindo os valores dos pontos em (3), tem-se (7).

$$m = \frac{-5,657 - 0,7071}{2,449 - 6,124} = -\frac{-6,3641}{-3,6750} = 1,7317 \quad (7)$$

Logo, a equação da reta em (2) fica (8).

$$V_{\beta} - 0,7071 = 1,7317 \cdot (V_{\alpha} - 6,124) \quad (8)$$

Desenvolvendo se obtém o resultado de PS1 em (9).

$$\begin{aligned} V_{\beta} - 0,7071 &= 1,7317 \cdot V_{\alpha} - 10,6049 \\ \text{PS1} \quad \therefore \quad V_{\beta} - 1,7321 \cdot V_{\alpha} + 9,8978 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

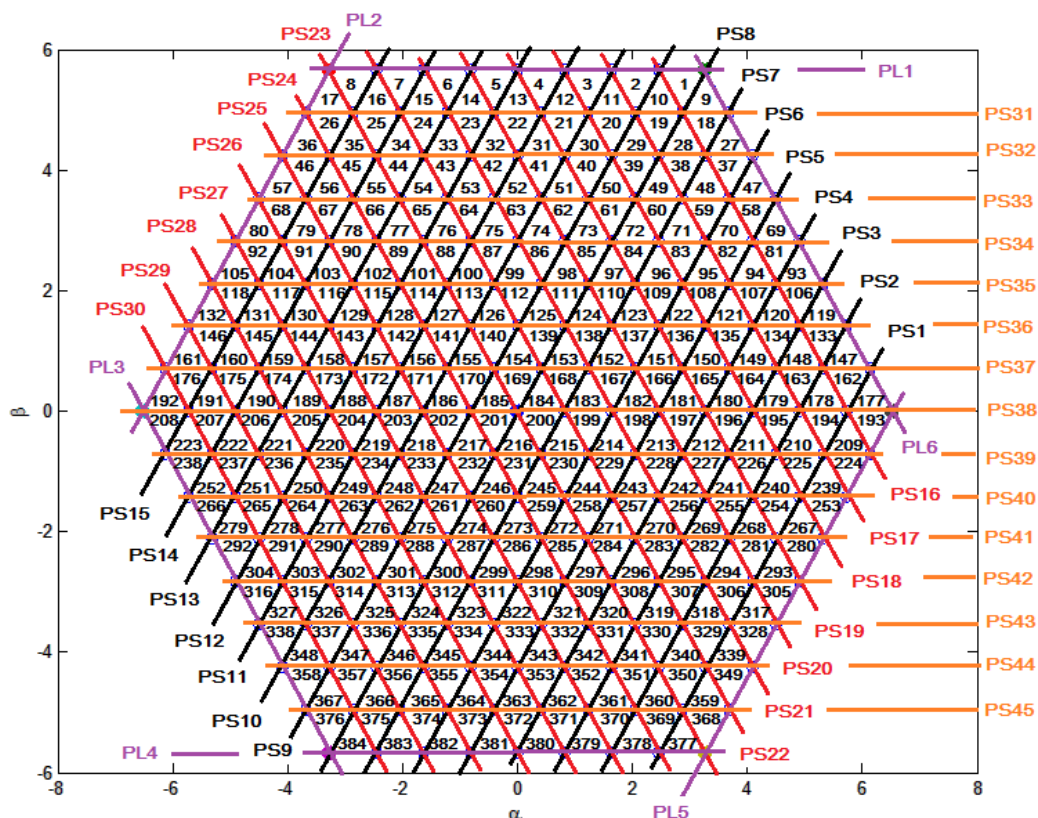
O cálculo acima, aplicado em cada um dos quarenta e cinco planos de separação, resulta na Tabela 14, a qual também mostra os pontos utilizados para formar as retas e suas coordenadas α, β .

Tabela 14 - Planos de separação (PS) do inversor assimétrico trifásico de nove níveis

PS	Ponto	Coordenadas		Ponto	Coordenadas		Equação do Plano de separação
		α	β		α	β	
PS1	h1	6,124	0,7071	q2	2,449	-5,657	$V_{\beta} - 1,7317.V_{\alpha} + 9,8978 = 0$
PS2	g1	5,715	1,414	q3	1,6330	-5,657	$V_{\beta} - 1,7322.V_{\alpha} + 8,4857 = 0$
PS3	f1	5,307	2,121	q4	0,8165	-5,657	$V_{\beta} - 1,7321.V_{\alpha} + 7,0713 = 0$
PS4	e1	4,899	2,828	q5	0,0000	-5,657	$V_{\beta} - 1,7320.V_{\alpha} + 5,6570 = 0$
PS5	d1	4,491	3,536	q6	-0,8165	-5,657	$V_{\beta} - 1,7321.V_{\alpha} + 4,2428 = 0$
PS6	c1	4,082	4,243	q7	-1,6330	-5,657	$V_{\beta} - 1,7323.V_{\alpha} + 2,8282 = 0$
PS7	b1	3,674	4,950	q8	-2,449	-5,657	$V_{\beta} - 1,7323.V_{\alpha} + 1,4145 = 0$
PS8	a1	3,266	5,657	q9	-3,266	-5,657	$V_{\beta} - 1,7321.V_{\alpha} = 0$
PS9	a2	2,449	5,657	p10	-3,674	-4,950	$V_{\beta} - 1,7323.V_{\alpha} - 1,4145 = 0$
PS10	a3	1,6330	5,657	o11	-4,082	-4,243	$V_{\beta} - 1,7323.V_{\alpha} - 2,8282 = 0$
PS11	a4	0,8165	5,657	n12	-4,491	-3,536	$V_{\beta} - 1,7321.V_{\alpha} - 4,2428 = 0$
PS12	a5	0,0000	5,657	m13	-4,899	-2,828	$V_{\beta} - 1,7320.V_{\alpha} - 5,6570 = 0$
PS13	a6	-0,8165	5,657	l14	-5,307	-2,121	$V_{\beta} - 1,7321.V_{\alpha} - 7,0713 = 0$
PS14	a7	-1,6330	5,657	k15	-5,715	-1,414	$V_{\beta} - 1,7322.V_{\alpha} - 8,4857 = 0$
PS15	a8	-2,449	5,657	j16	-6,124	-0,7071	$V_{\beta} - 1,7317.V_{\alpha} - 9,8978 = 0$
PS16	a2	2,449	5,657	j1	6,124	-0,7071	$V_{\beta} + 1,7317.V_{\alpha} - 9,8978 = 0$
PS17	a3	1,6330	5,657	k1	5,715	-1,414	$V_{\beta} + 1,7322.V_{\alpha} - 8,4857 = 0$
PS18	a4	0,8165	5,657	l1	5,307	-2,121	$V_{\beta} + 1,7321.V_{\alpha} - 7,0713 = 0$
PS19	a5	0,0000	5,657	m1	4,899	-2,828	$V_{\beta} + 1,7320.V_{\alpha} - 5,6570 = 0$
PS20	a6	-0,8165	5,657	n1	4,491	-3,536	$V_{\beta} + 1,7321.V_{\alpha} - 4,2428 = 0$
PS21	a7	-1,6330	5,657	o1	4,082	-4,243	$V_{\beta} + 1,7323.V_{\alpha} - 2,8282 = 0$
PS22	a8	-2,449	5,657	p1	3,674	-4,950	$V_{\beta} + 1,7323.V_{\alpha} - 1,4145 = 0$
PS23	a9	-3,266	5,657	q1	3,266	-5,657	$V_{\beta} + 1,7321.V_{\alpha} = 0$
PS24	b10	-3,674	4,950	q2	2,449	-5,657	$V_{\beta} + 1,7323.V_{\alpha} + 1,4145 = 0$
PS25	c11	-4,082	4,243	q3	1,6330	-5,657	$V_{\beta} + 1,7323.V_{\alpha} + 2,8282 = 0$
PS26	d12	-4,491	3,536	q4	0,8165	-5,657	$V_{\beta} + 1,7321.V_{\alpha} + 4,2428 = 0$
PS27	e13	-4,899	2,828	q5	0,0000	-5,657	$V_{\beta} + 1,7320.V_{\alpha} + 5,6570 = 0$
PS28	f14	-5,307	2,121	q6	-0,8165	-5,657	$V_{\beta} + 1,7321.V_{\alpha} + 7,0713 = 0$
PS29	g15	-5,715	1,414	q7	-1,6330	-5,657	$V_{\beta} + 1,7322.V_{\alpha} + 8,4857 = 0$
PS30	h16	-6,124	0,7071	q8	-2,449	-5,657	$V_{\beta} + 1,7317.V_{\alpha} + 9,8978 = 0$
PS31	b1	3,674	4,950	q9	-3,674	4,950	$V_{\beta} - 4,9500 = 0$
PS32	c1	4,082	4,243	c11	-4,082	4,243	$V_{\beta} - 4,2430 = 0$
PS33	d1	4,491	3,536	d12	-4,491	3,536	$V_{\beta} - 3,5360 = 0$
PS34	e1	4,899	2,828	e13	-4,899	2,828	$V_{\beta} - 2,8280 = 0$
PS35	f1	5,307	2,121	f14	-5,307	2,121	$V_{\beta} - 2,1210 = 0$
PS36	g1	5,715	1,414	g15	-5,715	1,414	$V_{\beta} - 1,4140 = 0$
PS37	h1	6,124	0,7071	h16	-6,124	0,7071	$V_{\beta} - 0,7071 = 0$
PS38	i1	6,532	0,0000	i17	-6,532	0,0000	$V_{\beta} = 0$
PS39	j1	6,124	-0,7071	j16	-6,124	-0,7071	$V_{\beta} + 0,7071 = 0$
PS40	k1	5,715	-1,414	k15	-5,715	-1,414	$V_{\beta} + 1,4140 = 0$
PS41	l1	5,307	-2,121	l14	-5,307	-2,121	$V_{\beta} + 2,1210 = 0$
PS42	m1	4,899	-2,828	m13	-4,899	-2,828	$V_{\beta} + 2,8280 = 0$
PS43	n1	4,491	-3,536	n12	-4,491	-3,536	$V_{\beta} + 3,5360 = 0$
PS44	o1	4,082	-4,243	o11	-4,082	-4,243	$V_{\beta} + 4,2430 = 0$
PS45	p1	3,674	-4,950	p10	-3,674	-4,950	$V_{\beta} + 4,9500 = 0$

Identificados todos os planos limites (PL) e os planos de separação (PS), o hexágono ficou dividido em vários pequenos triângulos, gerando assim trezentos e oitenta e quatro (384) setores. Cada vértice do triângulo corresponde a um ponto, o qual pode ter um ou mais vetores associados a ele. Para futuramente localizar em qual setor (pequeno triângulo) o vetor de referência está, cada um desses espaços foram numerados, conforme a Figura 34.

Figura 34 - Identificação dos setores do hexágono (plano α - β)



Com esta identificação de cada setor, foi possível desenvolver o método de localização de V_{ref} .

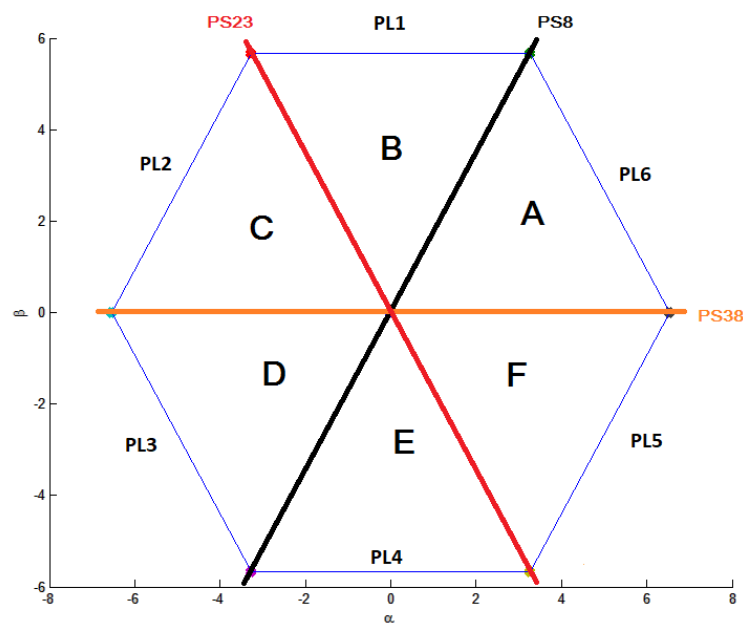
3.4.1. Lógica de busca do vetor de referência (V_{ref})

O vetor de referência (valor variante no tempo), oriundo das tensões trifásicas de referência, percorre o interior do hexágono e, o objetivo da lógica de busca é localizar o setor onde o V_{ref} está situado a cada instante de tempo. Para isto, foram utilizadas as equações dos planos limites (PL) (Tabela 13) e dos planos de separação (PS) (Tabela 14), que são representados por equações de reta. No método utilizado, os valores das coordenadas α, β do vetor de referência foram inseridos nas equações dos PL e PS, e de acordo com os resultados, foi possível identificar o setor em que o vetor V_{ref} está. Cabe salientar que um ponto qualquer

que pertença a reta PS ou PL, terá como resultado um valor nulo, quando este é aplicado na equação de PS ou PL. Sendo assim, caso um ponto seja inserido na equação e não resulte em zero, este pode ser identificado não pertencente a ela. Logo, no caso não nulo, o ponto está em uma região acima (equação da reta > 0) ou abaixo (equação da reta < 0). Desta forma, com este método foi possível determinar se o vetor de referência (ponto inserido na equação dos planos PL e PS) estava acima ou abaixo do plano. Desta forma, realizando diversas comparações desse modo, se chega ao setor em que o vetor está localizado naquele instante.

A lógica de busca foi realizada em etapas. A seguir, está explicado o procedimento de cada uma delas. Para facilitar a lógica, o hexágono foi dividido em seis grandes regiões, denominadas A, B, C, D, E e F, conforme a Figura 35.

Figura 35 - Destaque das grandes regiões do hexágono (plano α - β)

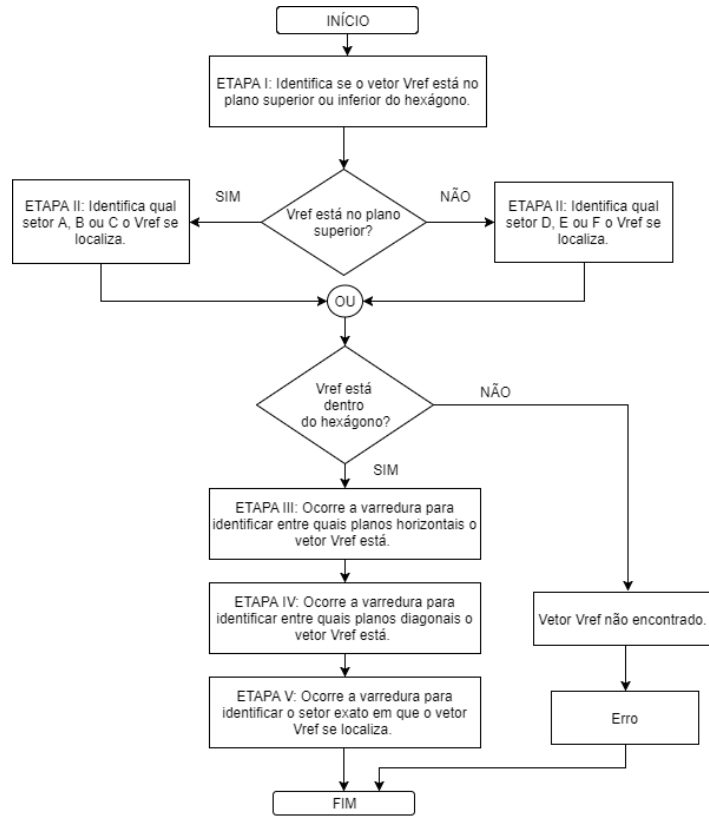


- ETAPA I: Inicialmente, o programa identifica se o vetor V_{ref} se encontra na parte superior e inferior (acima ou abaixo do eixo β).
 - Para tal separação, foi comparada a coordenada V_{β} do vetor V_{ref} ao valor zero do eixo β .
- ETAPA II: A lógica define em qual das três grandes regiões, superiores (A, B e C) ou inferiores (D, E e F), o programa deve procurar setor do vetor V_{ref} .
 - O software realiza esta operação substituindo os valores das coordenadas de V_{ref} nos planos de separação PS8, PS38 e PS23 da Figura 35 e comparando se é maior ou menor que zero.

- ETAPA III: Depois, ocorre uma busca por camadas na região selecionada. As primeiras camadas a serem verificadas são as horizontais.
 - Deste modo, as coordenadas do vetor V_{ref} (V_{α} , V_{β}) são inseridas nos planos horizontais e, quando este ponto estiver entre dois planos, o programa passa para a próxima etapa.
 - Sabe-se que o vetor V_{ref} se localiza entre dois planos quando, ao inserir as suas coordenadas nos planos, o valor resultante for maior que zero em um deles, e o valor do plano subsequente menor que zero. Sendo assim, nesta busca por camadas horizontais, ocorre a comparação entre os planos PL1 e PS31, depois entre PS31 e PS32, etc (ver Figura 34 para identificar os planos citados).
- ETAPA IV: Encontrada a faixa horizontal, ocorre uma varredura para verificar entre quais planos diagonais o vetor V_{ref} está localizado.
 - Assim, a varredura se desenvolve do mesmo modo da lógica anterior. Porém, a comparação ocorre entre os planos PL6 e PS16, após entre os planos PS16 e PS17, e assim por diante (ver Figura 34 para identificar os planos citados).
- ETAPA V: Encontrada a faixa diagonal, restará apenas dois setores possíveis e, através da comparação do plano da diagonal oposta, o setor é efetivamente localizado.

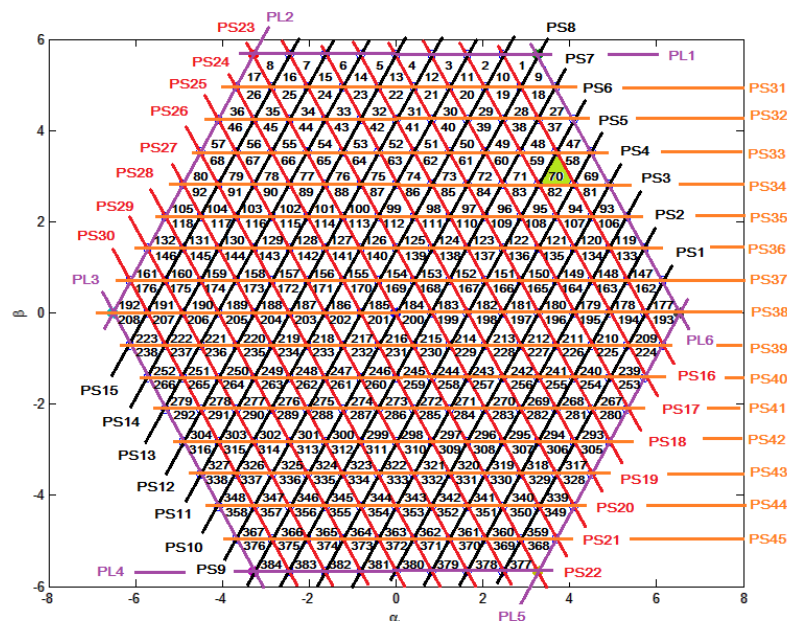
Para um melhor entendimento sobre o processo de busca do valor de referência, como também sobre o algoritmo de programação realizado para tal função, foi elaborado um diagrama de blocos (Figura 36), descrevendo as principais etapas do algoritmo. O diagrama de blocos ocorre dentro do bloco “Busca do setor” da Figura 20. É relevante ressaltar que, se o vetor de referência (V_{ref}) não for localizado dentro do hexágono (situação de saturação), ou seja, caso estiver fora dos limites do diagrama, o programa gera um erro e não realiza a sintetização das tensões de saída. Esta situação pode acontecer caso os valores iniciais do programa sejam alterados, como, por exemplo, diminuindo o valor de tensão base do barramento CC (V_{cc}).

Figura 36 - Diagrama de blocos sobre a rotina de busca do setor em que o vetor V_{ref} se localiza



Para melhorar o entendimento da lógica de busca do setor, foi realizado a seguir um exemplo de como foi localizado o setor 70, destacado na Figura 37. Ou seja, o vetor V_{ref} está situado neste setor. A seguir, a busca foi detalhada, esclarecendo os códigos utilizados no software de simulação matemática. Neste, os valores das coordenadas do vetor de referência foram utilizados nos planos PL e PS para realizar as comparações.

Figura 37 - Destaque do setor 70 no hexágono (plano α - β)



PARTE I e II: Algoritmo realiza a separação da parte superior e inferior do hexágono, definindo em qual região A, B, C, D, E e F o vetor V_{ref} está situado, conforme Figura 38. Com essa lógica de busca o vetor V_{ref} é localizado na região A, conforme destaque em verde na Figura 39. Sendo assim, o próximo passo é fazer uma busca por camadas na região A.

Figura 38 - Fluxograma da parte I e II do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono

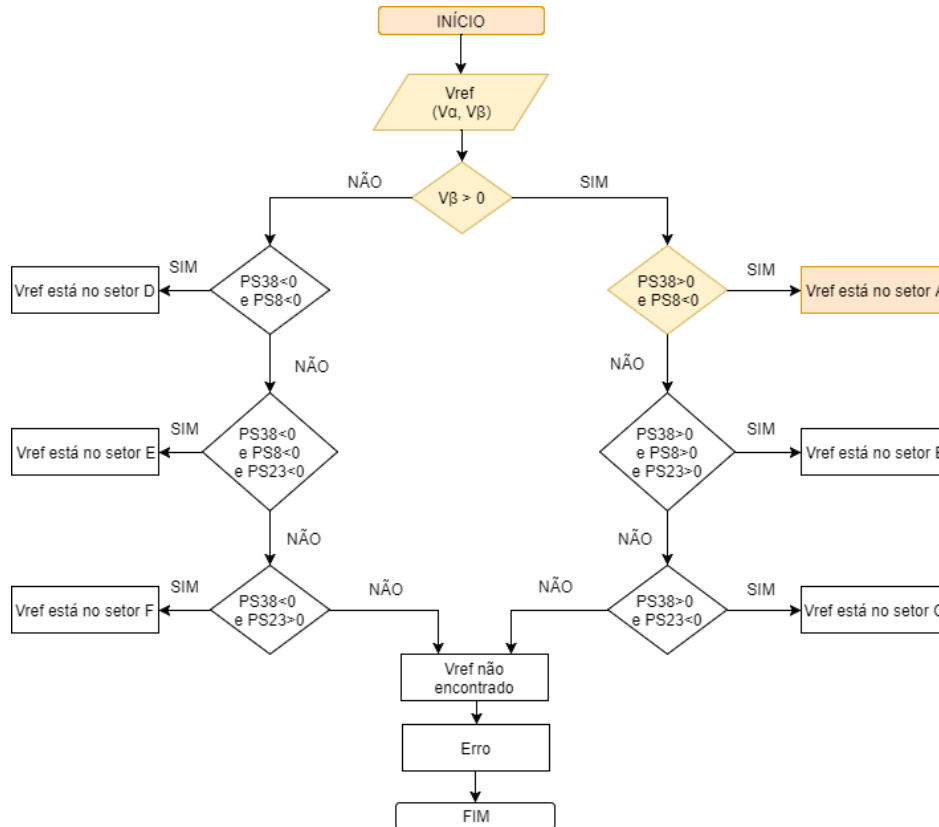
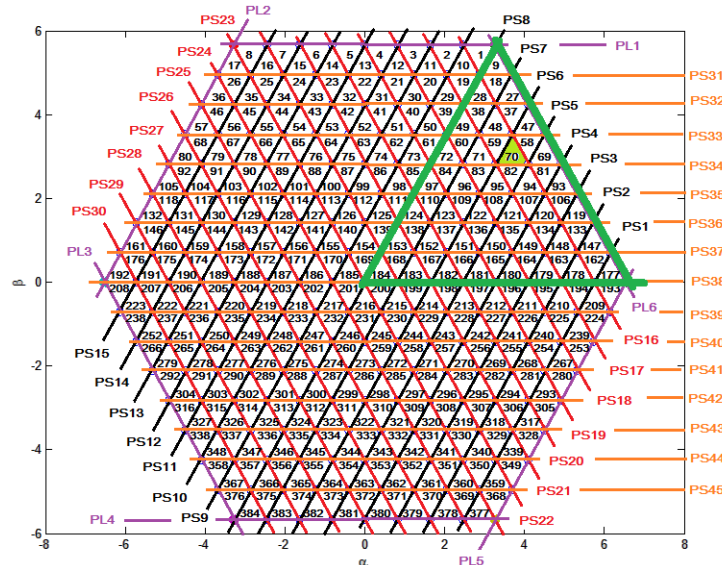


Figura 39 - Destaque da região A e do setor 70 do hexágono (plano α - β) - parte I e II do algoritmo



PARTE III: Dentro da região A, ocorre uma varredura entre os planos horizontais, ou seja, é verificado entre quais planos horizontais o vetor V_{ref} está. O algoritmo utilizado na programação está ilustrado na Figura 40, onde os blocos que possuem o pontilhado (...) indicam a sequência lógica de operações realizadas nos blocos anteriores e subsequentes a estes. Neste caso, o setor 70 foi encontrado quando a busca realizou a comparação dos planos PS33 e PS34, conforme destacado em amarelo na Figura 41.

Figura 40 - Fluxograma da parte III do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono

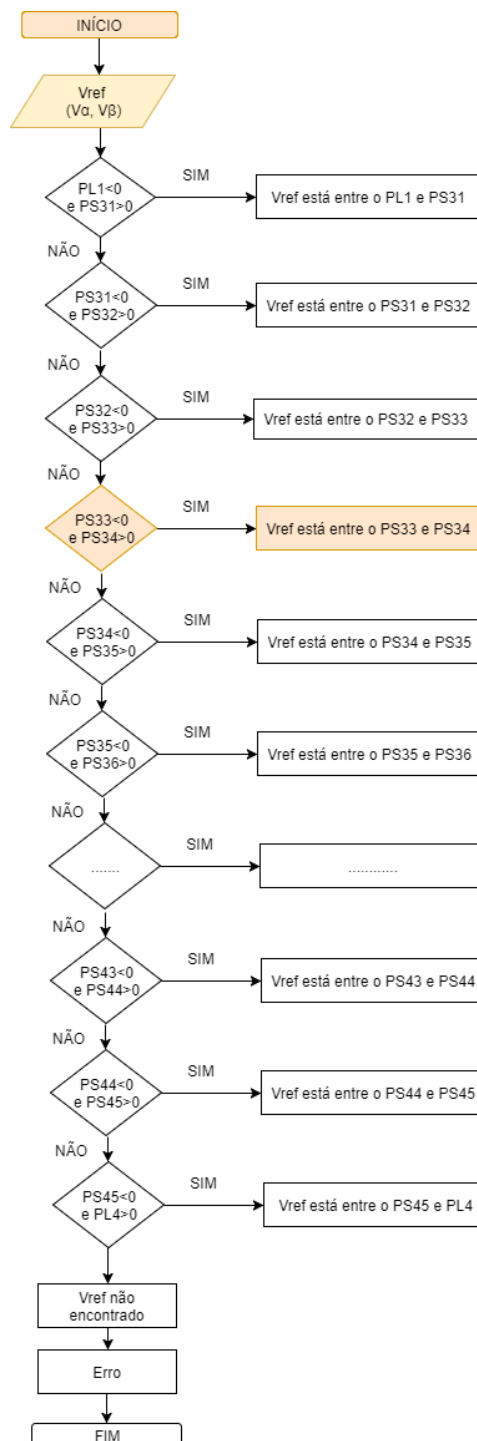
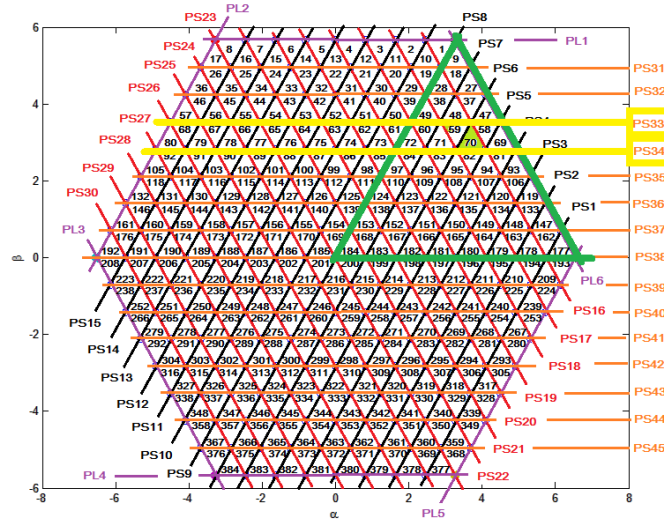


Figura 41 - O setor 70 do hexágono (plano- $\alpha\beta$) está entre os planos PS33 e PS34 - parte III do algoritmo



PARTE IV: Estando a busca na região A e dentro da região dos planos horizontais PS33 e PS34, ocorre então uma nova varredura para saber entre quais planos diagonais o vetor V_{ref} está situado. O algoritmo para esta operação está definido na Figura 42. Assim, o setor 70 foi localizado entre os planos PS16 e PS17, conforme o destaque em marrom na Figura 43.

Figura 42 - Fluxograma da parte IV do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono

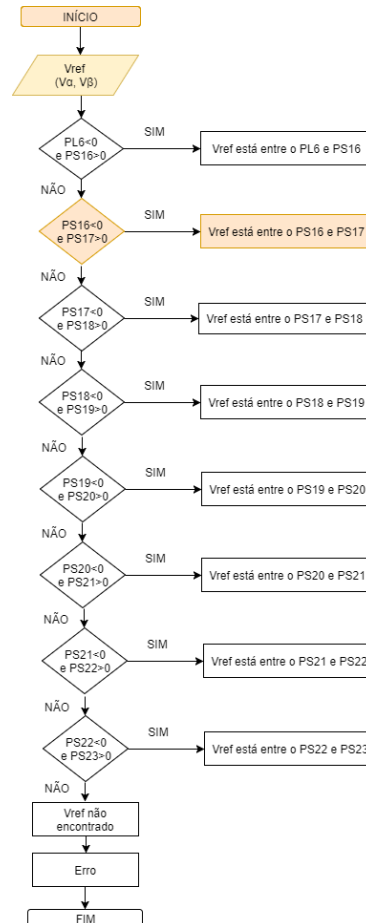
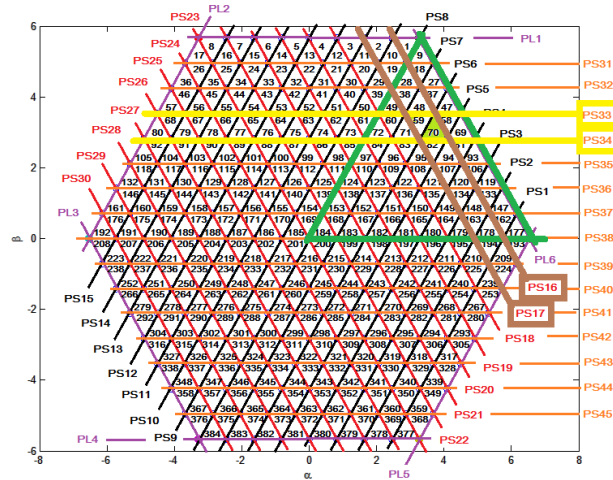


Figura 43 - O setor 70 do hexágono (plano α - β) está entre os planos PS16 e PS17 - parte IV do algoritmo



PARTE V: Por fim, é realizada outra varredura através de uma diagonal oposta aos planos PS16 a PS17, ou seja, utilizando um dos planos PS1 a PS7. Assim, pode-se localizar exatamente o setor 70. No caso do setor 70, como a varredura de busca está na região A, entre os planos PS33 e PS34 e entre os planos PS16 e PS17, então o plano com a diagonal oposta utilizado nesta região foi o plano PS6, destacado em vermelho na Figura 44. Este realiza a divisão entre os setores 59 e 70. Assim, é preciso verificar se o vetor V_{ref} está acima ou abaixo do plano PS6, conforme o algoritmo demonstrado na Figura 45.

Figura 44 - Localização do setor 70 do hexágono (plano α - β) abaixo do plano PS6 - parte V do algoritmo

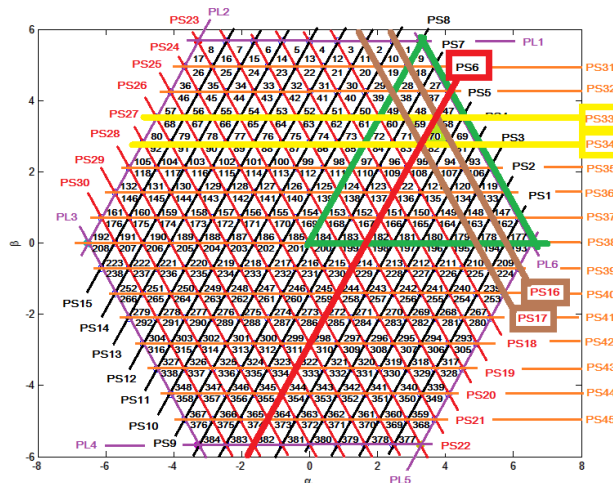
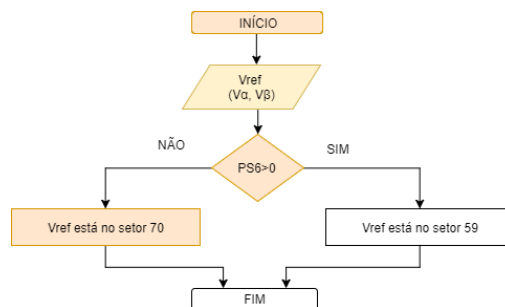


Figura 45 - Fluxograma da parte V do algoritmo de localização do vetor V_{ref} no hexágono



Esta varredura para encontrar o setor 70, demonstrada na região A, é realizada para todas as seis grandes regiões (A, B, C, D, E e F). Desta forma, é possível localizar o setor exato aonde o vetor de referência (V_{ref}) se encontra, em qualquer lugar do hexágono.

Como o vetor V_{ref} sintetiza uma tensão a partir da combinação dos vetores que compõem o setor ao qual ele se localiza, logo, a próxima etapa da modulação *space vector* (SV) foi calcular os tempos de acionamentos de cada um dos três vetores. Estes valores de tempo são adquiridos através das matrizes de decomposição dos setores.

3.5. OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE DECOMPOSIÇÃO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO

A obtenção das matrizes de decomposição tem como propósito incorporar os vetores mais próximos ao vetor V_{ref} no cálculo dos tempos de acionamento de cada vetor (vide dedução da equação (48) do Apêndice A). Para isso foi preciso saber quais foram os três vetores selecionados para cada setor (triângulo). Desta forma, foi elaborada a Tabela 15, baseadas nas Figura 34 (que nomeia os setores) e Figura 30 (que distingue os pontos), pelas quais foi possível associar os três pontos que formam cada um dos trezentos e oitenta e quatro (384) setores.

Tabela 15 - Identificação dos três pontos de cada um dos 384 setores no plano α - β

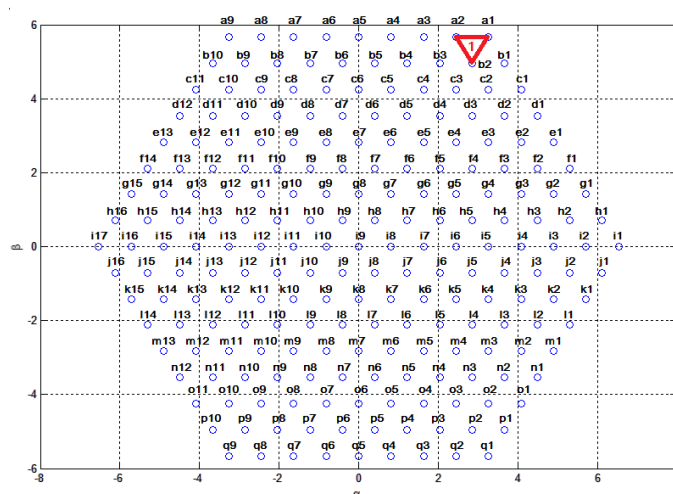
Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3
1	a1	a2	b2	97	f5	f6	e5	193	i1	i2	j1	289	l10	l11	m10
2	a2	a3	b3	98	f6	f7	e6	194	i2	i3	j2	290	l11	l12	m11
3	a3	a4	b4	99	f7	f8	e7	195	i3	i4	j3	291	l12	l13	m12
4	a4	a5	b5	100	f8	f9	e8	196	i4	i5	j4	292	l13	l14	m13
5	a5	a6	b6	101	f9	f10	e9	197	i5	i6	j5	293	m1	m2	l2
6	a6	a7	b7	102	f10	f11	e10	198	i6	i7	j6	294	m2	m3	l3
7	a7	a8	b8	103	f11	f12	e11	199	i7	i8	j7	295	m3	m4	l4
8	a8	a9	b9	104	f12	f13	e12	200	i8	i9	j8	296	m4	m5	l5
9	b1	b2	a1	105	f13	f14	e13	201	i9	i10	j9	297	m5	m6	l6
10	b2	b3	a2	106	f1	f2	g2	202	i10	i11	j10	298	m6	m7	l7
11	b3	b4	a3	107	f2	f3	g3	203	i11	i12	j11	299	m7	m8	l8
12	b4	b5	a4	108	f3	f4	g4	204	i12	i13	j12	300	m8	m9	l9
13	b5	b6	a5	109	f4	f5	g5	205	i13	i14	j13	301	m9	m10	l10
14	b6	b7	a6	110	f5	f6	g6	206	i14	i15	j14	302	m10	m11	l11
15	b7	b8	a7	111	f6	f7	g7	207	i15	i16	j15	303	m11	m12	l12
16	b8	b9	a8	112	f7	f8	g8	208	i16	i17	j16	304	m12	m13	l13
17	b9	b10	a9	113	f8	f9	g9	209	j1	j2	i2	305	m1	m2	n1
18	b1	b2	c2	114	f9	f10	g10	210	j2	j3	i3	306	m2	m3	n2
19	b2	b3	c3	115	f10	f11	g11	211	j3	j4	i4	307	m3	m4	n3
20	b3	b4	c4	116	f11	f12	g12	212	j4	j5	i5	308	m4	m5	n4
21	b4	b5	c5	117	f12	f13	g13	213	j5	j6	i6	309	m5	m6	n5
22	b5	b6	c6	118	f13	f14	g14	214	j6	j7	i7	310	m6	m7	n6
23	b6	b7	c7	119	g1	g2	f1	215	j7	j8	i8	311	m7	m8	n7
24	b7	b8	c8	120	g2	g3	f2	216	j8	j9	i9	312	m8	m9	n8

Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3
25	b8	b9	c9	121	g3	g4	f3	217	j9	j10	i10	313	m9	m10	n9
26	b9	b10	c10	122	g4	g5	f4	218	j10	j11	i11	314	m10	m11	n10
27	c1	c2	b1	123	g5	g6	f5	219	j11	j12	i12	315	m11	m12	n11
28	c2	c3	b2	124	g6	g7	f6	220	j12	j13	i13	316	m12	m13	n12
29	c3	c4	b3	125	g7	g8	f7	221	j13	j14	i14	317	n1	n2	m2
30	c4	c5	b4	126	g8	g9	f8	222	j14	j15	i15	318	n2	n3	m3
31	c5	c6	b5	127	g9	g10	f9	223	j15	j16	i16	319	n3	n4	m4
32	c6	c7	b6	128	g10	g11	f10	224	j1	j2	k1	320	n4	n5	m5
33	c7	c8	b7	129	g11	g12	f11	225	j2	j3	k2	321	n5	n6	m6
34	c8	c9	b8	130	g12	g13	f12	226	j3	j4	k3	322	n6	n7	m7
35	c9	c10	b9	131	g13	g14	f13	227	j4	j5	k4	323	n7	n8	m8
36	c10	c11	b10	132	g14	g15	f14	228	j5	j6	k5	324	n8	n9	m9
37	c1	c2	d2	133	g1	g2	h2	229	j6	j7	k6	325	n9	n10	m10
38	c2	c3	d3	134	g2	g3	h3	230	j7	j8	k7	326	n10	n11	m11
39	c3	c4	d4	135	g3	g4	h4	231	j8	j9	k8	327	n11	n12	m12
40	c4	c5	d5	136	g4	g5	h5	232	j9	j10	k9	328	n1	n2	o1
41	c5	c6	d6	137	g5	g6	h6	233	j10	j11	k10	329	n2	n3	o2
42	c6	c7	d7	138	g6	g7	h7	234	j11	j12	k11	330	n3	n4	o3
43	c7	c8	d8	139	g7	g8	h8	235	j12	j13	k12	331	n4	n5	o4
44	c8	c9	d9	140	g8	g9	h9	236	j13	j14	k13	332	n5	n6	o5
45	c9	c10	d10	141	g9	g10	h10	237	j14	j15	k14	333	n6	n7	o6
46	c10	c11	d11	142	g10	g11	h11	238	j15	j16	k15	334	n7	n8	o7
47	d1	d2	c1	143	g11	g12	h12	239	k1	k2	j2	335	n8	n9	o8
48	d2	d3	c2	144	g12	g13	h13	240	k2	k3	j3	336	n9	n10	o9
49	d3	d4	c3	145	g13	g14	h14	241	k3	k4	j4	337	n10	n11	o10
50	d4	d5	c4	146	g14	g15	h15	242	k4	k5	j5	338	n11	n12	o11
51	d5	d6	c5	147	h1	h2	g1	243	k5	k6	j6	339	o1	o2	n2
52	d6	d7	c6	148	h2	h3	g2	244	k6	k7	j7	340	o2	o3	n3
53	d7	d8	c7	149	h3	h4	g3	245	k7	k8	j8	341	o3	o4	n4
54	d8	d9	c8	150	h4	h5	g4	246	k8	k9	j9	342	o4	o5	n5
55	d9	d10	c9	151	h5	h6	g5	247	k9	k10	j10	343	o5	o6	n6
56	d10	d11	c10	152	h6	h7	g6	248	k10	k11	j11	344	o6	o7	n7
57	d11	d12	c11	153	h7	h8	g7	249	k11	k12	j12	345	o7	o8	n8
58	d1	d2	e2	154	h8	h9	g8	250	k12	k13	j13	346	o8	o9	n9
59	d2	d3	e3	155	h9	h10	g9	251	k13	k14	j14	347	o9	o10	n10
60	d3	d4	e4	156	h10	h11	g10	252	k14	k15	j15	348	o10	o11	n11
61	d4	d5	e5	157	h11	h12	g11	253	k1	k2	l1	349	o1	o2	p1
62	d5	d6	e6	158	h12	h13	g12	254	k2	k3	l2	350	o2	o3	p2
63	d6	d7	e7	159	h13	h14	g13	255	k3	k4	l3	351	o3	o4	p3
64	d7	d8	e8	160	h14	h15	g14	256	k4	k5	l4	352	o4	o5	p4
65	d8	d9	e9	161	h15	h16	g15	257	k5	k6	l5	353	o5	o6	p5
66	d9	d10	e10	162	h1	h2	i2	258	k6	k7	l6	354	o6	o7	p6
67	d10	d11	e11	163	h2	h3	i3	259	k7	k8	l7	355	o7	o8	p7
68	d11	d12	e12	164	h3	h4	i4	260	k8	k9	l8	356	o8	o9	p8
69	e1	e2	d1	165	h4	h5	i5	261	k9	k10	l9	357	o9	o10	p9
70	e2	e3	d2	166	h5	h6	i6	262	k10	k11	l10	358	o10	o11	p10
71	e3	e4	d3	167	h6	h7	i7	263	k11	k12	l11	359	p1	p2	o2
72	e4	e5	d4	168	h7	h8	i8	264	k12	k13	l12	360	p2	p3	o3
73	e5	e6	d5	169	h8	h9	i9	265	k13	k14	l13	361	p3	p4	o4
74	e6	e7	d6	170	h9	h10	i10	266	k14	k15	l14	362	p4	p5	o5
75	e7	e8	d7	171	h10	h11	i11	267	l1	l2	k2	363	p5	p6	o6
76	e8	e9	d8	172	h11	h12	i12	268	l2	l3	k3	364	p6	p7	o7
77	e9	e10	d9	173	h12	h13	i13	269	l3	l4	k4	365	p7	p8	o8
78	e10	e11	d10	174	h13	h14	i14	270	l4	l5	k5	366	p8	p9	o9
79	e11	e12	d11	175	h14	h15	i15	271	l5	l6	k6	367	p9	p10	o10
80	e12	e13	d12	176	h15	h16	i16	272	l6	l7	k7	368	p1	p2	q1
81	e1	e2	f2	177	i1	i2	h1	273	l7	l8	k8	369	p2	p3	q2

Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3	Setor	P1	P2	P3
82	e2	e3	f3	178	i2	i3	h2	274	l8	l9	k9	370	p3	p4	q3
83	e3	e4	f4	179	i3	i4	h3	275	l9	l10	k10	371	p4	p5	q4
84	e4	e5	f5	180	i4	i5	h4	276	l10	l11	k11	372	p5	p6	q5
85	e5	e6	f6	181	i5	i6	h5	277	l11	l12	k12	373	p6	p7	q6
86	e6	e7	f7	182	i6	i7	h6	278	l12	l13	k13	374	p7	p8	q7
87	e7	e8	f8	183	i7	i8	h7	279	l13	l14	k14	375	p8	p9	q8
88	e8	e9	f9	184	i8	i9	h8	280	l1	l2	m1	376	p9	p10	q9
89	e9	e10	f10	185	i9	i10	h9	281	l2	l3	m2	377	q1	q2	p2
90	e10	e11	f11	186	i10	i11	h10	282	l3	l4	m3	378	q2	q3	p3
91	e11	e12	f12	187	i11	i12	h11	283	l4	l5	m4	379	q3	q4	p4
92	e12	e13	f13	188	i12	i13	h12	284	l5	l6	m5	380	q4	q5	p5
93	f1	f2	e1	189	i13	i14	h13	285	l6	l7	m6	381	q5	q6	p6
94	f2	f3	e2	190	i14	i15	h14	286	l7	l8	m7	382	q6	q7	p7
95	f3	f4	e3	191	i15	i16	h15	287	l8	l9	m8	383	q7	q8	p8
96	f4	f5	e4	192	i16	i17	h16	288	l9	l10	m9	384	q8	q9	p9

Como exemplo, o setor 1, em destaque na Figura 46, foi utilizado para demonstração sobre a elaboração da Tabela 15 referente a identificação dos pontos de cada setor. Assim, a Tabela 15 mostra o setor 1 e os pontos P1, P2 e P3 (a1, a2 e b2) de formação, que simbolizam os vértices do triângulo.

Figura 46 - Identificação dos três pontos do setor 1 no plano α - β



Conhecido os pontos, deseja-se obter um vetor específico para cada ponto, uma vez que em alguns pontos pode ter mais de um vetor. Assim, segundo a Tabela 12, foi possível verificar que alguns dos pontos dos triângulos que formam os setores associam mais de um vetor, como, por exemplo, o ponto i9 de coordenadas $\alpha, \beta = (0,0000; 0,0000)$, que pode ser representado por qualquer vetor a seguir: V1 – V274 – V547 – V92 – V365 – V638 – V183 – V456 – V729. Deste modo, foi selecionado, de forma aleatória, um vetor possível para cada setor, como mostra a Tabela 16. No caso do ponto i9, foi selecionado o vetor V1. Esta Tabela 16 possui os mesmos dados a Tabela 15, porém com a adição dos vetores selecionados para cada ponto.

Tabela 16 - Seleção dos três vetores de cada um dos pontos dos 384 setores no plano α - β

Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor
1	a1	V9	a2	V90	b2	V8	129	g11	V509	g12	V499	f11	V500	257	k5	V39	k6	V29	l5	V38
2	a2	V90	a3	V171	b3	V89	130	g12	V499	g13	V489	f12	V490	258	k6	V29	k7	V19	l6	V28
3	a3	V171	a4	V252	b4	V261	131	g13	V489	g14	V570	f13	V571	259	k7	V19	k8	V282	l7	V291
4	a4	V252	a5	V333	b5	V251	132	g14	V570	g15	V651	f14	V652	260	k8	V282	k9	V272	l8	V281
5	a5	V333	a6	V414	b6	V332	133	g1	V63	g2	V53	h2	V62	261	k9	V272	k10	V262	l9	V271
6	a6	V414	a7	V495	b7	V504	134	g2	V53	g3	V43	h3	V52	262	k10	V262	k11	V525	l10	V534
7	a7	V495	a8	V576	b8	V494	135	g3	V43	g4	V33	h4	V42	263	k11	V525	k12	V515	l11	V524
8	a8	V576	a9	V657	b9	V575	136	g4	V33	g5	V23	h5	V32	264	k12	V515	k13	V505	l12	V514
9	b1	V18	b2	V8	a1	V9	137	g5	V23	g6	V13	h6	V22	265	k13	V505	k14	V586	l13	V595
10	b2	V8	b3	V89	a2	V90	138	g6	V13	g7	V3	h7	V12	266	k14	V586	k15	V667	l14	V676
11	b3	V89	b4	V261	a3	V171	139	g7	V3	g8	V266	h8	V2	267	l1	V78	l2	V68	k2	V69
12	b4	V261	b5	V251	a4	V252	140	g8	V266	g9	V256	h9	V265	268	l2	V68	l3	V58	k3	V59
13	b5	V251	b6	V332	a5	V333	141	g9	V256	g10	V246	h10	V255	269	l3	V58	l4	V48	k4	V49
14	b6	V332	b7	V504	a6	V414	142	g10	V246	g11	V509	h11	V245	270	l4	V48	l5	V38	k5	V39
15	b7	V504	b8	V494	a7	V495	143	g11	V509	g12	V499	h12	V508	271	l5	V38	l6	V28	k6	V29
16	b8	V494	b9	V575	a8	V576	144	g12	V499	g13	V489	h13	V498	272	l6	V28	l7	V291	k7	V19
17	b9	V575	b10	V656	a9	V657	145	g13	V489	g14	V570	h14	V488	273	l7	V291	l8	V281	k8	V282
18	b1	V18	b2	V8	c2	V17	146	g14	V570	g15	V651	h15	V569	274	l8	V281	l9	V271	k9	V272
19	b2	V8	b3	V89	c3	V7	147	h1	V72	h2	V62	g1	V63	275	l9	V271	l10	V534	k10	V262
20	b3	V89	b4	V261	c4	V270	148	h2	V62	h3	V52	g2	V53	276	l10	V534	l11	V524	k11	V525
21	b4	V261	b5	V251	c5	V260	149	h3	V52	h4	V42	g3	V43	277	l11	V524	l12	V514	k12	V515
22	b5	V251	b6	V332	c6	V250	150	h4	V42	h5	V32	g4	V33	278	l12	V514	l13	V595	k13	V505
23	b6	V332	b7	V504	c7	V513	151	h5	V32	h6	V22	g5	V23	279	l13	V595	l14	V676	k14	V586
24	b7	V504	b8	V494	c8	V503	152	h6	V22	h7	V12	g6	V13	280	l1	V78	l2	V68	m1	V77
25	b8	V494	b9	V575	c9	V493	153	h7	V12	h8	V2	g7	V3	281	l2	V68	l3	V58	m2	V67
26	b9	V575	b10	V656	c10	V574	154	h8	V2	h9	V265	g8	V266	282	l3	V58	l4	V48	m3	V57
27	c1	V27	c2	V17	b1	V18	155	h9	V265	h10	V255	g9	V256	283	l4	V48	l5	V38	m4	V47
28	c2	V17	c3	V7	b2	V8	156	h10	V255	h11	V245	g10	V246	284	l5	V38	l6	V28	m5	V37
29	c3	V7	c4	V270	b3	V89	157	h11	V245	h12	V508	g11	V509	285	l6	V28	l7	V291	m6	V300
30	c4	V270	c5	V260	b4	V261	158	h12	V508	h13	V498	g12	V499	286	l7	V291	l8	V281	m7	V290
31	c5	V260	c6	V250	b5	V251	159	h13	V498	h14	V488	g13	V489	287	l8	V281	l9	V271	m8	V280

Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor
32	c6	V250	c7	V513	b6	V332	160	h14	V488	h15	V569	g14	V570	288	l9	V271	l10	V534	m9	V543
33	c7	V513	c8	V503	b7	V504	161	h15	V569	h16	V650	g15	V651	289	l10	V534	l11	V524	m10	V533
34	c8	V503	c9	V493	b8	V494	162	h1	V72	h2	V62	i2	V71	290	l11	V524	l12	V514	m11	V523
35	c9	V493	c10	V574	b9	V575	163	h2	V62	h3	V52	i3	V61	291	l12	V514	l13	V595	m12	V604
36	c10	V574	c11	V655	b10	V656	164	h3	V52	h4	V42	i4	V51	292	l13	V595	l14	V676	m13	V685
37	e1	V27	e2	V17	d2	V26	165	h4	V42	h5	V32	i5	V41	293	m1	V77	m2	V67	l2	V68
38	e2	V17	c3	V7	d3	V16	166	h5	V32	h6	V22	i6	V31	294	m2	V67	m3	V57	l3	V58
39	c3	V7	c4	V270	d4	V6	167	h6	V22	h7	V12	i7	V21	295	m3	V57	m4	V47	l4	V48
40	c4	V270	c5	V260	d5	V269	168	h7	V12	h8	V2	i8	V11	296	m4	V47	m5	V37	l5	V38
41	c5	V260	c6	V250	d6	V259	169	h8	V2	h9	V265	i9	V1	297	m5	V37	m6	V300	l6	V28
42	c6	V250	c7	V513	d7	V249	170	h9	V265	h10	V255	i10	V264	298	m6	V300	m7	V290	l7	V291
43	c7	V513	c8	V503	d8	V512	171	h10	V255	h11	V245	i11	V254	299	m7	V290	m8	V280	l8	V281
44	c8	V503	c9	V493	d9	V502	172	h11	V245	h12	V508	i12	V244	300	m8	V280	m9	V543	l9	V271
45	c9	V493	c10	V574	d10	V492	173	h12	V508	h13	V498	i13	V507	301	m9	V543	m10	V533	l10	V534
46	c10	V574	c11	V655	d11	V573	174	h13	V498	h14	V488	i14	V497	302	m10	V533	m11	V523	l11	V524
47	d1	V36	d2	V26	c1	V27	175	h14	V488	h15	V569	i15	V487	303	m11	V523	m12	V604	l12	V514
48	d2	V26	d3	V16	e2	V17	176	h15	V569	h16	V650	i16	V568	304	m12	V604	m13	V685	l13	V595
49	d3	V16	d4	V6	c3	V7	177	i1	V81	i2	V71	h1	V72	305	m1	V77	m2	V67	n1	V76
50	d4	V6	d5	V269	c4	V270	178	i2	V71	i3	V61	h2	V62	306	m2	V67	m3	V57	n2	V66
51	d5	V269	d6	V259	c5	V260	179	i3	V61	i4	V51	h3	V52	307	m3	V57	m4	V47	n3	V56
52	d6	V259	d7	V249	c6	V250	180	i4	V51	i5	V41	h4	V42	308	m4	V47	m5	V37	n4	V46
53	d7	V249	d8	V512	c7	V513	181	i5	V41	i6	V31	h5	V32	309	m5	V37	m6	V300	n5	V309
54	d8	V512	d9	V502	c8	V503	182	i6	V31	i7	V21	h6	V22	310	m6	V300	m7	V290	n6	V299
55	d9	V502	d10	V492	c9	V493	183	i7	V21	i8	V11	h7	V12	311	m7	V290	m8	V280	n7	V289
56	d10	V492	d11	V573	c10	V574	184	i8	V11	i9	V1	h8	V2	312	m8	V280	m9	V543	n8	V552
57	d11	V573	d12	V654	c11	V655	185	i9	V1	i10	V264	h9	V265	313	m9	V543	m10	V533	n9	V542
58	d1	V36	d2	V26	e2	V35	186	i10	V264	i11	V254	h10	V255	314	m10	V533	m11	V523	n10	V532
59	d2	V26	d3	V16	e3	V25	187	i11	V254	i12	V244	h11	V245	315	m11	V523	m12	V604	n11	V613
60	d3	V16	d4	V6	e4	V15	188	i12	V244	i13	V507	h12	V508	316	m12	V604	m13	V685	n12	V694
61	d4	V6	d5	V269	e5	V5	189	i13	V507	i14	V497	h13	V498	317	n1	V76	n2	V66	m2	V67
62	d5	V269	d6	V259	e6	V268	190	i14	V497	i15	V487	h14	V488	318	n2	V66	n3	V56	m3	V57
63	d6	V259	d7	V249	e7	V258	191	i15	V487	i16	V568	h15	V569	319	n3	V56	n4	V46	m4	V47
64	d7	V249	d8	V512	e8	V248	192	i16	V568	i17	V649	h16	V650	320	n4	V46	n5	V309	m5	V37
65	d8	V512	d9	V502	e9	V511	193	i1	V81	i2	V71	j1	V80	321	n5	V309	n6	V299	m6	V300
66	d9	V502	d10	V492	e10	V501	194	i2	V71	i3	V61	j2	V70	322	n6	V299	n7	V289	m7	V290
67	d10	V492	d11	V573	e11	V491	195	i3	V61	i4	V51	j3	V60	323	n7	V289	n8	V552	m8	V280
68	d11	V573	d12	V654	e12	V572	196	i4	V51	i5	V41	j4	V50	324	n8	V552	n9	V542	m9	V543

Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor
69	e1	V45	e2	V35	d1	V36	197	i5	V41	i6	V31	j5	V40	325	n9	V542	n10	V532	m10	V533
70	e2	V35	e3	V25	d2	V26	198	i6	V31	i7	V21	j6	V30	326	n10	V532	n11	V613	m11	V523
71	e3	V25	e4	V15	d3	V16	199	i7	V21	i8	V11	j7	V20	327	n11	V613	n12	V694	m12	V604
72	e4	V15	e5	V5	d4	V6	200	i8	V11	i9	V1	j8	V10	328	n1	V76	n2	V66	o1	V75
73	e5	V5	e6	V268	d5	V269	201	i9	V1	i10	V264	j9	V273	329	n2	V66	n3	V56	o2	V65
74	e6	V268	e7	V258	d6	V259	202	i10	V264	i11	V254	j10	V263	330	n3	V56	n4	V46	o3	V55
75	e7	V258	e8	V248	d7	V249	203	i11	V254	i12	V244	j11	V253	331	n4	V46	n5	V309	o4	V318
76	e8	V248	e9	V511	d8	V512	204	i12	V244	i13	V507	j12	V516	332	n5	V309	n6	V299	o5	V308
77	e9	V511	e10	V501	d9	V502	205	i13	V507	i14	V497	j13	V506	333	n6	V299	n7	V289	o6	V298
78	e10	V501	e11	V491	d10	V492	206	i14	V497	i15	V487	j14	V496	334	n7	V289	n8	V552	o7	V561
79	e11	V491	e12	V572	d11	V573	207	i15	V487	i16	V568	j15	V577	335	n8	V552	n9	V542	o8	V551
80	e12	V572	e13	V653	d12	V654	208	i16	V568	i17	V649	j16	V658	336	n9	V542	n10	V532	o9	V541
81	e1	V45	e2	V35	f2	V44	209	j1	V80	j2	V70	i2	V71	337	n10	V532	n11	V613	o10	V622
82	e2	V35	e3	V25	f3	V34	210	j2	V70	j3	V60	i3	V61	338	n11	V613	n12	V694	o11	V703
83	e3	V25	e4	V15	f4	V24	211	j3	V60	j4	V50	i4	V51	339	o1	V75	o2	V65	n2	V66
84	e4	V15	e5	V5	f5	V14	212	j4	V50	j5	V40	i5	V41	340	o2	V65	o3	V55	n3	V56
85	e5	V5	e6	V268	f6	V4	213	j5	V40	j6	V30	i6	V31	341	o3	V55	o4	V318	n4	V46
86	e6	V268	e7	V258	f7	V267	214	j6	V30	j7	V20	i7	V21	342	o4	V318	o5	V308	n5	V309
87	e7	V258	e8	V248	f8	V257	215	j7	V20	j8	V10	i8	V11	343	o5	V308	o6	V298	n6	V299
88	e8	V248	e9	V511	f9	V247	216	j8	V10	j9	V273	i9	V1	344	o6	V298	o7	V561	n7	V289
89	e9	V511	e10	V501	f10	V510	217	j9	V273	j10	V263	i10	V264	345	o7	V561	o8	V551	n8	V552
90	e10	V501	e11	V491	f11	V500	218	j10	V263	j11	V253	i11	V254	346	o8	V551	o9	V541	n9	V542
91	e11	V491	e12	V572	f12	V490	219	j11	V253	j12	V516	i12	V244	347	o9	V541	o10	V622	n10	V532
92	e12	V572	e13	V653	f13	V571	220	j12	V516	j13	V506	i13	V507	348	o10	V622	o11	V703	n11	V613
93	f1	V54	f2	V44	e1	V45	221	j13	V506	j14	V496	i14	V497	349	o1	V75	o2	V65	p1	V74
94	f2	V44	f3	V34	e2	V35	222	j14	V496	j15	V577	i15	V487	350	o2	V65	o3	V55	p2	V64
95	f3	V34	f4	V24	e3	V25	223	j15	V577	j16	V658	i16	V568	351	o3	V55	o4	V318	p3	V145
96	f4	V24	f5	V14	e4	V15	224	j1	V80	j2	V70	k1	V79	352	o4	V318	o5	V308	p4	V317
97	f5	V14	f6	V4	e5	V5	225	j2	V70	j3	V60	k2	V69	353	o5	V308	o6	V298	p5	V307
98	f6	V4	f7	V267	e6	V268	226	j3	V60	j4	V50	k3	V59	354	o6	V298	o7	V561	p6	V388
99	f7	V267	f8	V257	e7	V258	227	j4	V50	j5	V40	k4	V49	355	o7	V561	o8	V551	p7	V560
100	f8	V257	f9	V247	e8	V248	228	j5	V40	j6	V30	k5	V39	356	o8	V551	o9	V541	p8	V550
101	f9	V247	f10	V510	e9	V511	229	j6	V30	j7	V20	k6	V29	357	o9	V541	o10	V622	p9	V631
102	f10	V510	f11	V500	e10	V501	230	j7	V20	j8	V10	k7	V19	358	o10	V622	o11	V703	p10	V712
103	f11	V500	f12	V490	e11	V491	231	j8	V10	j9	V273	k8	V282	359	p1	V74	p2	V64	o2	V65
104	f12	V490	f13	V571	e12	V572	232	j9	V273	j10	V263	k9	V272	360	p2	V64	p3	V145	o3	V55
105	f13	V571	f14	V652	e13	V653	233	j10	V263	j11	V253	k10	V262	361	p3	V145	p4	V317	o4	V318

Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor	Setor	P1	Vetor	P2	Vetor	P3	Vetor
106	f1	V54	f2	V44	g2	V53	234	j11	V253	j12	V516	k11	V525	362	p4	V317	p5	V307	o5	V308
107	f2	V44	f3	V34	g3	V43	235	j12	V516	j13	V506	k12	V515	363	p5	V307	p6	V388	o6	V298
108	f3	V34	f4	V24	g4	V33	236	j13	V506	j14	V496	k13	V505	364	p6	V388	p7	V560	o7	V561
109	f4	V24	f5	V14	g5	V23	237	j14	V496	j15	V577	k14	V586	365	p7	V560	p8	V550	o8	V551
110	f5	V14	f6	V4	g6	V13	238	j15	V577	j16	V658	k15	V667	366	p8	V550	p9	V631	o9	V541
111	f6	V4	f7	V267	g7	V3	239	k1	V79	k2	V69	j2	V70	367	p9	V631	p10	V712	o10	V622
112	f7	V267	f8	V257	g8	V266	240	k2	V69	k3	V59	j3	V60	368	p1	V74	p2	V64	q1	V73
113	f8	V257	f9	V247	g9	V256	241	k3	V59	k4	V49	j4	V50	369	p2	V64	p3	V145	q2	V154
114	f9	V247	f10	V510	g10	V246	242	k4	V49	k5	V39	j5	V40	370	p3	V145	p4	V317	q3	V235
115	f10	V510	f11	V500	g11	V509	243	k5	V39	k6	V29	j6	V30	371	p4	V317	p5	V307	q4	V316
116	f11	V500	f12	V490	g12	V499	244	k6	V29	k7	V19	j7	V20	372	p5	V307	p6	V388	q5	V397
117	f12	V490	f13	V571	g13	V489	245	k7	V19	k8	V282	j8	V10	373	p6	V388	p7	V560	q6	V478
118	f13	V571	f14	V652	g14	V570	246	k8	V282	k9	V272	j9	V273	374	p7	V560	p8	V550	q7	V559
119	g1	V63	g2	V53	f1	V54	247	k9	V272	k10	V262	j10	V263	375	p8	V550	p9	V631	q8	V640
120	g2	V53	g3	V43	f2	V44	248	k10	V262	k11	V525	j11	V253	376	p9	V631	p10	V712	q9	V721
121	g3	V43	g4	V33	f3	V34	249	k11	V525	k12	V515	j12	V516	377	q1	V73	q2	V154	p2	V64
122	g4	V33	g5	V23	f4	V24	250	k12	V515	k13	V505	j13	V506	378	q2	V154	q3	V235	p3	V145
123	g5	V23	g6	V13	f5	V14	251	k13	V505	k14	V586	j14	V496	379	q3	V235	q4	V316	p4	V317
124	g6	V13	g7	V3	f6	V4	252	k14	V586	k15	V667	j15	V577	380	q4	V316	q5	V397	p5	V307
125	g7	V3	g8	V266	f7	V267	253	k1	V79	k2	V69	11	V78	381	q5	V397	q6	V478	p6	V388
126	g8	V266	g9	V256	f8	V257	254	k2	V69	k3	V59	12	V68	382	q6	V478	q7	V559	p7	V560
127	g9	V256	g10	V246	f9	V247	255	k3	V59	k4	V49	13	V58	383	q7	V559	q8	V640	p8	V550
128	g10	V246	g11	V509	f10	V510	256	k4	V49	k5	V39	14	V48	384	q8	V640	q9	V721	p9	V631

Agora que cada ponto já possui um vetor específico para representá-lo, foi possível continuar com o processo de obtenção das matrizes de decomposição (M). Para tanto, foi realizado, a partir da Tabela 16, a matriz de decomposição de cada um dos trezentos e oitenta e quatro (384) setores. Como exemplo sobre a obtenção da matriz de decomposição de um setor, foi desenvolvido a matriz do setor 1 a seguir.

Tem-se, segundo a Tabela 16, os seguintes vetores de comutação associados a ao setor 1: V9, V90, V8. Desta forma, para que a tensão média produzida pelo inversor em um período de comutação T seja igual a V_{ref} , foi aplicado o desenvolvendo das etapas da modulação SV apresentadas no subcapítulo A.5 do Apêndice A (equações (41) a (48)) para o setor 1, resultando na equação (10), que calcula os tempos de ativação de cada vetor.

$$V_{ref} = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_{t_0}^{t_1} V9. dt + \int_{t_1}^{t_2} V90. dt + \int_{t_2}^T V8. dt \right]$$

$$\text{Onde: } \begin{aligned} V_{ref} \cdot T &= V9 \cdot \Delta t_0 + V90 \cdot \Delta t_1 + V8 \cdot \Delta t_2 \\ T &= \Delta t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ref} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T = \begin{bmatrix} V9 & V90 & V8 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V9_{\alpha} & V90_{\alpha} & V8_{\alpha} \\ V9_{\beta} & V90_{\beta} & V8_{\beta} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T \quad (10)$$

A matriz inversa do setor 1 da equação (10) é a matriz de decomposição deste setor. Logo, pode-se nomeá-la M1. Substituindo M1 na equação (10) se obtém a equação (11).

$$\begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} = M1 \cdot \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T \quad (11)$$

Através da equação (10) ou (11) se determina os tempos que cada vetor vai permanecer ativado quando o vetor de referência V_{ref} estiver no setor 1 (S1). Assim se garante que a tensão média será sintetizada pelo inversor em um período T quando V_{ref} se encontrar nesta região.

Este processo foi realizado para todos os trezentos e oitenta e quatro (384) setores, ou seja, para cada setor, há três vetores e uma matriz de decomposição (M) que utiliza os referidos vetores. Com isso foi possível calcular os tempos de ativação de cada vetor envolvido no setor em que se encontra o V_{ref} . O próximo passo foi definir a sequência de comutação.

3.6. DEFINIÇÃO DA SEQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO DO INVERSOR HÍBRIDO ASSIMÉTRICO PROPOSTO

Após selecionados os três vetores que compõem cada setor para formar a matriz de decomposição (conforme Tabela 16), para assim conhecer os tempos de chaveamento dos vetores, foi necessário escolher qual seria a sequência de comutação dos vetores, ou seja, qual vetor seria acionado primeiro, para depois ativar o segundo, e em seguida o terceiro.

A escolha da sequência de comutação para as simulações iniciais desta dissertação foi realizada de forma aleatória, ou seja, para cada setor foram escolhidos em sequência de vetores sem nenhuma análise em relação aos valores de tensão que cada vetor gera. Assim, através da consulta da Tabela 16 foi elaborada a Tabela 17 com as mesmas combinações de vetores. Portanto, na Tabela 17 está exposta a sequência de comutação dos três vetores para cada um dos trezentos e oitenta e oito (384) setores.

Tabela 17 - Sequência de chaveamento aleatória dos 384 setores

Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência		
1	V9	V90	V8	65	V512	V502	V511	129	V509	V499	V500	193	V81	V71	V80	257	V39	V29	V38	321	V309	V299	V300
2	V90	V171	V89	66	V502	V492	V501	130	V499	V489	V490	194	V71	V61	V70	258	V29	V19	V28	322	V299	V289	V290
3	V171	V252	V261	67	V492	V573	V491	131	V489	V570	V571	195	V61	V51	V60	259	V19	V282	V291	323	V289	V552	V280
4	V252	V333	V251	68	V573	V654	V572	132	V570	V651	V652	196	V51	V41	V50	260	V282	V272	V281	324	V552	V542	V543
5	V333	V414	V332	69	V45	V35	V36	133	V63	V53	V62	197	V41	V31	V40	261	V272	V262	V271	325	V542	V532	V533
6	V414	V495	V504	70	V35	V25	V26	134	V53	V43	V52	198	V31	V21	V30	262	V262	V525	V534	326	V532	V613	V523
7	V495	V576	V494	71	V25	V15	V16	135	V43	V33	V42	199	V21	V11	V20	263	V525	V515	V524	327	V613	V694	V604
8	V576	V657	V575	72	V15	V5	V6	136	V33	V23	V32	200	V11	V1	V10	264	V515	V505	V514	328	V76	V66	V75
9	V18	V8	V9	73	V5	V268	V269	137	V23	V13	V22	201	V1	V264	V273	265	V505	V586	V595	329	V66	V56	V65
10	V8	V89	V90	74	V268	V258	V259	138	V13	V3	V12	202	V264	V254	V263	266	V586	V667	V676	330	V56	V46	V55
11	V89	V261	V171	75	V258	V248	V249	139	V3	V266	V2	203	V254	V244	V253	267	V78	V68	V69	331	V46	V309	V318
12	V261	V251	V252	76	V248	V511	V512	140	V266	V256	V265	204	V244	V507	V516	268	V68	V58	V59	332	V309	V299	V308
13	V251	V332	V333	77	V511	V501	V502	141	V256	V246	V255	205	V507	V497	V506	269	V58	V48	V49	333	V299	V289	V298
14	V332	V504	V414	78	V501	V491	V492	142	V246	V509	V245	206	V497	V487	V496	270	V48	V38	V39	334	V289	V552	V561
15	V504	V494	V495	79	V491	V572	V573	143	V509	V499	V508	207	V487	V568	V577	271	V38	V28	V29	335	V552	V542	V551
16	V494	V575	V576	80	V572	V653	V654	144	V499	V489	V498	208	V568	V649	V658	272	V28	V291	V19	336	V542	V532	V541
17	V575	V656	V657	81	V45	V35	V44	145	V489	V570	V488	209	V80	V70	V71	273	V291	V281	V282	337	V532	V613	V622
18	V18	V8	V17	82	V35	V25	V34	146	V570	V651	V569	210	V70	V60	V61	274	V281	V271	V272	338	V613	V694	V703
19	V8	V89	V7	83	V25	V15	V24	147	V72	V62	V63	211	V60	V50	V51	275	V271	V534	V262	339	V75	V65	V66
20	V89	V261	V270	84	V15	V5	V14	148	V62	V52	V53	212	V50	V40	V41	276	V534	V524	V525	340	V65	V55	V56
21	V261	V251	V260	85	V5	V268	V4	149	V52	V42	V43	213	V40	V30	V31	277	V524	V514	V515	341	V55	V318	V46
22	V251	V332	V250	86	V268	V258	V267	150	V42	V32	V33	214	V30	V20	V21	278	V514	V595	V505	342	V318	V308	V309
23	V332	V504	V513	87	V258	V248	V257	151	V32	V22	V23	215	V20	V10	V11	279	V595	V676	V586	343	V308	V298	V299
24	V504	V494	V503	88	V248	V511	V247	152	V22	V12	V13	216	V10	V273	V1	280	V78	V68	V77	344	V298	V561	V289
25	V494	V575	V493	89	V511	V501	V510	153	V12	V2	V3	217	V273	V263	V264	281	V68	V58	V67	345	V561	V551	V552
26	V575	V656	V574	90	V501	V491	V500	154	V2	V265	V266	218	V263	V253	V254	282	V58	V48	V57	346	V551	V541	V542
27	V27	V17	V18	91	V491	V572	V490	155	V265	V255	V256	219	V253	V516	V244	283	V48	V38	V47	347	V541	V622	V532
28	V17	V7	V8	92	V572	V653	V571	156	V255	V245	V246	220	V516	V506	V507	284	V38	V28	V37	348	V622	V703	V613
29	V7	V270	V89	93	V54	V44	V45	157	V245	V508	V509	221	V506	V496	V497	285	V28	V291	V300	349	V75	V65	V74
30	V270	V260	V261	94	V44	V34	V35	158	V508	V498	V499	222	V496	V577	V487	286	V291	V281	V290	350	V65	V55	V64
31	V260	V250	V251	95	V34	V24	V25	159	V498	V488	V489	223	V577	V658	V568	287	V281	V271	V280	351	V55	V318	V145
32	V250	V513	V332	96	V24	V14	V15	160	V488	V569	V570	224	V80	V70	V79	288	V271	V534	V543	352	V318	V308	V317
33	V513	V503	V504	97	V14	V4	V5	161	V569	V650	V651	225	V70	V60	V69	289	V534	V524	V533	353	V308	V298	V307
34	V503	V493	V494	98	V4	V267	V268	162	V72	V62	V71	226	V60	V50	V59	290	V524	V514	V523	354	V298	V561	V388
35	V493	V574	V575	99	V267	V257	V258	163	V62	V52	V61	227	V50	V40	V49	291	V514	V595	V604	355	V561	V551	V560
36	V574	V655	V656	100	V257	V247	V248	164	V52	V42	V51	228	V40	V30	V39	292	V595	V676	V685	356	V551	V541	V550

Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência			Setor	Sequência		
37	V27	V17	V26	101	V247	V510	V511	165	V42	V32	V41	229	V30	V20	V29	293	V77	V67	V68	357	V541	V622	V631
38	V17	V7	V16	102	V510	V500	V501	166	V32	V22	V31	230	V20	V10	V19	294	V67	V57	V58	358	V622	V703	V712
39	V7	V270	V6	103	V500	V490	V491	167	V22	V12	V21	231	V10	V273	V282	295	V57	V47	V48	359	V74	V64	V65
40	V270	V260	V269	104	V490	V571	V572	168	V12	V2	V11	232	V273	V263	V272	296	V47	V37	V38	360	V64	V145	V55
41	V260	V250	V259	105	V571	V652	V653	169	V2	V265	V1	233	V263	V253	V262	297	V37	V300	V28	361	V145	V317	V318
42	V250	V513	V249	106	V54	V44	V53	170	V265	V255	V264	234	V253	V516	V525	298	V300	V290	V291	362	V317	V307	V308
43	V513	V503	V512	107	V44	V34	V43	171	V255	V245	V254	235	V516	V506	V515	299	V290	V280	V281	363	V307	V388	V298
44	V503	V493	V502	108	V34	V24	V33	172	V245	V508	V244	236	V506	V496	V505	300	V280	V543	V271	364	V388	V560	V561
45	V493	V574	V492	109	V24	V14	V23	173	V508	V498	V507	237	V496	V577	V586	301	V543	V533	V534	365	V560	V550	V551
46	V574	V655	V573	110	V14	V4	V13	174	V498	V488	V497	238	V577	V658	V667	302	V533	V523	V524	366	V550	V631	V541
47	V36	V26	V27	111	V4	V267	V3	175	V488	V569	V487	239	V79	V69	V70	303	V523	V604	V514	367	V631	V712	V622
48	V26	V16	V17	112	V267	V257	V266	176	V569	V650	V568	240	V69	V59	V60	304	V604	V685	V595	368	V74	V64	V73
49	V16	V6	V7	113	V257	V247	V256	177	V81	V71	V72	241	V59	V49	V50	305	V77	V67	V76	369	V64	V145	V154
50	V6	V269	V270	114	V247	V510	V246	178	V71	V61	V62	242	V49	V39	V40	306	V67	V57	V66	370	V145	V317	V235
51	V269	V259	V260	115	V510	V500	V509	179	V61	V51	V52	243	V39	V29	V30	307	V57	V47	V56	371	V317	V307	V316
52	V259	V249	V250	116	V500	V490	V499	180	V51	V41	V42	244	V29	V19	V20	308	V47	V37	V46	372	V307	V388	V397
53	V249	V512	V513	117	V490	V571	V489	181	V41	V31	V32	245	V19	V282	V10	309	V37	V300	V309	373	V388	V560	V478
54	V512	V502	V503	118	V571	V652	V570	182	V31	V21	V22	246	V282	V272	V273	310	V300	V290	V299	374	V560	V550	V559
55	V502	V492	V493	119	V63	V53	V54	183	V21	V11	V12	247	V272	V262	V263	311	V290	V280	V289	375	V550	V631	V640
56	V492	V573	V574	120	V53	V43	V44	184	V11	V1	V2	248	V262	V525	V253	312	V280	V543	V552	376	V631	V712	V721
57	V573	V654	V655	121	V43	V33	V34	185	V1	V264	V265	249	V525	V515	V516	313	V543	V533	V542	377	V73	V154	V64
58	V36	V26	V35	122	V33	V23	V24	186	V264	V254	V255	250	V515	V505	V506	314	V533	V523	V532	378	V154	V235	V145
59	V26	V16	V25	123	V23	V13	V14	187	V254	V244	V245	251	V505	V586	V496	315	V523	V604	V613	379	V235	V316	V317
60	V16	V6	V15	124	V13	V3	V4	188	V244	V507	V508	252	V586	V667	V577	316	V604	V685	V694	380	V316	V397	V307
61	V6	V269	V5	125	V3	V266	V267	189	V507	V497	V498	253	V79	V69	V78	317	V76	V66	V67	381	V397	V478	V388
62	V269	V259	V268	126	V266	V256	V257	190	V497	V487	V488	254	V69	V59	V68	318	V66	V56	V57	382	V478	V559	V560
63	V259	V249	V258	127	V256	V246	V247	191	V487	V568	V569	255	V59	V49	V58	319	V56	V46	V47	383	V559	V640	V550
64	V249	V512	V248	128	V246	V509	V510	192	V568	V649	V650	256	V49	V39	V48	320	V46	V309	V37	384	V640	V721	V631

Através da Tabela 17 juntamente com a consulta da Tabela 10 pode-se agrupar as tensões de fase de cada vetor. Como exemplo, cita-se o setor 85, que possui os vetores de comutação V5, V268 e V4 (vide Tabela 17). Através da consulta da Tabela 10, sabe-se que V5 tem como níveis de tensão nas fases os seguintes valores:

$$V5 (V' = \text{primeiro vetor de comutação}) \rightarrow V_{an}=N1=4; V_{bn}=N1=4 \text{ e } V_{cn}=N5=0$$

Já os outros dois vetores possuem os seguintes dados:

$$V268 (V'' = \text{segundo vetor de comutação}) \rightarrow V_{an}=N4=1; V_{bn}=N3=2 \text{ e } V_{cn}=N7=-2$$

$$V4 (V''' = \text{terceiro vetor de comutação}) \rightarrow V_{an}=N1=4; V_{bn}=N1=4 \text{ e } V_{cn}=N4=1$$

Sendo assim, aplicando este processo para os trezentos e oitenta e quatro (384) setores, foi possível organizar a Tabela 18, que indica a sequência de comutação aleatória e os níveis de tensão das fases de cada vetor de comutação dos 384 setores. Essa Tabela 18 servirá de consulta no momento em que se deseja saber qual o nível em cada tensão de fase no momento em que V_{ref} se localizar em cada setor, uma vez que cada setor possui três vetores, e cada um deles ativa um nível de tensão por fase. Assim, quando o vetor V_{ref} estiver em um setor, poderá ocorrer a transição de nível nas fases toda vez que um vetor for acionado.

Por exemplo, no setor 1, a tensão V_{an} transitará por dois níveis (níveis 4 e 3) (consultar Tabela 18). Quando o vetor V9 estiver acionado, o nível em V_{an} será 4 (V'), após o vetor V90 for ativado, a tensão V_{an} terá nível 3 (V''), e por fim, terá nível 4 (V''') novamente através do vetor V8. Depois o vetor de referência se deslocará no hexágono e, conseqüentemente, ocupará outro setor, ativando outros três novos vetores. Assim segue sucessivamente.

Tabela 18 - Sequência de comutação aleatória e os níveis de tensão das fases de cada vetor de comutação dos 384 setores

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
1	V9	V90	V8	4	3	4	4	4	4	-4	-4	-3
2	V90	V171	V89	3	2	3	4	4	4	-4	-4	-3
3	V171	V252	V261	2	1	1	4	4	3	-4	-4	-4
4	V252	V333	V251	1	0	1	4	4	4	-4	-4	-3
5	V333	V414	V332	0	-1	0	4	4	4	-4	-4	-3
6	V414	V495	V504	-1	-2	-2	4	4	3	-4	-4	-4
7	V495	V576	V494	-2	-3	-2	4	4	4	-4	-4	-3
8	V576	V657	V575	-3	-4	-3	4	4	4	-4	-4	-3
9	V18	V8	V9	4	4	4	3	4	4	-4	-3	-4
10	V8	V89	V90	4	3	3	4	4	4	-3	-3	-4
11	V89	V261	V171	3	1	2	4	3	4	-3	-4	-4
12	V261	V251	V252	1	1	1	3	4	4	-4	-3	-4
13	V251	V332	V333	1	0	0	4	4	4	-3	-3	-4
14	V332	V504	V414	0	-2	-1	4	3	4	-3	-4	-4
15	V504	V494	V495	-2	-2	-2	3	4	4	-4	-3	-4
16	V494	V575	V576	-2	-3	-3	4	4	4	-3	-3	-4
17	V575	V656	V657	-3	-4	-4	4	4	4	-3	-3	-4
18	V18	V8	V17	4	4	4	3	4	3	-4	-3	-3
19	V8	V89	V7	4	3	4	4	4	4	-3	-3	-2
20	V89	V261	V270	3	1	1	4	3	2	-3	-4	-4
21	V261	V251	V260	1	1	1	3	4	3	-4	-3	-3
22	V251	V332	V250	1	0	1	4	4	4	-3	-3	-2
23	V332	V504	V513	0	-2	-2	4	3	2	-3	-4	-4
24	V504	V494	V503	-2	-2	-2	3	4	3	-4	-3	-3
25	V494	V575	V493	-2	-3	-2	4	4	4	-3	-3	-2
26	V575	V656	V574	-3	-4	-3	4	4	4	-3	-3	-2
27	V27	V17	V18	4	4	4	2	3	3	-4	-3	-4
28	V17	V7	V8	4	4	4	3	4	4	-3	-2	-3
29	V7	V270	V89	4	1	3	4	2	4	-2	-4	-3
30	V270	V260	V261	1	1	1	2	3	3	-4	-3	-4
31	V260	V250	V251	1	1	1	3	4	4	-3	-2	-3
32	V250	V513	V332	1	-2	0	4	2	4	-2	-4	-3
33	V513	V503	V504	-2	-2	-2	2	3	3	-4	-3	-4
34	V503	V493	V494	-2	-2	-2	3	4	4	-3	-2	-3
35	V493	V574	V575	-2	-3	-3	4	4	4	-2	-2	-3
36	V574	V655	V656	-3	-4	-4	4	4	4	-2	-2	-3
193	V81	V71	V80	4	4	4	-4	-3	-4	-4	-3	-3
194	V71	V61	V70	4	4	4	-3	-2	-3	-3	-2	-2
195	V61	V51	V60	4	4	4	-2	-1	-2	-2	-1	-1
196	V51	V41	V50	4	4	4	-1	0	-1	-1	0	0
197	V41	V31	V40	4	4	4	0	1	0	0	1	1
198	V31	V21	V30	4	4	4	1	2	1	1	2	2
199	V21	V11	V20	4	4	4	2	3	2	2	3	3
200	V11	V1	V10	4	4	4	3	4	3	3	4	4
201	V1	V264	V273	4	1	1	4	2	1	4	2	2
202	V264	V254	V263	1	1	1	2	3	2	2	3	3
203	V254	V244	V253	1	1	1	3	4	3	3	4	4
204	V244	V507	V516	1	-2	-2	4	2	1	4	2	2
205	V507	V497	V506	-2	-2	-2	2	3	2	2	3	3
206	V497	V487	V496	-2	-2	-2	3	4	3	3	4	4
207	V487	V568	V577	-2	-3	-3	4	4	3	4	4	4
208	V568	V649	V658	-3	-4	-4	4	4	3	4	4	4
209	V80	V70	V71	4	4	4	-4	-3	-3	-3	-2	-3
210	V70	V60	V61	4	4	4	-3	-2	-2	-2	-1	-2
211	V60	V50	V51	4	4	4	-2	-1	-1	-1	0	-1
212	V50	V40	V41	4	4	4	-1	0	0	0	1	0
213	V40	V30	V31	4	4	4	0	1	1	1	2	1
214	V30	V20	V21	4	4	4	1	2	2	2	3	2
215	V20	V10	V11	4	4	4	2	3	3	3	4	3
216	V10	V273	V1	4	1	4	3	1	4	4	2	4
217	V273	V263	V264	1	1	1	1	2	2	2	3	2
218	V263	V253	V254	1	1	1	2	3	3	3	4	3
219	V253	V516	V244	1	-2	1	3	1	4	4	2	4
220	V516	V506	V507	-2	-2	-2	1	2	2	2	3	2
221	V506	V496	V497	-2	-2	-2	2	3	3	3	4	3
222	V496	V577	V487	-2	-3	-2	3	3	4	4	4	4
223	V577	V658	V568	-3	-4	-3	3	3	4	4	4	4
224	V80	V70	V79	4	4	4	-4	-3	-4	-3	-2	-2
225	V70	V60	V69	4	4	4	-3	-2	-3	-2	-1	-1
226	V60	V50	V59	4	4	4	-2	-1	-2	-1	0	0
227	V50	V40	V49	4	4	4	-1	0	-1	0	1	1
228	V40	V30	V39	4	4	4	0	1	0	1	2	2

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
37	V27	V17	V26	4	4	4	2	3	2	-4	-3	-3
38	V17	V7	V16	4	4	4	3	4	3	-3	-2	-2
39	V7	V270	V6	4	1	4	4	2	4	-2	-4	-1
40	V270	V260	V269	1	1	1	2	3	2	-4	-3	-3
41	V260	V250	V259	1	1	1	3	4	3	-3	-2	-2
42	V250	V513	V249	1	-2	1	4	2	4	-2	-4	-1
43	V513	V503	V512	-2	-2	-2	2	3	2	-4	-3	-3
44	V503	V493	V502	-2	-2	-2	3	4	3	-3	-2	-2
45	V493	V574	V492	-2	-3	-2	4	4	4	-2	-2	-1
46	V574	V655	V573	-3	-4	-3	4	4	4	-2	-2	-1
47	V36	V26	V27	4	4	4	1	2	2	-4	-3	-4
48	V26	V16	V17	4	4	4	2	3	3	-3	-2	-3
49	V16	V6	V7	4	4	4	3	4	4	-2	-1	-2
50	V6	V269	V270	4	1	1	4	2	2	-1	-3	-4
51	V269	V259	V260	1	1	1	2	3	3	-3	-2	-3
52	V259	V249	V250	1	1	1	3	4	4	-2	-1	-2
53	V249	V512	V513	1	-2	-2	4	2	2	-1	-3	-4
54	V512	V502	V503	-2	-2	-2	2	3	3	-3	-2	-3
55	V502	V492	V493	-2	-2	-2	3	4	4	-2	-1	-2
56	V492	V573	V574	-2	-3	-3	4	4	4	-1	-1	-2
57	V573	V654	V655	-3	-4	-4	4	4	4	-1	-1	-2
58	V36	V26	V35	4	4	4	1	2	1	-4	-3	-3
59	V26	V16	V25	4	4	4	2	3	2	-3	-2	-2
60	V16	V6	V15	4	4	4	3	4	3	-2	-1	-1
61	V6	V269	V5	4	1	4	4	2	4	-1	-3	0
62	V269	V259	V268	1	1	1	2	3	2	-3	-2	-2
63	V259	V249	V258	1	1	1	3	4	3	-2	-1	-1
64	V249	V512	V248	1	-2	1	4	2	4	-1	-3	0
65	V512	V502	V511	-2	-2	-2	2	3	2	-3	-2	-2
66	V502	V492	V501	-2	-2	-2	3	4	3	-2	-1	-1
67	V492	V573	V491	-2	-3	-2	4	4	4	-1	-1	0
68	V573	V654	V572	-3	-4	-3	4	4	4	-1	-1	0
69	V45	V35	V36	4	4	4	0	1	1	-4	-3	-4
70	V35	V25	V26	4	4	4	1	2	2	-3	-2	-3
71	V25	V15	V16	4	4	4	2	3	3	-2	-1	-2
72	V15	V5	V6	4	4	4	3	4	4	-1	0	-1
73	V5	V268	V269	4	1	1	4	2	2	0	-2	-3
74	V268	V258	V259	1	1	1	2	3	3	-2	-1	-2
75	V258	V248	V249	1	1	1	3	4	4	-1	0	-1

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
229	V30	V20	V29	4	4	4	1	2	1	2	3	3
230	V20	V10	V19	4	4	4	2	3	2	3	4	4
231	V10	V273	V282	4	1	1	3	1	0	4	2	2
232	V273	V263	V272	1	1	1	1	2	1	2	3	3
233	V263	V253	V262	1	1	1	2	3	2	3	4	4
234	V253	V516	V525	1	-2	-2	3	1	0	4	2	2
235	V516	V506	V515	-2	-2	-2	1	2	1	2	3	3
236	V506	V496	V505	-2	-2	-2	2	3	2	3	4	4
237	V496	V577	V586	-2	-3	-2	3	3	2	4	4	4
238	V577	V658	V667	-3	-4	-4	3	3	2	4	4	4
239	V79	V69	V70	4	4	4	-4	-3	-3	-2	-1	-2
240	V69	V59	V60	4	4	4	-3	-2	-2	-1	0	-1
241	V59	V49	V50	4	4	4	-2	-1	-1	0	1	0
242	V49	V39	V40	4	4	4	-1	0	0	1	2	1
243	V39	V29	V30	4	4	4	0	1	1	2	3	2
244	V29	V19	V20	4	4	4	1	2	2	3	4	3
245	V19	V282	V10	4	1	4	2	0	3	4	2	4
246	V282	V272	V273	1	1	1	0	1	1	2	3	2
247	V272	V262	V263	1	1	1	1	2	2	3	4	3
248	V262	V525	V253	1	-2	1	2	0	3	4	2	4
249	V525	V515	V516	-2	-2	-2	0	1	1	2	3	2
250	V515	V505	V506	-2	-2	-2	1	2	2	3	4	3
251	V505	V586	V496	-2	-3	-2	2	2	3	4	4	4
252	V586	V667	V577	-3	-4	-3	2	2	3	4	4	4
253	V79	V69	V78	4	4	4	-4	-3	-4	-2	-1	-1
254	V69	V59	V68	4	4	4	-3	-2	-3	-1	0	0
255	V59	V49	V58	4	4	4	-2	-1	-2	0	1	1
256	V49	V39	V48	4	4	4	-1	0	-1	1	2	2
257	V39	V29	V38	4	4	4	0	1	0	2	3	3
258	V29	V19	V28	4	4	4	1	2	1	3	4	4
259	V19	V282	V291	4	1	1	2	0	-1	4	2	2
260	V282	V272	V281	1	1	1	0	1	0	2	3	3
261	V272	V262	V271	1	1	1	1	2	1	3	4	4
262	V262	V525	V534	1	-2	-2	2	0	-1	4	2	2
263	V525	V515	V524	-2	-2	-2	0	1	0	2	3	3
264	V515	V505	V514	-2	-2	-2	1	2	1	3	4	4
265	V505	V586	V595	-2	-3	-3	2	2	1	4	4	4
266	V586	V667	V676	-3	-4	-4	2	2	1	4	4	4
267	V78	V68	V69	4	4	4	-4	-3	-3	-1	0	-1

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
76	V248	V511	V512	1	-2	-2	4	2	2	0	-2	-3
77	V511	V501	V502	-2	-2	-2	2	3	3	-2	-1	-2
78	V501	V491	V492	-2	-2	-2	3	4	4	-1	0	-1
79	V491	V572	V573	-2	-3	-3	4	4	4	0	0	-1
80	V572	V653	V654	-3	-4	-4	4	4	4	0	0	-1
81	V45	V35	V44	4	4	4	0	1	0	-4	-3	-3
82	V35	V25	V34	4	4	4	1	2	1	-3	-2	-2
83	V25	V15	V24	4	4	4	2	3	2	-2	-1	-1
84	V15	V5	V14	4	4	4	3	4	3	-1	0	0
85	V5	V268	V4	4	1	4	4	2	4	0	-2	1
86	V268	V258	V267	1	1	1	2	3	2	-2	-1	-1
87	V258	V248	V257	1	1	1	3	4	3	-1	0	0
88	V248	V511	V247	1	-2	1	4	2	4	0	-2	1
89	V511	V501	V510	-2	-2	-2	2	3	2	-2	-1	-1
90	V501	V491	V500	-2	-2	-2	3	4	3	-1	0	0
91	V491	V572	V490	-2	-3	-2	4	4	4	0	0	1
92	V572	V653	V571	-3	-4	-3	4	4	4	0	0	1
93	V54	V44	V45	4	4	4	-1	0	0	-4	-3	-4
94	V44	V34	V35	4	4	4	0	1	1	-3	-2	-3
95	V34	V24	V25	4	4	4	1	2	2	-2	-1	-2
96	V24	V14	V15	4	4	4	2	3	3	-1	0	-1
97	V14	V4	V5	4	4	4	3	4	4	0	1	0
98	V4	V267	V268	4	1	1	4	2	2	1	-1	-2
99	V267	V257	V258	1	1	1	2	3	3	-1	0	-1
100	V257	V247	V248	1	1	1	3	4	4	0	1	0
101	V247	V510	V511	1	-2	-2	4	2	2	1	-1	-2
102	V510	V500	V501	-2	-2	-2	2	3	3	-1	0	-1
103	V500	V490	V491	-2	-2	-2	3	4	4	0	1	0
104	V490	V571	V572	-2	-3	-3	4	4	4	1	1	0
105	V571	V652	V653	-3	-4	-4	4	4	4	1	1	0
106	V54	V44	V53	4	4	4	-1	0	-1	-4	-3	-3
107	V44	V34	V43	4	4	4	0	1	0	-3	-2	-2
108	V34	V24	V33	4	4	4	1	2	1	-2	-1	-1
109	V24	V14	V23	4	4	4	2	3	2	-1	0	0
110	V14	V4	V13	4	4	4	3	4	3	0	1	1
111	V4	V267	V3	4	1	4	4	2	4	1	-1	2
112	V267	V257	V266	1	1	1	2	3	2	-1	0	0
113	V257	V247	V256	1	1	1	3	4	3	0	1	1
114	V247	V510	V246	1	-2	1	4	2	4	1	-1	2

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
268	V68	V58	V59	4	4	4	-3	-2	-2	0	1	0
269	V58	V48	V49	4	4	4	-2	-1	-1	1	2	1
270	V48	V38	V39	4	4	4	-1	0	0	2	3	2
271	V38	V28	V29	4	4	4	0	1	1	3	4	3
272	V28	V291	V19	4	1	4	1	-1	2	4	2	4
273	V291	V281	V282	1	1	1	-1	0	0	2	3	2
274	V281	V271	V272	1	1	1	0	1	1	3	4	3
275	V271	V534	V262	1	-2	1	1	-1	2	4	2	4
276	V534	V524	V525	-2	-2	-2	-1	0	0	2	3	2
277	V524	V514	V515	-2	-2	-2	0	1	1	3	4	3
278	V514	V595	V505	-2	-3	-2	1	1	2	4	4	4
279	V595	V676	V586	-3	-4	-3	1	1	2	4	4	4
280	V78	V68	V77	4	4	4	-4	-3	-4	-1	0	0
281	V68	V58	V67	4	4	4	-3	-2	-3	0	1	1
282	V58	V48	V57	4	4	4	-2	-1	-2	1	2	2
283	V48	V38	V47	4	4	4	-1	0	-1	2	3	3
284	V38	V28	V37	4	4	4	0	1	0	3	4	4
285	V28	V291	V300	4	1	1	1	-1	-2	4	2	2
286	V291	V281	V290	1	1	1	-1	0	-1	2	3	3
287	V281	V271	V280	1	1	1	0	1	0	3	4	4
288	V271	V534	V543	1	-2	-2	1	-1	-2	4	2	2
289	V534	V524	V533	-2	-2	-2	-1	0	-1	2	3	3
290	V524	V514	V523	-2	-2	-2	0	1	0	3	4	4
291	V514	V595	V604	-2	-3	-3	1	1	0	4	4	4
292	V595	V676	V685	-3	-4	-4	1	1	0	4	4	4
293	V77	V67	V68	4	4	4	-4	-3	-3	0	1	0
294	V67	V57	V58	4	4	4	-3	-2	-2	1	2	1
295	V57	V47	V48	4	4	4	-2	-1	-1	2	3	2
296	V47	V37	V38	4	4	4	-1	0	0	3	4	3
297	V37	V300	V28	4	1	4	0	-2	1	4	2	4
298	V300	V290	V291	1	1	1	-2	-1	-1	2	3	2
299	V290	V280	V281	1	1	1	-1	0	0	3	4	3
300	V280	V543	V271	1	-2	1	0	-2	1	4	2	4
301	V543	V533	V534	-2	-2	-2	-2	-1	-1	2	3	2
302	V533	V523	V524	-2	-2	-2	-1	0	0	3	4	3
303	V523	V604	V514	-2	-3	-2	0	0	1	4	4	4
304	V604	V685	V595	-3	-4	-3	0	0	1	4	4	4
305	V77	V67	V76	4	4	4	-4	-3	-4	0	1	1
306	V67	V57	V66	4	4	4	-3	-2	-3	1	2	2

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
115	V510	V500	V509	-2	-2	-2	2	3	2	-1	0	0
116	V500	V490	V499	-2	-2	-2	3	4	3	0	1	1
117	V490	V571	V489	-2	-3	-2	4	4	4	1	1	2
118	V571	V652	V570	-3	-4	-3	4	4	4	1	1	2
119	V63	V53	V54	4	4	4	-2	-1	-1	-4	-3	-4
120	V53	V43	V44	4	4	4	-1	0	0	-3	-2	-3
121	V43	V33	V34	4	4	4	0	1	1	-2	-1	-2
122	V33	V23	V24	4	4	4	1	2	2	-1	0	-1
123	V23	V13	V14	4	4	4	2	3	3	0	1	0
124	V13	V3	V4	4	4	4	3	4	4	1	2	1
125	V3	V266	V267	4	1	1	4	2	2	2	0	-1
126	V266	V256	V257	1	1	1	2	3	3	0	1	0
127	V256	V246	V247	1	1	1	3	4	4	1	2	1
128	V246	V509	V510	1	-2	-2	4	2	2	2	0	-1
129	V509	V499	V500	-2	-2	-2	2	3	3	0	1	0
130	V499	V489	V490	-2	-2	-2	3	4	4	1	2	1
131	V489	V570	V571	-2	-3	-3	4	4	4	2	2	1
132	V570	V651	V652	-3	-4	-4	4	4	4	2	2	1
133	V63	V53	V62	4	4	4	-2	-1	-2	-4	-3	-3
134	V53	V43	V52	4	4	4	-1	0	-1	-3	-2	-2
135	V43	V33	V42	4	4	4	0	1	0	-2	-1	-1
136	V33	V23	V32	4	4	4	1	2	1	-1	0	0
137	V23	V13	V22	4	4	4	2	3	2	0	1	1
138	V13	V3	V12	4	4	4	3	4	3	1	2	2
139	V3	V266	V2	4	1	4	4	2	4	2	0	3
140	V266	V256	V265	1	1	1	2	3	2	0	1	1
141	V256	V246	V255	1	1	1	3	4	3	1	2	2
142	V246	V509	V245	1	-2	1	4	2	4	2	0	3
143	V509	V499	V508	-2	-2	-2	2	3	2	0	1	1
144	V499	V489	V498	-2	-2	-2	3	4	3	1	2	2
145	V489	V570	V488	-2	-3	-2	4	4	4	2	2	3
146	V570	V651	V569	-3	-4	-3	4	4	4	2	2	3
147	V72	V62	V63	4	4	4	-3	-2	-2	-4	-3	-4
148	V62	V52	V53	4	4	4	-2	-1	-1	-3	-2	-3
149	V52	V42	V43	4	4	4	-1	0	0	-2	-1	-2
150	V42	V32	V33	4	4	4	0	1	1	-1	0	-1
151	V32	V22	V23	4	4	4	1	2	2	0	1	0
152	V22	V12	V13	4	4	4	2	3	3	1	2	1
153	V12	V2	V3	4	4	4	3	4	4	2	3	2

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
307	V57	V47	V56	4	4	4	-2	-1	-2	2	3	3
308	V47	V37	V46	4	4	4	-1	0	-1	3	4	4
309	V37	V300	V309	4	1	1	0	-2	-3	4	2	2
310	V300	V290	V299	1	1	1	-2	-1	-2	2	3	3
311	V290	V280	V289	1	1	1	-1	0	-1	3	4	4
312	V280	V543	V552	1	-2	-2	0	-2	-3	4	2	2
313	V543	V533	V542	-2	-2	-2	-2	-1	-2	2	3	3
314	V533	V523	V532	-2	-2	-2	-1	0	-1	3	4	4
315	V523	V604	V613	-2	-3	-3	0	0	-1	4	4	4
316	V604	V685	V694	-3	-4	-4	0	0	-1	4	4	4
317	V76	V66	V67	4	4	4	-4	-3	-3	1	2	1
318	V66	V56	V57	4	4	4	-3	-2	-2	2	3	2
319	V56	V46	V47	4	4	4	-2	-1	-1	3	4	3
320	V46	V309	V37	4	1	4	-1	-3	0	4	2	4
321	V309	V299	V300	1	1	1	-3	-2	-2	2	3	2
322	V299	V289	V290	1	1	1	-2	-1	-1	3	4	3
323	V289	V552	V280	1	-2	1	-1	-3	0	4	2	4
324	V552	V542	V543	-2	-2	-2	-3	-2	-2	2	3	2
325	V542	V532	V533	-2	-2	-2	-2	-1	-1	3	4	3
326	V532	V613	V523	-2	-3	-2	-1	-1	0	4	4	4
327	V613	V694	V604	-3	-4	-3	-1	-1	0	4	4	4
328	V76	V66	V75	4	4	4	-4	-3	-4	1	2	2
329	V66	V56	V65	4	4	4	-3	-2	-3	2	3	3
330	V56	V46	V55	4	4	4	-2	-1	-2	3	4	4
331	V46	V309	V318	4	1	1	-1	-3	-4	4	2	2
332	V309	V299	V308	1	1	1	-3	-2	-3	2	3	3
333	V299	V289	V298	1	1	1	-2	-1	-2	3	4	4
334	V289	V552	V561	1	-2	-2	-1	-3	-4	4	2	2
335	V552	V542	V551	-2	-2	-2	-3	-2	-3	2	3	3
336	V542	V532	V541	-2	-2	-2	-2	-1	-2	3	4	4
337	V532	V613	V622	-2	-3	-3	-1	-1	-2	4	4	4
338	V613	V694	V703	-3	-4	-4	-1	-1	-2	4	4	4
339	V75	V65	V66	4	4	4	-4	-3	-3	2	3	2
340	V65	V55	V56	4	4	4	-3	-2	-2	3	4	3
341	V55	V318	V46	4	1	4	-2	-4	-1	4	2	4
342	V318	V308	V309	1	1	1	-4	-3	-3	2	3	2
343	V308	V298	V299	1	1	1	-3	-2	-2	3	4	3
344	V298	V561	V289	1	-2	1	-2	-4	-1	4	2	4
345	V561	V551	V552	-2	-2	-2	-4	-3	-3	2	3	2

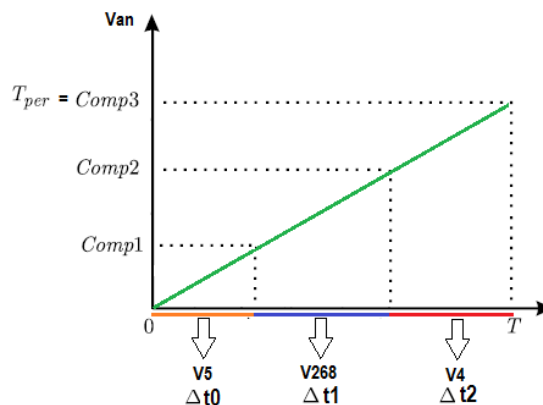
Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
154	V2	V265	V266	4	1	1	4	2	2	3	1	0
155	V265	V255	V256	1	1	1	2	3	3	1	2	1
156	V255	V245	V246	1	1	1	3	4	4	2	3	2
157	V245	V508	V509	1	-2	-2	4	2	2	3	1	0
158	V508	V498	V499	-2	-2	-2	2	3	3	1	2	1
159	V498	V488	V489	-2	-2	-2	3	4	4	2	3	2
160	V488	V569	V570	-2	-3	-3	4	4	4	3	3	2
161	V569	V650	V651	-3	-4	-4	4	4	4	3	3	2
162	V72	V62	V71	4	4	4	-3	-2	-3	-4	-3	-3
163	V62	V52	V61	4	4	4	-2	-1	-2	-3	-2	-2
164	V52	V42	V51	4	4	4	-1	0	-1	-2	-1	-1
165	V42	V32	V41	4	4	4	0	1	0	-1	0	0
166	V32	V22	V31	4	4	4	1	2	1	0	1	1
167	V22	V12	V21	4	4	4	2	3	2	1	2	2
168	V12	V2	V11	4	4	4	3	4	3	2	3	3
169	V2	V265	V1	4	1	4	4	2	4	3	1	4
170	V265	V255	V264	1	1	1	2	3	2	1	2	2
171	V255	V245	V254	1	1	1	3	4	3	2	3	3
172	V245	V508	V244	1	-2	1	4	2	4	3	1	4
173	V508	V498	V507	-2	-2	-2	2	3	2	1	2	2
174	V498	V488	V497	-2	-2	-2	3	4	3	2	3	3
175	V488	V569	V487	-2	-3	-2	4	4	4	3	3	4
176	V569	V650	V568	-3	-4	-3	4	4	4	3	3	4
177	V81	V71	V72	4	4	4	-4	-3	-3	-4	-3	-4
178	V71	V61	V62	4	4	4	-3	-2	-2	-3	-2	-3
179	V61	V51	V52	4	4	4	-2	-1	-1	-2	-1	-2
180	V51	V41	V42	4	4	4	-1	0	0	-1	0	-1
181	V41	V31	V32	4	4	4	0	1	1	0	1	0
182	V31	V21	V22	4	4	4	1	2	2	1	2	1
183	V21	V11	V12	4	4	4	2	3	3	2	3	2
184	V11	V1	V2	4	4	4	3	4	4	3	4	3
185	V1	V264	V265	4	1	1	4	2	2	4	2	1
186	V264	V254	V255	1	1	1	2	3	3	2	3	2
187	V254	V244	V245	1	1	1	3	4	4	3	4	3
188	V244	V507	V508	1	-2	-2	4	2	2	4	2	1
189	V507	V497	V498	-2	-2	-2	2	3	3	2	3	2
190	V497	V487	V488	-2	-2	-2	3	4	4	3	4	3
191	V487	V568	V569	-2	-3	-3	4	4	4	4	4	3
192	V568	V649	V650	-3	-4	-4	4	4	4	4	4	3

Setor	Sequência dos vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
346	V551	V541	V542	-2	-2	-2	-3	-2	-2	3	4	3
347	V541	V622	V532	-2	-3	-2	-2	-2	-1	4	4	4
348	V622	V703	V613	-3	-4	-3	-2	-2	-1	4	4	4
349	V75	V65	V74	4	4	4	-4	-3	-4	2	3	3
350	V65	V55	V64	4	4	4	-3	-2	-3	3	4	4
351	V55	V318	V145	4	1	3	-2	-4	-3	4	2	4
352	V318	V308	V317	1	1	1	-4	-3	-4	2	3	3
353	V308	V298	V307	1	1	1	-3	-2	-3	3	4	4
354	V298	V561	V388	1	-2	0	-2	-4	-3	4	2	4
355	V561	V551	V560	-2	-2	-2	-4	-3	-4	2	3	3
356	V551	V541	V550	-2	-2	-2	-3	-2	-3	3	4	4
357	V541	V622	V631	-2	-3	-3	-2	-2	-3	4	4	4
358	V622	V703	V712	-3	-4	-4	-2	-2	-3	4	4	4
359	V74	V64	V65	4	4	4	-4	-3	-3	3	4	3
360	V64	V145	V55	4	3	4	-3	-3	-2	4	4	4
361	V145	V317	V318	3	1	1	-3	-4	-4	4	3	2
362	V317	V307	V308	1	1	1	-4	-3	-3	3	4	3
363	V307	V388	V298	1	0	1	-3	-3	-2	4	4	4
364	V388	V560	V561	0	-2	-2	-3	-4	-4	4	3	2
365	V560	V550	V551	-2	-2	-2	-4	-3	-3	3	4	3
366	V550	V631	V541	-2	-3	-2	-3	-3	-2	4	4	4
367	V631	V712	V622	-3	-4	-3	-3	-3	-2	4	4	4
368	V74	V64	V73	4	4	4	-4	-3	-4	3	4	4
369	V64	V145	V154	4	3	3	-3	-3	-4	4	4	4
370	V145	V317	V235	3	1	2	-3	-4	-4	4	3	4
371	V317	V307	V316	1	1	1	-4	-3	-4	3	4	4
372	V307	V388	V397	1	0	0	-3	-3	-4	4	4	4
373	V388	V560	V478	0	-2	-1	-3	-4	-4	4	3	4
374	V560	V550	V559	-2	-2	-2	-4	-3	-4	3	4	4
375	V550	V631	V640	-2	-3	-3	-3	-3	-4	4	4	4
376	V631	V712	V721	-3	-4	-4	-3	-3	-4	4	4	4
377	V73	V154	V64	4	3	4	-4	-4	-3	4	4	4
378	V154	V235	V145	3	2	3	-4	-4	-3	4	4	4
379	V235	V316	V317	2	1	1	-4	-4	-4	4	4	3
380	V316	V397	V307	1	0	1	-4	-4	-3	4	4	4
381	V397	V478	V388	0	-1	0	-4	-4	-3	4	4	4
382	V478	V559	V560	-1	-2	-2	-4	-4	-4	4	4	3
383	V559	V640	V550	-2	-3	-2	-4	-4	-3	4	4	4
384	V640	V721	V631	-3	-4	-3	-4	-4	-3	4	4	4

Então, o processo da estratégia *SV*, até o momento, calculou os tempos em que cada vetor do setor ficará acionado (vetores que formam o triângulo do setor), sendo que cada vetor possui valores de níveis de tensão para cada fase. A seguir, o intuito é gerar os sinais de saída das tensões de fase (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}), e para tanto, deve-se associar os níveis das tensões dos vetores aos tempos de ativação dos mesmos. Para este processo, deve-se analisar, para cada fase, as seguintes características: a sequência de comutação dos vetores, o tempo de ativação de cada vetor e o nível que cada um deles gera naquela fase.

Para realizar estas associações dos tempos e dos níveis, foi utilizado um método similar ao aplicado em Gabe (2008), o qual foi necessário comparar o valor dos níveis das tensões de cada fase com uma rampa ascendente, conforme Figura 47. Desta maneira, pode-se obter as tensões dos vetores associados aos seus respectivos tempos (Δt_0 , Δt_1 e Δt_2), adquiridos pela equação (10) ou (11), para cada fase.

Figura 47 - Rampa utilizada para comparar os sinais de tensão de fase do inversor de nove níveis híbrido assimétrico



No método, em cada setor, para cada fase, é gerada uma rampa com o período T versus um número de pontos de amostragem por período ($T_{per} = 512$). A cada setor que o vetor V_{ref} passa, este tempo T é computado no setor. O período T é dividido em três para que cada trecho seja destinado ao chaveamento de um vetor. Esta divisão é realizada através dos comparadores $Comp_1$, $Comp_2$ e $Comp_3$, que são calculados através dos tempos de comutação dos vetores do setor, conforme as equações (12), (13) e (14).

Comparador 1 ($Comp_1$) (GABE, 2008):

$$\frac{Comp_1}{\Delta t_0} = \frac{T_{per}}{T}$$

$$Comp_1 = \frac{T_{per}}{T} \cdot \Delta t_0 \quad (12)$$

Comparador 2 (Comp₂) (GABE, 2008):

$$\frac{\text{Comp}_2}{\Delta t_1} = \frac{T_{\text{per}}}{T} + \text{Comp}_1$$

$$\text{Comp}_2 = \frac{T_{\text{per}}}{T} \cdot \Delta t_1 + \text{Comp}_1 \quad (13)$$

Comparador 3 (Comp₃) (GABE, 2008):

$$\frac{\text{Comp}_3}{\Delta t_2} = \frac{T_{\text{per}}}{T} + \text{Comp}_2$$

$$\text{Comp}_3 = \frac{T_{\text{per}}}{T} \cdot \Delta t_2 + \text{Comp}_2 \quad (14)$$

Para exemplificar o processo de comparação com a rampa, tem-se como objetivo a geração da tensão de fase V_{an} do setor 85, citado anteriormente, que possui os vetores V5, V268 e V4. O programa, ao localizar o vetor V_{ref} no setor 85, identifica os três vetores e calcula os tempos Δt_0 , Δt_1 e Δt_2 ($\Delta t_0 = 0,000047$, $\Delta t_1 = 0,000059$ e $\Delta t_2 = 0,000092$) por meio da equação (10) ou (11), sendo o somatório dos tempos igual ao período T ($= 0,000198$), assim como também calcula os valores dos comparadores Comp_1 , Comp_2 e Comp_3 ($\text{Comp}_1 = 121,60$; $\text{Comp}_2 = 274,21$ e $\text{Comp}_3 = 512$), conforme as equações (12), (13) e (14). Após é gerada uma rampa para realizar a comparação com Comp_1 , Comp_2 e Comp_3 e determinar o nível de tensão para aquela comparação. Sendo assim, analisando a Figura 47, enquanto o valor da rampa (em verde) não for maior que o valor de Comp_1 , o nível de tensão de V5 em V_{an} será ativada (lembrando que o nível de V5 em $V_{\text{an}} = V' = N1 = 4$, conforme Tabela 18). Este vetor será comutado em todo o tempo Δt_0 . Quando a rampa for maior que Comp_1 e menor que Comp_2 , o valor do nível de tensão V_{an} será igual a 1 durante o período Δt_1 , pois o vetor V268 será ativado e seu nível é $V'' = N4 = 1$ (vide Tabela 18). E por fim, quando a rampa for maior que Comp_2 e menor que Comp_3 , o nível do último vetor (V4) será acionado ($V''' = N1 = 4$, conforme Tabela 18). Desta forma, quando o vetor V_{ref} estiver no setor 85, os níveis de tensões de V_{an} variam de 4, 1 e 4.

Para ilustrar melhor esse procedimento, foi realizada uma simulação em software de simulação matemática em que o vetor V_{ref} se encontra no setor 85. Na Figura 48 está representada a região aonde o vetor V_{ref} se localiza no plano (setor 85). Este processo foi

adquirido através das coordenadas inseridas no programa de busca, que foram: ($V_\alpha = 1,2$) e ($V_\beta = 2,5$). O vetor V_{ref} está identificado por “*”.

Na Figura 49 estão as três fases e os respectivos níveis gerados por cada vetor em seu respectivo tempo de comutação, conforme os valores já mencionados:

$$V5 (V') \rightarrow V_{an} = N1 = 4; \quad V_{bn} = N1 = 4 \quad e \quad V_{cn} = N5 = 0$$

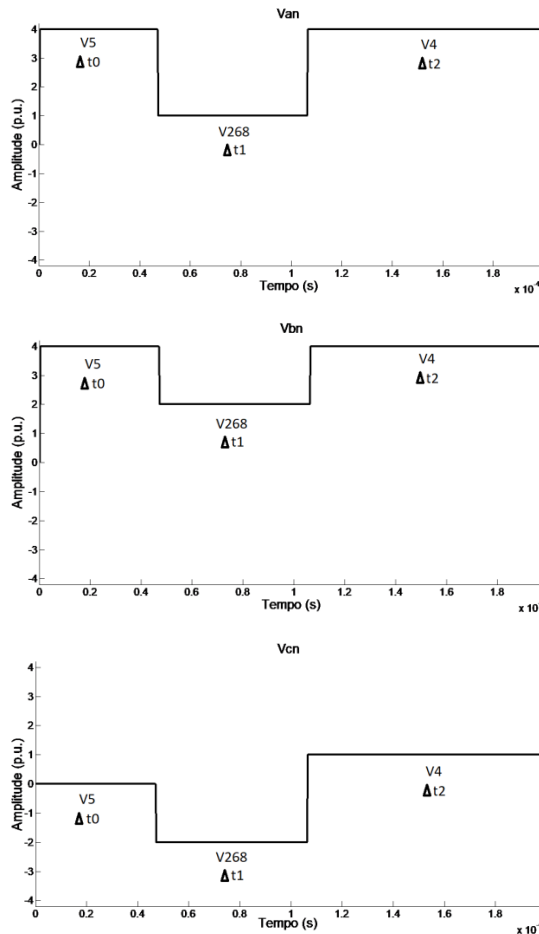
$$V268 (V'') \rightarrow V_{an} = N4 = 1; \quad V_{bn} = N3 = 2 \quad e \quad V_{cn} = N7 = -2$$

$$V4 (V''') \rightarrow V_{an} = N1 = 4; \quad V_{bn} = N1 = 4 \quad e \quad V_{cn} = N4 = 1$$

Figura 48 - Setor 85 localizado no hexágono



Figura 49 - Níveis de tensão de fase no setor 85



A frequência de amostragem utilizada de atualização das referências de tensões (nova localização dos setores) foi de 5040 Hz. Sendo assim, a cada 0,000198 segundos (1/5040 Hz) há uma nova busca do setor. Como há três trocas de vetores por período, logo, a máxima frequência de comutação será o triplo (15120 Hz). Portanto, caso ocorra a implementação física do inversor, os dispositivos semicondutores devem ser especificados para suportarem frequências de chaveamento iguais a 15120 Hz. Um do problema que pode ocorrer em relação à definição da sequência de chaveamento, juntamente com o procedimento demonstrado referente a Figura 47, consiste em ocorrer um super dimensionando das chaves semicondutoras utilizadas no inversor caso este seja implementado fisicamente, aumentando o custo do inversor, pois neste processo não há como saber a frequência individual de cada chave, apenas a sua frequência máxima.

O processo demonstrado no setor 85 é realizado cada vez que o vetor V_{ref} troca de setor. Logo, para visualizar a real dinâmica da modulação SV , no capítulo seguinte foram realizadas diversas simulações em que o vetor V_{ref} percorre todo o hexágono, ativando os vetores selecionados na sequência de comutação.

3.7. SIMULAÇÕES

Este subcapítulo está dividido em duas partes, sendo a primeira (subitem 3.7.1.) a relação dos dados utilizados nas simulações para um índice de modulação igual a 1. No subitem posterior (3.7.2.) estão apresentadas todas as simulações realizadas para a verificação do desenvolvimento da modulação SV , assim como seus resultados.

3.7.1. Dados utilizados nas simulações com “ m_a ” = 1

Para esta dissertação foram realizadas diversas simulações, sendo assim, para um melhor esclarecimento sobre os valores utilizados no programa, os dados apresentados nesta subseção foram calculados para os valores máximos de tensão que o inversor pode fornecer à carga, ou seja, com o valor do índice de modulação igual a 1.

A modulação *space vector* é aplicada a sistemas de média tensão. Para estes sistemas, as tensões trifásicas mais usadas para redes de média tensão são: 2300, 3300, 4000, 4160, 6600 e 13800 V (WEG, 2015), logo, o valor rms da tensão de linha (V_{Lrms}) escolhido foi de 4160 V, uma vez que este valor está presente na tabela informativa dos fabricantes de inversores, conforme (BAHMAN; BLAABJERG, 2013). Sendo assim, a partir desse valor

foram calculados o valor rms da tensão de fase (V_{Frms}), registrado em (15), e o valor de pico da tensão de linha (V_{Lpico}) em (16).

$$V_{Lrms} = \sqrt{3} \cdot V_{Frms}$$

$$V_{Frms} = \frac{V_{Lrms}}{\sqrt{3}} = \frac{4160}{\sqrt{3}} = 2401,78 \text{ V} \cong 2400 \text{ V} \quad (15)$$

$$V_{Lpico} = \sqrt{2} \cdot V_{Lrms}$$

$$V_{Lpico} = \sqrt{2} \cdot 4160 = 5883,13 \text{ V} \quad (16)$$

Adquirido o valor de fase (V_{Frms}) (15) e conhecendo o valor do índice de modulação (“ m_a ” = 1), pode-se calcular o valor de pico da tensão de fase (V_{Fpico}), conforme (17).

$$V_{Fpico} = m_a \cdot \sqrt{2} \cdot V_{Frms}$$

$$V_{Fpico} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2400 = 3394,11 \cong 3400 \text{ V} \quad (17)$$

Através da tensão de pico de fase (V_{Fpico}) pode-se calcular a tensão V_{cc} utilizada no programa da simulação. Uma vez que o inversor proposto possui três células por fase (vide Figura 25), sendo uma delas o dobro de alimentação das demais e, sabendo que a tensão de pico de fase (V_{Fpico}) é de aproximadamente 3400 V (17), então tem-se que para cada nível da tensão de fase, a tensão V_{cc} é igual a 850 V ($3400\text{V}/4 = 850 \text{ V}$). A tensão 3400 V é dividida por quatro devido a uma das células ser o dobro das outras. Por esta razão, o valor de V_{cc} utilizado na simulação foi de 850 V. Nas duas células inferiores deve-se alimentar (tensão do barramento CC) com 850 V e a outra deve ser alimentada com $2 \cdot V_{cc}$ (1700 V), como indica a estrutura do inversor proposto. Na Tabela 19 estão apresentados os dados utilizados para as simulações que utilizam “ m_a ” = 1.

Tabela 19 - Dados utilizados no programa para simulações com " m_a " = 1

Dado	Valor
Valor rms da tensão de fase	2400 V
Valor de pico da tensão de fase com “ m_a ” = 1	3400V
Tensão base do barramento CC (V_{cc})	850 V
Frequência de amostragem de atualização das referências de tensões	5040 Hz
Período T de amostragem de atualização das referências de tensões	0,000198 segundos (= 1/5040 Hz)
Frequência da rede	60 Hz
Setores percorridos para um ciclo	84 setores (= 5040 Hz/60 Hz)
Tempo de simulação de um ciclo	0,0167 segundos (= 1/60 Hz)
Tempo de simulação	Número de ciclos.0,0167 segundos
T_{per} (número de pontos de amostragem por período)	512
m_a	1

3.7.2. Resultados das simulações

Nas próximas subseções estão demonstradas seis simulações realizadas em software de simulação matemática. A primeira demonstra como se comportam os sinais de saída do inversor com um índice de modulação de amplitude “ m_a ” variável. Este índice indica uma relação de amplitude de tensão que se obtém na saída do inversor (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). As duas simulações subsequentes ocorreram para verificar qual o melhor valor do índice de modulação a ser utilizado para as análises de *THD*, *DFI* e tensão de modo comum. Definido o valor “ m_a ”, a quarta simulação foi realizada para adequar apenas o sinal de saída de fase V_{an} , sem a verificação das outras tensões. Com esta simulação foi explicado detalhadamente o processo de análise da escolha da sequência de comutação. A quinta simulação foi realizada para melhorar todos os sinais de saída das tensões, tanto de fase como de linha, através da nova tabela dos vetores de comutação desenvolvida. Já na simulação de número seis, houve a verificação dos valores dos sinais de tensão de linha para um valor menor da tensão base do barramento CC.

3.7.2.1. Primeira simulação – índice de modulação variando no tempo

O inversor, no momento em que é acionado, tem seu valor de índice de modulação “ m_a ” crescendo com o tempo, começando com valor zero e atingindo valores próximos ou igual a 1. Com valores acima de 1, o valor da amplitude fundamental de tensão não varia linearmente conforme o “ m_a ”, e a tensão de saída apresenta uma maior quantidade de harmônicos (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Portanto, é possível controlar a amplitude da tensão de saída alterando o valor de “ m_a ”, e valores de “ m_a ” maiores que 1 não são recomendados.

Nesta primeira simulação, o índice de modulação variou de 0 até 1. Através da Figura 50, que indica o percurso do vetor V_{ref} dentro de hexágono pelo símbolo “*”, pode-se verificar que ao aumentar o índice de modulação “ m_a ”, o vetor V_{ref} também aumenta os valores das suas coordenadas no plano α - β . Na Figura 51 estão representadas as três tensões de linha de saída do inversor, que mostram o aumento gradual da magnitude devido o aumento crescente de “ m_a ”. Neste caso, foram simulados três ciclos.

Figura 50 - Setores em que o vetor de referência percorre com “ m_a ” variando – primeira simulação

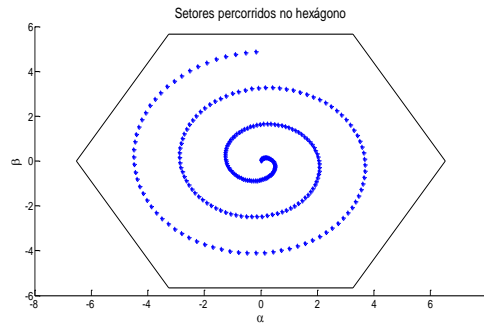
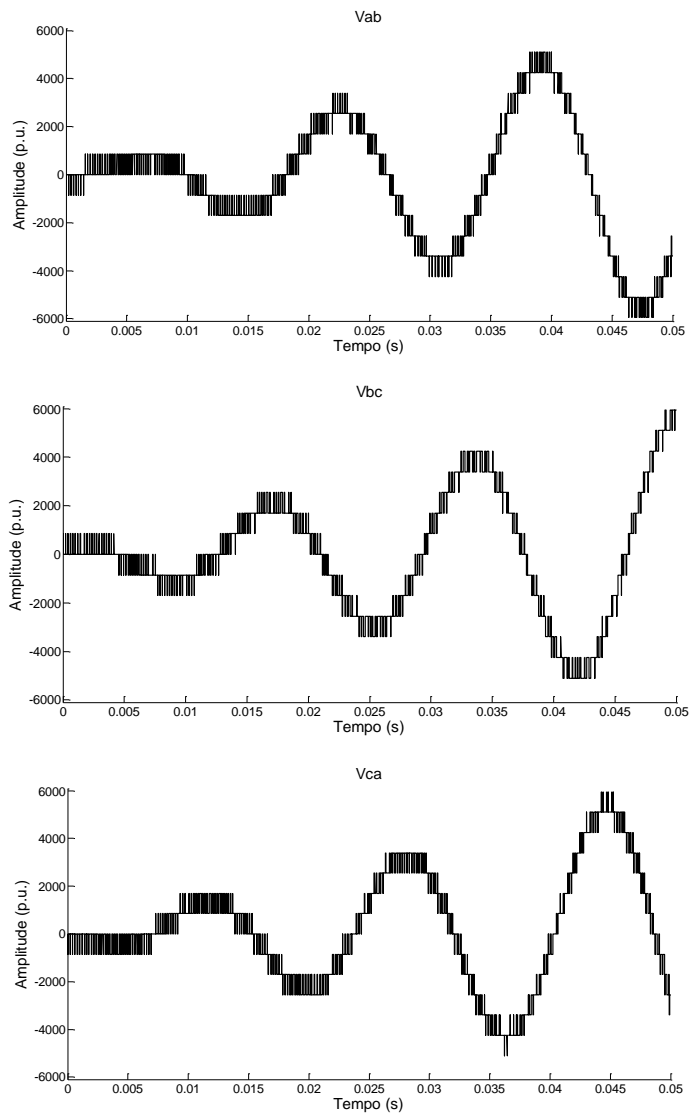


Figura 51 - Tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” variando – primeira simulação



3.7.2.2. Segunda e terceira simulação – índice de modulação = 0,7 e 1

A segunda e terceira simulação foram realizadas considerando um ciclo, e em ambas foi utilizada a sequência dos vetores de comutação arbitrária da Tabela 18. O índice de

modulação “ m_a ” utilizado para a segunda simulação foi igual a 0,7; e para a terceira simulação foi considerado “ m_a ” igual a 1.

Os percursos do vetor de referência V_{ref} no hexágono, simbolizado por “*”, decorrente das simulações com o índice de modulação igual a 0,7 e 1, estão ilustrados na Figura 52. Percebe-se que, ao aumentar o índice de modulação, o vetor de referência percorre setores mais externos, atingindo pontos que possuem menos vetores redundantes, porém, com maiores valores de tensão.

Os resultados normalizados da tensão de fase V_{an} referentes as duas simulações estão representados na Figura 53. Na Figura 54 está representado o sinal de saída V_{ab} do inversor (tensão de linha) em valores reais (nível.Vcc), sendo em (a) o sinal da simulação com “ m_a ” = 0,7 e em (b) o sinal da simulação com “ m_a ” = 1.

Figura 52 - Setores em que o vetor de referência percorre com: (a) “ m_a ” = 0,7; (b) “ m_a ” = 1 – segunda e terceira simulações, respectivamente

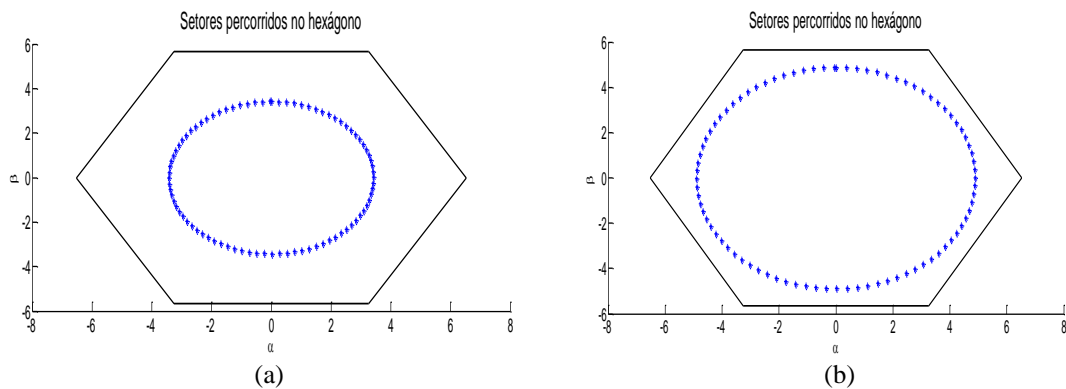


Figura 53 - Tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com: (a) “ m_a ” = 0,7; (b) “ m_a ” = 1 – segunda e terceira simulações, respectivamente

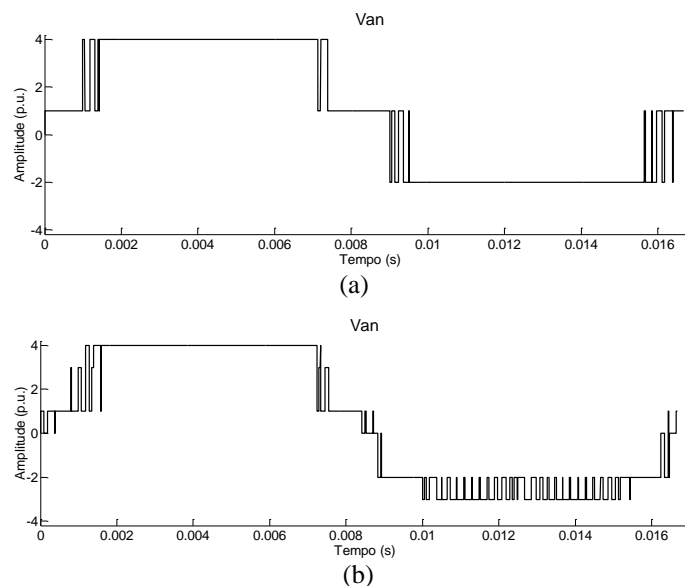
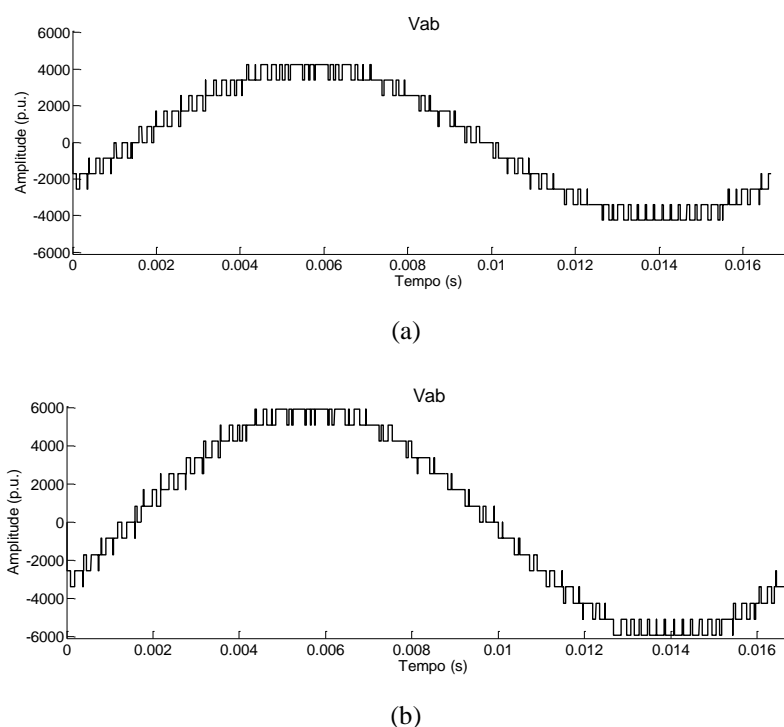


Figura 54 - Tensões de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com: (a) “ m_a ” = 0,7; (b) “ m_a ” = 1 – segunda e terceira simulações, respectivamente



Percebe-se que na tensão de fase V_{an} da segunda simulação (Figura 53 (a)), além da forma de onda ficar sobremodulada, a tensão atinge sete níveis (de -2 a +4). Verificou-se também que, nas outras tensões de fase (V_{bn} e V_{cn}), houve o alcance de oito níveis (de -3 a +4), sendo que este inversor proposto deveria atingir nove níveis de tensão em cada uma das fases (de -4 a +4).

Na terceira simulação, com “ m_a ” = 1, em relação às tensões de fase, percebeu-se, em comparação à segunda simulação, um acréscimo no número de níveis em cada fase. A tensão V_{an} passou a ter oito níveis (de -3 a +4) (vide Figura 53 (b)), e V_{bn} e V_{cn} evoluíram para nove (de -4 a +4). Nas tensões de linha (Figura 54), utilizando “ m_a ” igual a 1, os valores das tensões atingiram uma magnitude maior do que na simulação com “ m_a ” igual a 0,7, como esperado, uma vez que foi comprovado na primeira simulação que, ao aumentar o valor do índice de modulação, maiores são os valores das tensões. Também com “ m_a ” igual a 1, a tensão de linha de saída atingiu quinze níveis (vide Figura 54 (b)), já com índice de modulação igual a 0,7 a tensão obteve onze níveis (vide Figura 54 (a)). O máximo de níveis na tensão de linha que este inversor proposto pode atingir é dezessete (oito níveis positivos, oito níveis negativos, mais o nível zero da tensão).

Para melhorar estes sinais, pode-se tentar selecionar melhor a sequência de comutação de cada setor, uma vez que em cada ponto que forma o triângulo do setor há vetores redundantes. Porém, para esta escolha, são necessárias muitas trocas de vetores para que as tensões de fase V_{an} , V_{bn} e V_{cn} atinjam os níveis de -4 a +4. Como a simulação com “ m_a ” = 1 obteve oito níveis, esta necessitará de menos trocas para atingir os nove níveis do inversor.

Simulações realizadas com “ m_a ” inferiores a 0,7 indicaram que, quanto menor o valor do índice de modulação, o vetor V_{ref} percorre mais ao centro e menos níveis a tensão V_{an} alcança, como também menor é a tensão que o inversor fornece à carga. Deste modo, o valor do índice de modulação escolhido para melhorar o sistema e continuar com as simulações foi de “ m_a ” = 1. Uma consequência de se fazer esta escolha é ter menos vetores redundantes para realizar substituições futuras dos vetores de comutação, já que foi constatado que, quanto mais na extremidade do hexágono o vetor V_{ref} se localiza, menos vetores redundantes há nos pontos dos setores.

Para a terceira simulação foram gerados os valores dos índices de *THD* (*total harmonic distortion*), *DFI* (*first order distortion fator*) e da tensão de modo comum (Tabela 20), sendo esses valores adquiridos para compará-los futuramente com a quinta simulação, com o intuito de verificar a possibilidade de melhorias que a modulação *SV* dispõe. As definições desses índices, assim como a comparação dos valores da Tabela 20 com valores da quinta simulação ocorrem no subcapítulo 3.8.

Tabela 20 - Valores de *THD*, *DFI* e do tensão no modo comum inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – terceira simulação

“ m_a ” = 1 – terceira simulação				
Tensão	<i>THD</i> de tensão (%)	<i>DFI</i> (%)	Tensão de modo comum de fase (V)	Tensão de modo comum de linha (V)
V_{an}	28,0882	5,5768	1,0200	0,0000
V_{bn}	28,3400	5,7062		
V_{cn}	27,6798	5,6796		
V_{ab}	8,5553	0,1905		
V_{bc}	8,5553	0,1905		
V_{ca}	8,4144	0,1477		

3.7.2.3. Quarta simulação – índice de modulação = 1 – substituição de vetores

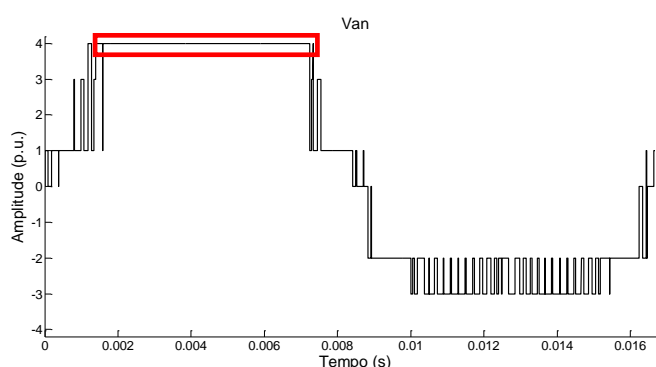
Como os valores das tensões de fase não foram satisfatórios na terceira simulação, como, por exemplo, o fato de a tensão de fase V_{an} não ter atingido nove níveis e ainda possuir vários vetores no nível +4, ocorrendo um nivelamento indesejado (vide Figura 53 (b)), uma vez que se busca um sinal mais similar a uma onda senoidal. Então para esta quarta simulação

teve-se como objetivo acabar com o nivelamento do sinal em V_{an} e mostrar como foi realizada o procedimento de substituição dos vetores e, conseqüentemente, a mudança da seqüência de comutação. Para tanto, foi necessário analisar setor por setor do trecho em que houve o nivelamento indesejado, para posteriormente substituir os vetores da seqüência de comutação. Esta análise para melhorar o sinal da tensão de fase V_{an} foi descrita no subitem a seguir.

3.7.2.3.1. Método de análise para substituição de vetores na seqüência de comutação – índice de modulação = 1

Nesta quarta simulação foi corrigido o sinal de V_{an} através da análise do seu sinal e, para tal ação, foram encontrados os setores em que houveram o nivelamento da amplitude em +4, em destaque na Figura 55. Esta ocorrência é ruim, pois torna o sinal menos parecido com uma onda senoidal, aumentando o valor da *THD*, uma vez que quanto mais próxima a uma senoidal, melhor a *THD*. Desta maneira teve-se como objetivo fazer com que neste intervalo de tempo do nivelamento em destaque, o sinal variasse entre +4 e +3.

Figura 55 - Destaque do sinal V_{an} no nível +4 – terceira simulação



Para poder substituir os vetores que provocaram o nivelamento indesejado do sinal de V_{an} em +4, inicialmente foi necessário conhecer os setores os quais o vetor V_{ref} percorreu durante o nivelamento. Sendo assim, na Figura 56 foi evidenciado o intervalo de tempo em que o nível ficou nivelado, entre 0,001583 e 0,007205 segundos.

Após obter o intervalo, foi primordial identificar os setores do intervalo e, foi possível conhecê-los por meio do gráfico da Figura 57. Esse gráfico identifica todos os setores que o vetor V_{ref} percorreu na simulação. O setor 38, destacado na Figura 57, foi o primeiro a ser identificado dentro do intervalo 0,001583 e 0,007205 segundos. A partir desse setor foram encontrados os subsequentes. Assim, foram identificados dezessete setores: 38, 48, 70, 82, 94, 120, 148, 163, 210, 225, 254, 268, 281, 306, 329, 340 e 351.

Figura 56 - Zoom na região em que houve o nivelamento indesejado do sinal V_{an} em +4 – terceira simulação

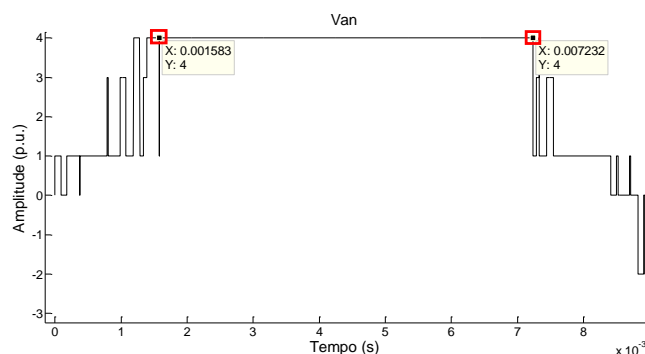
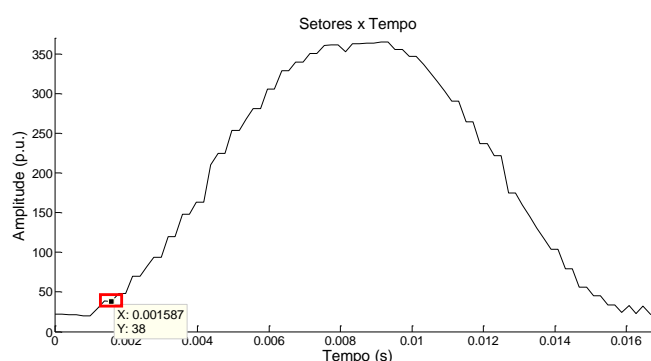


Figura 57 - Primeiro setor encontrado (setor 38) entre os valores 0,001583 a 0,007205 – terceira simulação



Identificados os setores, o passo seguinte foi alterar alguns vetores dos setores com o objetivo de fazer com que o sinal V_{an} variasse entre +4 e +3. Para exemplificar o método de substituição, o Apêndice B mostra como um setor é encontrado e o efeito no sinal V_{an} em consequência da substituição de apenas um vetor na sequência de comutação deste setor.

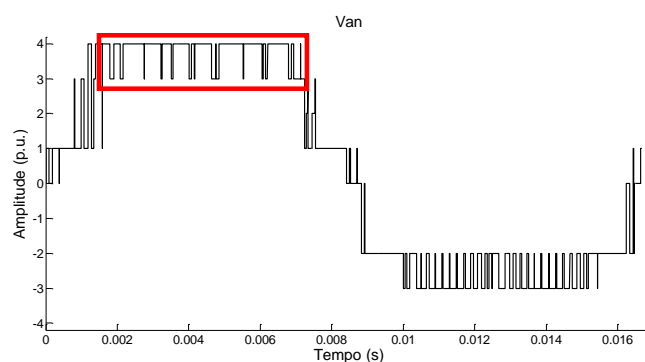
Uma questão importante analisada na troca dos vetores para melhor o sinal em V_{an} foi o impacto da troca nas outras tensões de fase (V_{bn} e V_{cn}). Muitas vezes a substituição do vetor melhorava o sinal em V_{an} , porém, piorava o sinal em V_{bn} e/ou V_{cn} . Sendo assim, vetores em que a substituição provocaria uma alteração de mais de um nível em alguma das fases não foi realizada num primeiro momento. Assim, com base nesse critério, após a análise de todos os dezessete setores encontrados no trecho (entre 0,001583 e 0,0072050 segundos), foram selecionados nove setores: 48, 82, 120, 163, 225, 268, 306, 340 e 351. Em cada um desses setores foi verificado qual seria a melhor sequência de chaveamento e, esta operação, foi realizada através da consulta à Tabela 16, que identifica os vetores de comutação de cada setor e os seus respectivos pontos no plano α - β , e pela consulta à Tabela 35 do Apêndice C, que indicam quais os vetores redundantes em cada ponto. Dessa forma foi possível analisar quais foram os possíveis vetores que poderiam substituir algum vetor com nível +4. A Tabela 21 mostra os nove setores da Tabela 18 que sofreram alterações para a quarta simulação.

Tabela 21 - Vetores que foram substituídos para alterar a sequência de comutação do setor

Setor	Vetor substituído	Ponto do hexágono	Novo vetor da sequência	Vetor substituído	Ponto do hexágono	Novo vetor da sequência
48	V16	d3	V107	-----	-----	-----
82	V25	e3	V116	-----	-----	-----
120	V43	g3	V134	-----	-----	-----
163	V52	h3	V143	-----	-----	-----
225	V60	j3	V151	-----	-----	-----
268	V58	l3	V149	-----	-----	-----
306	V57	m3	V148	-----	-----	-----
340	V55	o3	V146	-----	-----	-----
351	V55	o3	V146	V145	p3	V236

Após essas alterações nas sequências de chaveamento desses setores, foi realizada a quarta simulação, com um ciclo, para verificar se houveram mudanças na região destacada na Figura 55. O resultado da nova simulação está apresentada na Figura 58, a qual indica, em destaque, a significativa mudança no trecho que era crítico na tensão de fase V_{an} . Percebe-se que o objetivo de variar o sinal entre +3 e +4 no intervalo de tempo desejado foi atingido. Porém, o sinal continua com oito níveis. Sendo assim, o processo ainda precisa ser melhorado, o que ocorre na quinta simulação.

Figura 58 - Resultado de V_{an} com as mudanças de chaveamento de nove setores, eliminando o nivelamento em +4 – quarta simulação

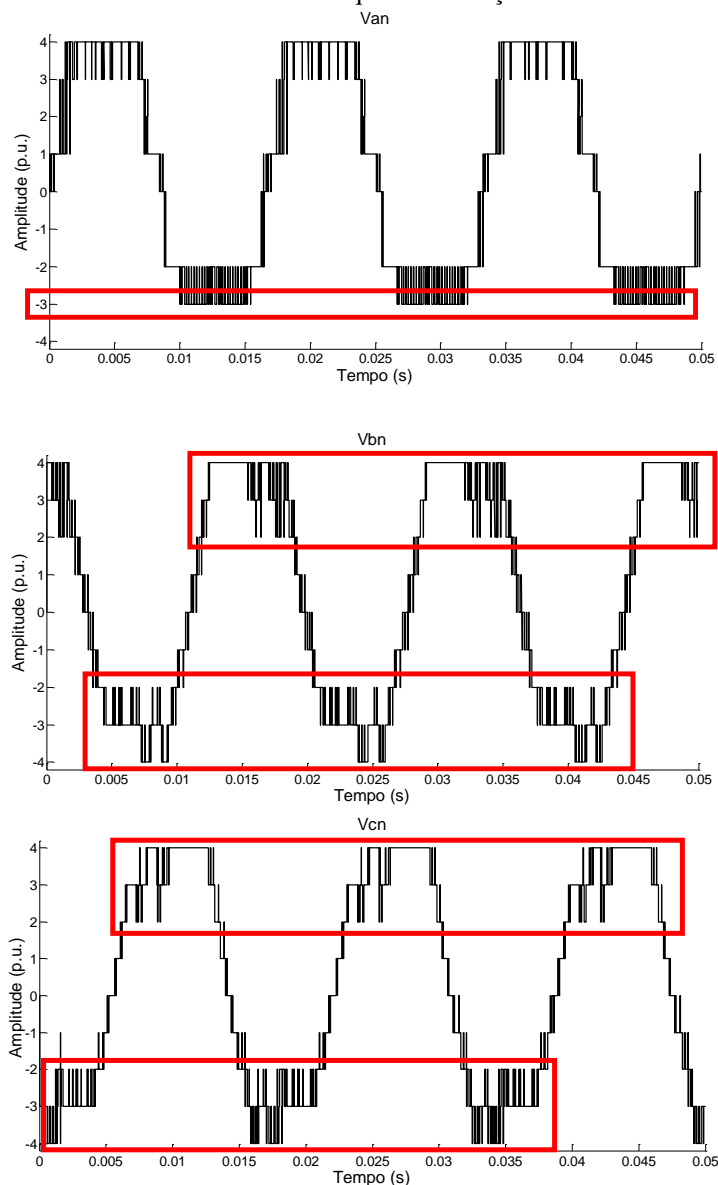


3.7.2.4. Quinta simulação – índice de modulação = 1 e com nova sequência de vetores de comutação

O objetivo da quinta simulação foi melhorar os índices de THD , DFI e a redução da tensão de modo comum da terceira simulação (Tabela 20), através das substituições dos vetores redundantes dos setores, fazendo com que a tensão de fase V_{an} atingisse o nível -4. Também teve como propósito melhorar os níveis das tensões V_{bn} e V_{cn} , que devem ficar oscilando entre os (-3, -4) e (+3, +4), respectivamente, nas regiões destacadas na Figura 59.

Desse modo, as substituições dos vetores de comutação priorizaram a melhoria da *THD*, *DFI* e a redução da tensão de modo comum, uma vez que a seleção dos vetores de comutação foi realizada para melhorar graficamente os sinais de tensão de fase e de linha, deixando estes sinais mais similares a uma onda senoidal. Logo, a seleção dos vetores, assim como o método utilizado para gerar as tensões de saída (demonstrado no item 3.6.), não priorizaram reduzir o número de comutações. Portanto, não foi analisado a frequência exata de cada chave semicondutora, podendo, desta maneira, ocorrer um aquecimento sobre as chaves. Também, foi observado que para cada período de amostragem, cada chave (tanto das células de baixa tensão como a célula de alta tensão) se comporta com frequências diferentes de acordo com o setor em qual V_{ref} se localizava.

Figura 59 - Resultados de V_{an} , V_{bn} e V_{cn} com três ciclos, indicando as regiões em que devem ser melhoradas – quarta simulação



Após várias substituições dos vetores de comutação e análises dos sinais dos gráficos das tensões de fase e de linha, com o intuito de tornar os sinais mais similares a uma onda senoidal, foi elaborada uma nova tabela de comutação (Tabela 22), substituindo a Tabela 18 anterior, que indicava uma sequência arbitrária. As análises e as trocas dos vetores da sequência de chaveamento foram realizadas de forma manual e para um específico valor de índice de modulação ($m_a = 1$). Também, houve o cuidado para que as alterações dos vetores, ao melhorar uma fase, não piorassem os outros sinais de tensão, tanto das tensões de fases como das tensões de linha.

A partir da nova tabela de vetores foi realizada a quinta simulação. Nesta Tabela 22 há todos os trezentos e oitenta e quatro (384) setores do hexágono, suas respectivas sequências de comutação, como também a sequência dos níveis de cada tensão de fase.

Tabela 22 - Nova sequência de comutação e os níveis de tensão das fases de cada vetor de comutação dos 384 setores

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
1	V9	V90	V8	4	3	4	4	4	4	-4	-4	-3
2	V90	V171	V89	3	2	3	4	4	4	-4	-4	-3
3	V171	V252	V261	2	1	1	4	4	3	-4	-4	-4
4	V252	V333	V251	1	0	1	4	4	4	-4	-4	-3
5	V333	V414	V332	0	-1	0	4	4	4	-4	-4	-3
6	V414	V495	V504	-1	-2	-2	4	4	3	-4	-4	-4
7	V495	V576	V494	-2	-3	-2	4	4	4	-4	-4	-3
8	V576	V657	V575	-3	-4	-3	4	4	4	-4	-4	-3
9	V18	V8	V9	4	4	4	3	4	4	-4	-3	-4
10	V8	V89	V90	4	3	3	4	4	4	-3	-3	-4
11	V89	V261	V171	3	1	2	4	3	4	-3	-4	-4
12	V261	V251	V252	1	1	1	3	4	4	-4	-3	-4
13	V251	V332	V333	1	0	0	4	4	4	-3	-3	-4
14	V332	V504	V414	0	-2	-1	4	3	4	-3	-4	-4
15	V504	V494	V495	-2	-2	-2	3	4	4	-4	-3	-4
16	V494	V575	V576	-2	-3	-3	4	4	4	-3	-3	-4
17	V575	V656	V657	-3	-4	-4	4	4	4	-3	-3	-4
18	V18	V8	V17	4	4	4	3	4	3	-4	-3	-3
19	V8	V89	V7	4	3	4	4	4	4	-3	-3	-2
20	V89	V261	V179	3	1	2	4	3	3	-3	-4	-3
21	V261	V251	V260	1	1	1	3	4	3	-4	-3	-3
22	V251	V332	V341	1	0	0	4	4	3	-3	-3	-3
23	V332	V504	V422	0	-2	-1	4	3	3	-3	-4	-3
24	V504	V585	V503	-2	-3	-2	3	3	3	-4	-4	-3
25	V494	V575	V493	-2	-3	-2	4	4	4	-3	-3	-2
26	V575	V656	V574	-3	-4	-3	4	4	4	-3	-3	-2
27	V27	V17	V18	4	4	4	2	3	3	-4	-3	-4
28	V17	V7	V8	4	4	4	3	4	4	-3	-2	-3
29	V98	V179	V89	3	2	3	3	3	4	-3	-3	-3
30	V179	V260	V261	2	1	1	3	3	3	-3	-3	-4
31	V260	V250	V251	1	1	1	3	4	4	-3	-2	-3
32	V341	V422	V332	0	-1	0	3	3	4	-3	-3	-3
33	V422	V503	V504	-1	-2	-2	3	3	3	-3	-3	-4
34	V503	V493	V585	-2	-2	-3	3	4	3	-3	-2	-4
35	V493	V574	V575	-2	-3	-3	4	4	4	-2	-2	-3
36	V574	V655	V656	-3	-4	-4	4	4	4	-2	-2	-3
37	V27	V17	V26	4	4	4	2	3	2	-4	-3	-3
193	V81	V71	V80	4	4	4	-4	-3	-4	-4	-3	-3
194	V71	V61	V70	4	4	4	-3	-2	-3	-3	-2	-2
195	V61	V51	V60	4	4	4	-2	-1	-2	-2	-1	-1
196	V51	V41	V50	4	4	4	-1	0	-1	-1	0	0
197	V41	V31	V40	4	4	4	0	1	0	0	1	1
198	V31	V21	V30	4	4	4	1	2	1	1	2	2
199	V21	V11	V20	4	4	4	2	3	2	2	3	3
200	V11	V1	V10	4	4	4	3	4	3	3	4	4
201	V1	V264	V273	4	1	1	4	2	1	4	2	2
202	V264	V254	V263	1	1	1	2	3	2	2	3	3
203	V254	V244	V253	1	1	1	3	4	3	3	4	4
204	V244	V507	V516	1	-2	-2	4	2	1	4	2	2
205	V507	V497	V506	-2	-2	-2	2	3	2	2	3	3
206	V497	V487	V496	-2	-2	-2	3	4	3	3	4	4
207	V487	V568	V577	-2	-3	-3	4	4	3	4	4	4
208	V568	V649	V658	-3	-4	-4	4	4	3	4	4	4
209	V80	V70	V71	4	4	4	-4	-3	-3	-3	-2	-3
210	V70	V60	V61	4	4	4	-3	-2	-2	-2	-1	-2
211	V60	V50	V51	4	4	4	-2	-1	-1	-1	0	-1
212	V50	V40	V41	4	4	4	-1	0	0	0	1	0
213	V40	V30	V31	4	4	4	0	1	1	1	2	1
214	V30	V20	V21	4	4	4	1	2	2	2	3	2
215	V20	V10	V11	4	4	4	2	3	3	3	4	3
216	V10	V273	V1	4	1	4	3	1	4	4	2	4
217	V273	V263	V264	1	1	1	1	2	2	2	3	2
218	V263	V253	V254	1	1	1	2	3	3	3	4	3
219	V253	V516	V244	1	-2	1	3	1	4	4	2	4
220	V516	V506	V507	-2	-2	-2	1	2	2	2	3	2
221	V506	V496	V497	-2	-2	-2	2	3	3	3	4	3
222	V587	V668	V578	-3	-4	-3	2	2	3	3	3	3
223	V577	V658	V568	-3	-4	-3	3	3	4	4	4	4
224	V80	V70	V79	4	4	4	-4	-3	-4	-3	-2	-2
225	V70	V151	V69	4	3	4	-3	-3	-3	-2	-2	-1
226	V60	V50	V59	4	4	4	-2	-1	-2	-1	0	0
227	V50	V40	V49	4	4	4	-1	0	-1	0	1	1
228	V40	V30	V39	4	4	4	0	1	0	1	2	2
229	V30	V20	V29	4	4	4	1	2	1	2	3	3

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
38	V17	V189	V107	4	2	3	3	2	2	-3	-4	-3
39	V98	V270	V188	3	1	2	3	2	2	-3	-4	-3
40	V270	V260	V269	1	1	1	2	3	2	-4	-3	-3
41	V260	V250	V259	1	1	1	3	4	3	-3	-2	-2
42	V250	V513	V249	1	-2	1	4	2	4	-2	-4	-1
43	V513	V503	V512	-2	-2	-2	2	3	2	-4	-3	-3
44	V503	V493	V502	-2	-2	-2	3	4	3	-3	-2	-2
45	V584	V665	V583	-3	-4	-3	3	3	3	-3	-3	-2
46	V574	V655	V573	-3	-4	-3	4	4	4	-2	-2	-1
47	V36	V26	V27	4	4	4	1	2	2	-4	-3	-4
48	V26	V107	V108	4	3	3	2	2	2	-3	-3	-4
49	V16	V6	V7	4	4	4	3	4	4	-2	-1	-2
50	V6	V269	V270	4	1	1	4	2	2	-1	-3	-4
51	V269	V259	V260	1	1	1	2	3	3	-3	-2	-3
52	V259	V249	V250	1	1	1	3	4	4	-2	-1	-2
53	V249	V512	V513	1	-2	-2	4	2	2	-1	-3	-4
54	V512	V502	V503	-2	-2	-2	2	3	3	-3	-2	-3
55	V502	V492	V493	-2	-2	-2	3	4	4	-2	-1	-2
56	V583	V664	V574	-3	-4	-3	3	3	4	-2	-2	-2
57	V573	V654	V655	-3	-4	-4	4	4	4	-1	-1	-2
58	V36	V26	V35	4	4	4	1	2	1	-4	-3	-3
59	V26	V107	V116	4	3	3	2	2	1	-3	-3	-3
60	V16	V6	V15	4	4	4	3	4	3	-2	-1	-1
61	V6	V269	V5	4	1	4	4	2	4	-1	-3	0
62	V269	V259	V268	1	1	1	2	3	2	-3	-2	-2
63	V259	V249	V258	1	1	1	3	4	3	-2	-1	-1
64	V249	V512	V248	1	-2	1	4	2	4	-1	-3	0
65	V512	V502	V511	-2	-2	-2	2	3	2	-3	-2	-2
66	V502	V492	V501	-2	-2	-2	3	4	3	-2	-1	-1
67	V583	V573	V582	-3	-3	-3	3	4	3	-2	-1	-1
68	V573	V654	V572	-3	-4	-3	4	4	4	-1	-1	0
69	V45	V35	V36	4	4	4	0	1	1	-4	-3	-4
70	V35	V116	V26	4	3	4	1	1	2	-3	-3	-3
71	V25	V15	V16	4	4	4	2	3	3	-2	-1	-2
72	V15	V5	V6	4	4	4	3	4	4	-1	0	-1
73	V5	V268	V269	4	1	1	4	2	2	0	-2	-3
74	V268	V258	V259	1	1	1	2	3	3	-2	-1	-2
75	V258	V248	V249	1	1	1	3	4	4	-1	0	-1
76	V248	V511	V512	1	-2	-2	4	2	2	0	-2	-3
77	V511	V501	V502	-2	-2	-2	2	3	3	-2	-1	-2

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
230	V20	V10	V19	4	4	4	2	3	2	3	4	4
231	V10	V273	V282	4	1	1	3	1	0	4	2	2
232	V273	V263	V272	1	1	1	1	2	1	2	3	3
233	V263	V253	V262	1	1	1	2	3	2	3	4	4
234	V253	V516	V525	1	-2	-2	3	1	0	4	2	2
235	V516	V506	V515	-2	-2	-2	1	2	1	2	3	3
236	V506	V496	V505	-2	-2	-2	2	3	2	3	4	4
237	V587	V668	V586	-3	-4	-3	2	2	2	3	3	4
238	V577	V658	V667	-3	-4	-4	3	3	2	4	4	4
239	V79	V69	V70	4	4	4	-4	-3	-3	-2	-1	-2
240	V69	V59	V60	4	4	4	-3	-2	-2	-1	0	-1
241	V59	V49	V50	4	4	4	-2	-1	-1	0	1	0
242	V49	V39	V40	4	4	4	-1	0	0	1	2	1
243	V39	V29	V30	4	4	4	0	1	1	2	3	2
244	V29	V19	V20	4	4	4	1	2	2	3	4	3
245	V19	V282	V10	4	1	4	2	0	3	4	2	4
246	V282	V272	V273	1	1	1	0	1	1	2	3	2
247	V272	V262	V263	1	1	1	1	2	2	3	4	3
248	V262	V525	V253	1	-2	1	2	0	3	4	2	4
249	V525	V515	V516	-2	-2	-2	0	1	1	2	3	2
250	V515	V505	V506	-2	-2	-2	1	2	2	3	4	3
251	V596	V586	V587	-3	-3	-3	1	2	2	3	4	3
252	V586	V667	V577	-3	-4	-3	2	2	3	4	4	4
253	V79	V69	V78	4	4	4	-4	-3	-4	-2	-1	-1
254	V69	V150	V159	4	3	3	-3	-3	-4	-1	-1	-1
255	V59	V49	V58	4	4	4	-2	-1	-2	0	1	1
256	V49	V39	V48	4	4	4	-1	0	-1	1	2	2
257	V39	V29	V38	4	4	4	0	1	0	2	3	3
258	V29	V19	V28	4	4	4	1	2	1	3	4	4
259	V19	V282	V291	4	1	1	2	0	-1	4	2	2
260	V282	V272	V281	1	1	1	0	1	0	2	3	3
261	V272	V262	V271	1	1	1	1	2	1	3	4	4
262	V262	V525	V534	1	-2	-2	2	0	-1	4	2	2
263	V525	V515	V524	-2	-2	-2	0	1	0	2	3	3
264	V515	V505	V514	-2	-2	-2	1	2	1	3	4	4
265	V596	V677	V595	-3	-4	-3	1	1	1	3	3	4
266	V586	V667	V676	-3	-4	-4	2	2	1	4	4	4
267	V78	V68	V69	4	4	4	-4	-3	-3	-1	0	-1
268	V68	V149	V150	4	3	3	-3	-3	-3	0	0	-1
269	V58	V48	V49	4	4	4	-2	-1	-1	1	2	1

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
78	V501	V491	V492	-2	-2	-2	3	4	4	-1	0	-1
79	V582	V663	V573	-3	-4	-3	3	3	4	-1	-1	-1
80	V572	V653	V654	-3	-4	-4	4	4	4	0	0	-1
81	V45	V35	V44	4	4	4	0	1	0	-4	-3	-3
82	V126	V116	V125	3	3	3	0	1	0	-4	-3	-3
83	V25	V15	V24	4	4	4	2	3	2	-2	-1	-1
84	V15	V5	V14	4	4	4	3	4	3	-1	0	0
85	V5	V268	V4	4	1	4	4	2	4	0	-2	1
86	V268	V258	V267	1	1	1	2	3	2	-2	-1	-1
87	V258	V248	V257	1	1	1	3	4	3	-1	0	0
88	V248	V511	V247	1	-2	1	4	2	4	0	-2	1
89	V511	V501	V510	-2	-2	-2	2	3	2	-2	-1	-1
90	V501	V491	V500	-2	-2	-2	3	4	3	-1	0	0
91	V491	V572	V490	-2	-3	-2	4	4	4	0	0	1
92	V572	V653	V571	-3	-4	-3	4	4	4	0	0	1
93	V54	V44	V45	4	4	4	-1	0	0	-4	-3	-4
94	V44	V125	V35	4	3	4	0	0	1	-3	-3	-3
95	V34	V24	V25	4	4	4	1	2	2	-2	-1	-2
96	V24	V14	V15	4	4	4	2	3	3	-1	0	-1
97	V14	V4	V5	4	4	4	3	4	4	0	1	0
98	V4	V267	V268	4	1	1	4	2	2	1	-1	-2
99	V267	V257	V258	1	1	1	2	3	3	-1	0	-1
100	V257	V247	V248	1	1	1	3	4	4	0	1	0
101	V247	V510	V511	1	-2	-2	4	2	2	1	-1	-2
102	V510	V500	V501	-2	-2	-2	2	3	3	-1	0	-1
103	V500	V490	V491	-2	-2	-2	3	4	4	0	1	0
104	V581	V571	V572	-3	-3	-3	3	4	4	0	1	0
105	V571	V652	V653	-3	-4	-4	4	4	4	1	1	0
106	V54	V44	V53	4	4	4	-1	0	-1	-4	-3	-3
107	V44	V34	V43	4	4	4	0	1	0	-3	-2	-2
108	V34	V24	V33	4	4	4	1	2	1	-2	-1	-1
109	V24	V14	V23	4	4	4	2	3	2	-1	0	0
110	V14	V4	V13	4	4	4	3	4	3	0	1	1
111	V4	V267	V3	4	1	4	4	2	4	1	-1	2
112	V267	V257	V266	1	1	1	2	3	2	-1	0	0
113	V257	V247	V256	1	1	1	3	4	3	0	1	1
114	V247	V510	V246	1	-2	1	4	2	4	1	-1	2
115	V510	V500	V509	-2	-2	-2	2	3	2	-1	0	0
116	V500	V490	V499	-2	-2	-2	3	4	3	0	1	1
117	V581	V662	V580	-3	-4	-3	3	3	3	0	0	1

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
270	V48	V38	V39	4	4	4	-1	0	0	2	3	2
271	V38	V28	V29	4	4	4	0	1	1	3	4	3
272	V28	V291	V19	4	1	4	1	-1	2	4	2	4
273	V291	V281	V282	1	1	1	-1	0	0	2	3	2
274	V281	V271	V272	1	1	1	0	1	1	3	4	3
275	V271	V534	V262	1	-2	1	1	-1	2	4	2	4
276	V534	V524	V525	-2	-2	-2	-1	0	0	2	3	2
277	V524	V514	V515	-2	-2	-2	0	1	1	3	4	3
278	V514	V595	V505	-2	-3	-2	1	1	2	4	4	4
279	V595	V676	V586	-3	-4	-3	1	1	2	4	4	4
280	V78	V68	V77	4	4	4	-4	-3	-4	-1	0	0
281	V159	V149	V158	3	3	3	-4	-3	-4	-1	0	0
282	V58	V48	V57	4	4	4	-2	-1	-2	1	2	2
283	V48	V38	V47	4	4	4	-1	0	-1	2	3	3
284	V38	V28	V37	4	4	4	0	1	0	3	4	4
285	V28	V291	V300	4	1	1	1	-1	-2	4	2	2
286	V291	V281	V290	1	1	1	-1	0	-1	2	3	3
287	V281	V271	V280	1	1	1	0	1	0	3	4	4
288	V271	V534	V543	1	-2	-2	1	-1	-2	4	2	2
289	V534	V524	V533	-2	-2	-2	-1	0	-1	2	3	3
290	V524	V514	V523	-2	-2	-2	0	1	0	3	4	4
291	V605	V686	V604	-3	-4	-3	0	0	0	3	3	4
292	V595	V676	V685	-3	-4	-4	1	1	0	4	4	4
293	V77	V67	V68	4	4	4	-4	-3	-3	0	1	0
294	V67	V57	V58	4	4	4	-3	-2	-2	1	2	1
295	V57	V47	V48	4	4	4	-2	-1	-1	2	3	2
296	V47	V37	V38	4	4	4	-1	0	0	3	4	3
297	V37	V300	V28	4	1	4	0	-2	1	4	2	4
298	V300	V290	V291	1	1	1	-2	-1	-1	2	3	2
299	V290	V280	V281	1	1	1	-1	0	0	3	4	3
300	V280	V543	V271	1	-2	1	0	-2	1	4	2	4
301	V543	V533	V534	-2	-2	-2	-2	-1	-1	2	3	2
302	V533	V523	V524	-2	-2	-2	-1	0	0	3	4	3
303	V614	V695	V605	-3	-4	-3	-1	-1	0	3	3	3
304	V604	V685	V595	-3	-4	-3	0	0	1	4	4	4
305	V77	V67	V76	4	4	4	-4	-3	-4	0	1	1
306	V67	V148	V66	4	3	4	-3	-3	-3	1	1	2
307	V57	V47	V56	4	4	4	-2	-1	-2	2	3	3
308	V47	V37	V46	4	4	4	-1	0	-1	3	4	4
309	V37	V300	V309	4	1	1	0	-2	-3	4	2	2

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
118	V571	V652	V570	-3	-4	-3	4	4	4	1	1	2
119	V63	V53	V54	4	4	4	-2	-1	-1	-4	-3	-4
120	V53	V134	V135	4	3	3	-1	-1	-1	-3	-3	-4
121	V43	V33	V34	4	4	4	0	1	1	-2	-1	-2
122	V33	V23	V24	4	4	4	1	2	2	-1	0	-1
123	V23	V13	V14	4	4	4	2	3	3	0	1	0
124	V13	V3	V4	4	4	4	3	4	4	1	2	1
125	V3	V266	V267	4	1	1	4	2	2	2	0	-1
126	V266	V256	V257	1	1	1	2	3	3	0	1	0
127	V256	V246	V247	1	1	1	3	4	4	1	2	1
128	V246	V509	V510	1	-2	-2	4	2	2	2	0	-1
129	V509	V499	V500	-2	-2	-2	2	3	3	0	1	0
130	V499	V489	V490	-2	-2	-2	3	4	4	1	2	1
131	V580	V570	V571	-3	-3	-3	3	4	4	1	2	1
132	V570	V651	V652	-3	-4	-4	4	4	4	2	2	1
133	V63	V53	V62	4	4	4	-2	-1	-2	-4	-3	-3
134	V53	V134	V143	4	3	3	-1	-1	-2	-3	-3	-3
135	V43	V33	V42	4	4	4	0	1	0	-2	-1	-1
136	V33	V23	V32	4	4	4	1	2	1	-1	0	0
137	V23	V13	V22	4	4	4	2	3	2	0	1	1
138	V13	V3	V12	4	4	4	3	4	3	1	2	2
139	V3	V266	V2	4	1	4	4	2	4	2	0	3
140	V266	V256	V265	1	1	1	2	3	2	0	1	1
141	V256	V246	V255	1	1	1	3	4	3	1	2	2
142	V246	V509	V245	1	-2	1	4	2	4	2	0	3
143	V509	V499	V508	-2	-2	-2	2	3	2	0	1	1
144	V499	V489	V498	-2	-2	-2	3	4	3	1	2	2
145	V580	V661	V579	-3	-4	-3	3	3	3	1	1	2
146	V570	V651	V569	-3	-4	-3	4	4	4	2	2	3
147	V72	V62	V63	4	4	4	-3	-2	-2	-4	-3	-4
148	V62	V143	V144	4	3	3	-2	-2	-2	-3	-3	-4
149	V52	V42	V43	4	4	4	-1	0	0	-2	-1	-2
150	V42	V32	V33	4	4	4	0	1	1	-1	0	-1
151	V32	V22	V23	4	4	4	1	2	2	0	1	0
152	V22	V12	V13	4	4	4	2	3	3	1	2	1
153	V12	V2	V3	4	4	4	3	4	4	2	3	2
154	V2	V265	V266	4	1	1	4	2	2	3	1	0
155	V265	V255	V256	1	1	1	2	3	3	1	2	1
156	V255	V245	V246	1	1	1	3	4	4	2	3	2
157	V245	V508	V509	1	-2	-2	4	2	2	3	1	0

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
310	V300	V290	V299	1	1	1	-2	-1	-2	2	3	3
311	V290	V280	V289	1	1	1	-1	0	-1	3	4	4
312	V280	V543	V552	1	-2	-2	0	-2	-3	4	2	2
313	V543	V533	V542	-2	-2	-2	-2	-1	-2	2	3	3
314	V533	V523	V532	-2	-2	-2	-1	0	-1	3	4	4
315	V614	V695	V704	-3	-4	-4	-1	-1	-2	3	3	3
316	V604	V685	V694	-3	-4	-4	0	0	-1	4	4	4
317	V76	V66	V67	4	4	4	-4	-3	-3	1	2	1
318	V66	V147	V148	4	3	3	-3	-3	-3	2	2	1
319	V56	V46	V47	4	4	4	-2	-1	-1	3	4	3
320	V46	V309	V37	4	1	4	-1	-3	0	4	2	4
321	V309	V299	V300	1	1	1	-3	-2	-2	2	3	2
322	V299	V289	V290	1	1	1	-2	-1	-1	3	4	3
323	V289	V552	V280	1	-2	1	-1	-3	0	4	2	4
324	V552	V542	V543	-2	-2	-2	-3	-2	-2	2	3	2
325	V542	V532	V533	-2	-2	-2	-2	-1	-1	3	4	3
326	V623	V704	V614	-3	-4	-3	-2	-2	-1	3	3	3
327	V613	V694	V604	-3	-4	-3	-1	-1	0	4	4	4
328	V76	V66	V75	4	4	4	-4	-3	-4	1	2	2
329	V157	V147	V65	3	3	4	-4	-3	-3	1	2	3
330	V56	V46	V55	4	4	4	-2	-1	-2	3	4	4
331	V46	V309	V318	4	1	1	-1	-3	-4	4	2	2
332	V309	V299	V308	1	1	1	-3	-2	-3	2	3	3
333	V299	V289	V298	1	1	1	-2	-1	-2	3	4	4
334	V289	V552	V561	1	-2	-2	-1	-3	-4	4	2	2
335	V552	V542	V551	-2	-2	-2	-3	-2	-3	2	3	3
336	V542	V532	V541	-2	-2	-2	-2	-1	-2	3	4	4
337	V623	V613	V713	-3	-3	-4	-2	-1	-3	3	4	3
338	V613	V694	V703	-3	-4	-4	-1	-1	-2	4	4	4
339	V75	V65	V66	4	4	4	-4	-3	-3	2	3	2
340	V156	V237	V147	3	2	3	-4	-4	-3	2	2	2
341	V55	V318	V46	4	1	4	-2	-4	-1	4	2	4
342	V318	V308	V309	1	1	1	-4	-3	-3	2	3	2
343	V308	V298	V299	1	1	1	-3	-2	-2	3	4	3
344	V298	V561	V289	1	-2	1	-2	-4	-1	4	2	4
345	V561	V551	V552	-2	-2	-2	-4	-3	-3	2	3	2
346	V551	V541	V542	-2	-2	-2	-3	-2	-2	3	4	3
347	V632	V622	V623	-3	-3	-3	-3	-2	-2	3	4	3
348	V622	V703	V613	-3	-4	-3	-2	-2	-1	4	4	4
349	V75	V65	V74	4	4	4	-4	-3	-4	2	3	3

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
158	V508	V498	V499	-2	-2	-2	2	3	3	1	2	1
159	V498	V488	V489	-2	-2	-2	3	4	4	2	3	2
160	V579	V660	V661	-3	-4	-4	3	3	3	2	2	1
161	V569	V650	V651	-3	-4	-4	4	4	4	3	3	2
162	V72	V62	V71	4	4	4	-3	-2	-3	-4	-3	-3
163	V62	V143	V61	4	3	4	-2	-2	-2	-3	-3	-2
164	V52	V42	V51	4	4	4	-1	0	-1	-2	-1	-1
165	V42	V32	V41	4	4	4	0	1	0	-1	0	0
166	V32	V22	V31	4	4	4	1	2	1	0	1	1
167	V22	V12	V21	4	4	4	2	3	2	1	2	2
168	V12	V2	V11	4	4	4	3	4	3	2	3	3
169	V2	V265	V1	4	1	4	4	2	4	3	1	4
170	V265	V255	V264	1	1	1	2	3	2	1	2	2
171	V255	V245	V254	1	1	1	3	4	3	2	3	3
172	V245	V508	V244	1	-2	1	4	2	4	3	1	4
173	V508	V498	V507	-2	-2	-2	2	3	2	1	2	2
174	V498	V488	V497	-2	-2	-2	3	4	3	2	3	3
175	V579	V660	V578	-3	-4	-3	3	3	3	2	2	3
176	V569	V650	V568	-3	-4	-3	4	4	4	3	3	4
177	V81	V71	V72	4	4	4	-4	-3	-3	-4	-3	-4
178	V71	V61	V62	4	4	4	-3	-2	-2	-3	-2	-3
179	V61	V51	V52	4	4	4	-2	-1	-1	-2	-1	-2
180	V51	V41	V42	4	4	4	-1	0	0	-1	0	-1
181	V41	V31	V32	4	4	4	0	1	1	0	1	0
182	V31	V21	V22	4	4	4	1	2	2	1	2	1
183	V21	V11	V12	4	4	4	2	3	3	2	3	2
184	V11	V1	V2	4	4	4	3	4	4	3	4	3
185	V1	V264	V265	4	1	1	4	2	2	4	2	1
186	V264	V254	V255	1	1	1	2	3	3	2	3	2
187	V254	V244	V245	1	1	1	3	4	4	3	4	3
188	V244	V507	V508	1	-2	-2	4	2	2	4	2	1
189	V507	V497	V498	-2	-2	-2	2	3	3	2	3	2
190	V497	V487	V488	-2	-2	-2	3	4	4	3	4	3
191	V487	V568	V569	-2	-3	-3	4	4	4	4	4	3
192	V568	V649	V650	-3	-4	-4	4	4	4	4	4	3

Setor	Vetores de comutação			V _{an}			V _{bn}			V _{cn}		
	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''	V'	V''	V'''
350	V65	V55	V64	4	4	4	-3	-2	-3	3	4	4
351	V146	V227	V236	3	2	2	-3	-3	-4	3	3	3
352	V227	V308	V317	2	1	1	-3	-3	-4	3	3	3
353	V308	V389	V307	1	0	1	-3	-3	-3	3	3	4
354	V298	V561	V388	1	-2	0	-2	-4	-3	4	2	4
355	V470	V551	V560	-1	-2	-2	-3	-3	-4	3	3	3
356	V551	V632	V550	-2	-3	-2	-3	-3	-3	3	3	4
357	V541	V622	V631	-2	-3	-3	-2	-2	-3	4	4	4
358	V622	V703	V712	-3	-4	-4	-2	-2	-3	4	4	4
359	V74	V64	V65	4	4	4	-4	-3	-3	3	4	3
360	V64	V145	V55	4	3	4	-3	-3	-2	4	4	4
361	V145	V317	V227	3	1	2	-3	-4	-3	4	3	3
362	V317	V307	V308	1	1	1	-4	-3	-3	3	4	3
363	V307	V479	V389	1	-1	0	-3	-4	-3	4	3	3
364	V388	V560	V470	0	-2	-1	-3	-4	-3	4	3	3
365	V560	V641	V551	-2	-3	-2	-4	-4	-3	3	3	3
366	V550	V631	V541	-2	-3	-2	-3	-3	-2	4	4	4
367	V631	V712	V622	-3	-4	-3	-3	-3	-2	4	4	4
368	V74	V64	V73	4	4	4	-4	-3	-4	3	4	4
369	V64	V145	V154	4	3	3	-3	-3	-4	4	4	4
370	V145	V317	V235	3	1	2	-3	-4	-4	4	3	4
371	V317	V307	V316	1	1	1	-4	-3	-4	3	4	4
372	V307	V388	V397	1	0	0	-3	-3	-4	4	4	4
373	V388	V560	V478	0	-2	-1	-3	-4	-4	4	3	4
374	V560	V550	V559	-2	-2	-2	-4	-3	-4	3	4	4
375	V550	V631	V640	-2	-3	-3	-3	-3	-4	4	4	4
376	V631	V712	V721	-3	-4	-4	-3	-3	-4	4	4	4
377	V73	V154	V64	4	3	4	-4	-4	-3	4	4	4
378	V154	V235	V145	3	2	3	-4	-4	-3	4	4	4
379	V235	V316	V317	2	1	1	-4	-4	-4	4	4	3
380	V316	V397	V307	1	0	1	-4	-4	-3	4	4	4
381	V397	V478	V388	0	-1	0	-4	-4	-3	4	4	4
382	V478	V559	V560	-1	-2	-2	-4	-4	-4	4	4	3
383	V559	V640	V550	-2	-3	-2	-4	-4	-3	4	4	4
384	V640	V721	V631	-3	-4	-3	-4	-4	-3	4	4	4

Os gráficos da simulação, envolvendo a nova Tabela 22 dos vetores de comutação de cada setor, estão divulgados nas figuras a seguir, sendo a Figura 60, indicando as tensões de fase V_{an} , V_{bn} e V_{cn} ; e a Figura 61, mostrando o resultado das tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} .

Figura 60 - Tensões de fase V_{an} , V_{bn} e V_{cn} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação

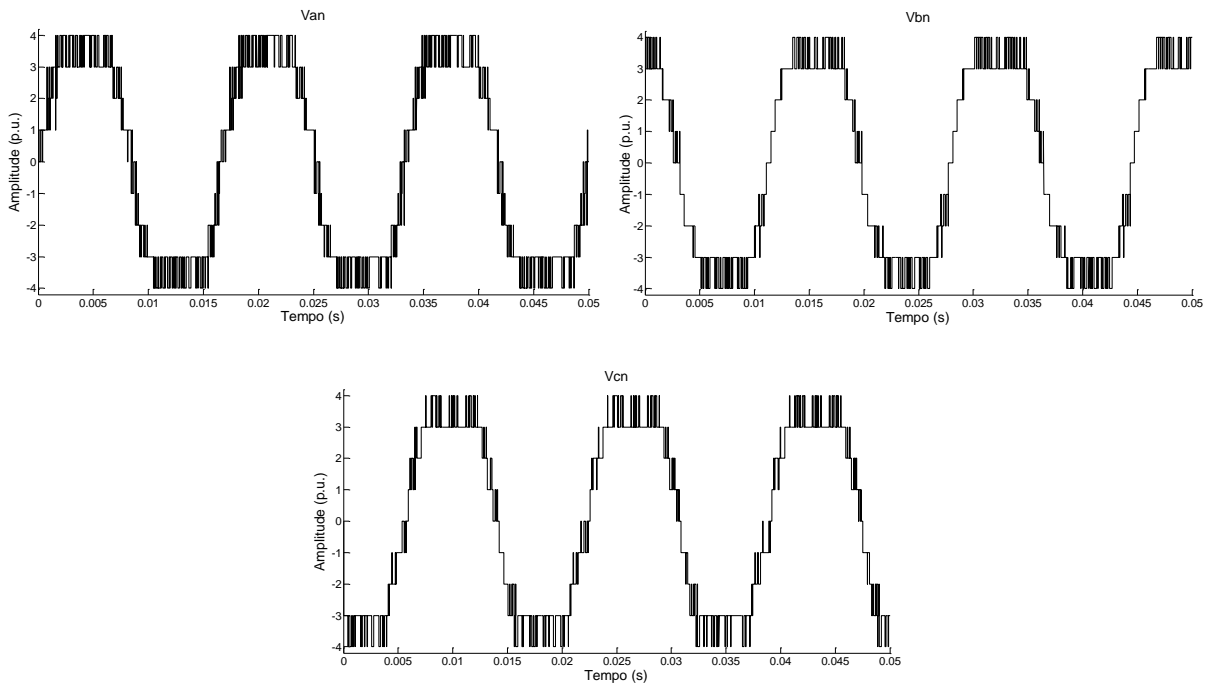
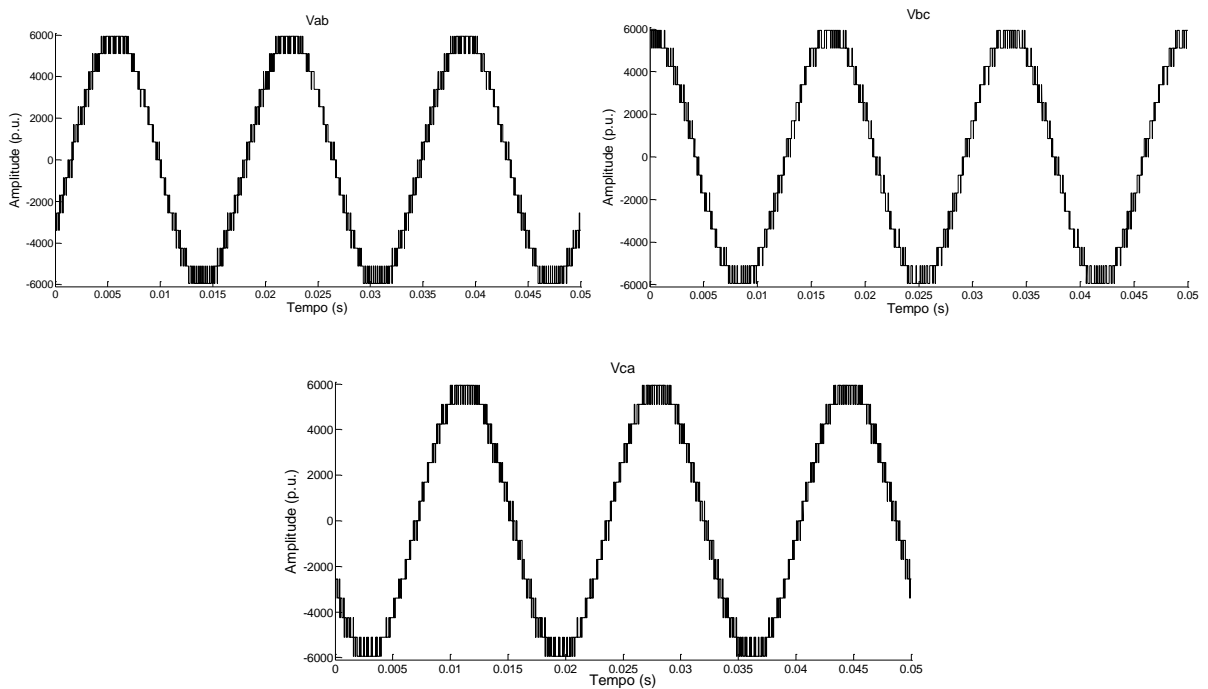


Figura 61 - Tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação



Os índices de *THD*, *DFI* e do tensão no modo comum foram gerados, Tabela 23, para posterior verificação das melhorias que ocorreram em comparação com a terceira simulação (da Tabela 20) em decorrência das substituições dos vetores na sequência de comutação. No subcapítulo 3.8 estão relacionadas as definições desses índices, assim como a comparação dos valores entre as duas simulações (terceira e quinta simulação).

Tabela 23 - Valores de *THD*, *DFI* e do tensão no modo comum inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação

Tensão	“ m_a ” = 1 – quinta simulação		Tensão de modo comum de fase (V)	Tensão de modo comum de linha (V)
	<i>THD</i> de tensão (%)	<i>DFI</i> (%)		
V _{an}	24,5098	4,2389	0,6320	0,0000
V _{bn}	23,3432	4,4350		
V _{cn}	24,4866	4,5791		
V _{ab}	8,5553	0,1905		
V _{bc}	8,5553	0,1905		
V _{ca}	8,6274	0,1772		

Da quinta simulação, também foram gerados, para um período, os espectros harmônicos das tensões de fase, como das tensões de linha. Para uma melhora análise da quinta simulação, nas figuras abaixo estão ilustrados os espectros harmônicos das tensões de fase (Figura 62) e das tensões de linha (Figura 63). Nos espectros dessas figuras, o intuito foi verificar o valor da fundamental (primeira harmônica), logo, foram desenvolvidos até a 84^o harmônica, uma vez que a frequência de amostragem de atualização das referências de tensões utilizada foi de 5040 Hz (5040 Hz/60 Hz = 84 harmônicas).

Figura 62 - Espectros harmônicos das tensões de fase do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 e com a primeira harmônica – quinta simulação

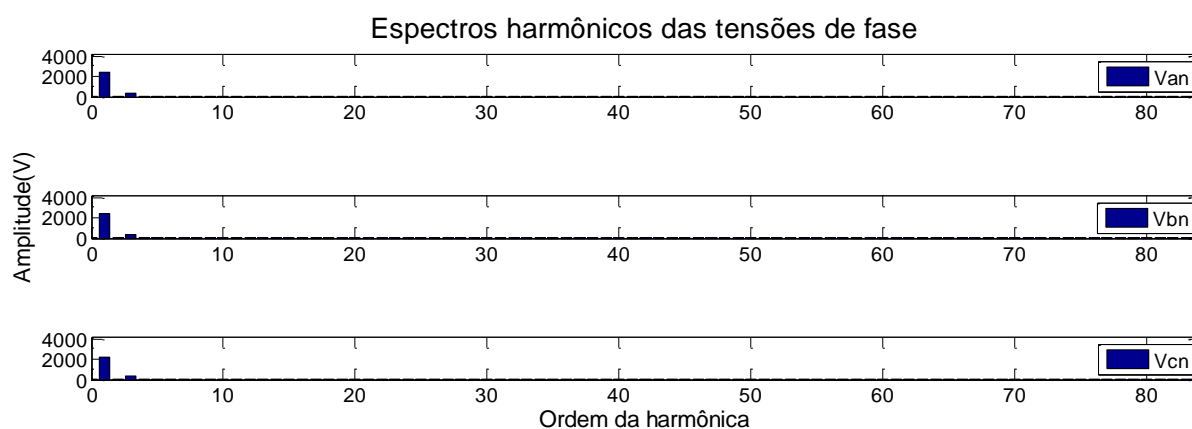
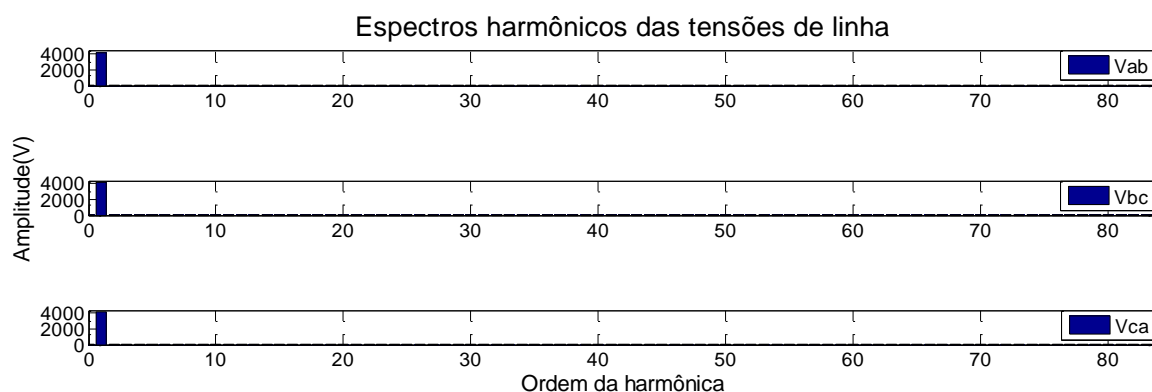


Figura 63 - Espectros harmônicos das tensões de linha do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ”= 1e com a primeira harmônica – quinta simulação



Através dos dados mencionados no subitem 3.7.1, os valores rms das tensões de fase (V_{Frms}) devem ficar próximos a 2400 V, e os valores rms das tensões de linha (V_{Lrms}) próximos a 4160 V. Portanto, foi realizado um zoom nos gráficos das Figura 62 e Figura 63 sobre os valores das amplitudes das harmônicas para constatar os valores das fundamentais. Na Figura 64 está destacado o valor da primeira fundamental da tensão de fase V_{an} igual a 2480 V, muito próximo de 2400 V. No gráfico da tensão de linha V_{ab} , Figura 65, o valor da primeira fundamental ficou com 4160 V, exatamente igual ao valor rms da tensão de linha (V_{Lrms}) escolhido. Sendo assim, foi verificado que, tanto o valor de tensão de fase, como na tensão de linha, ficou de acordo com o estipulado.

Figura 64 - Zoom do espectro harmônico da tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação

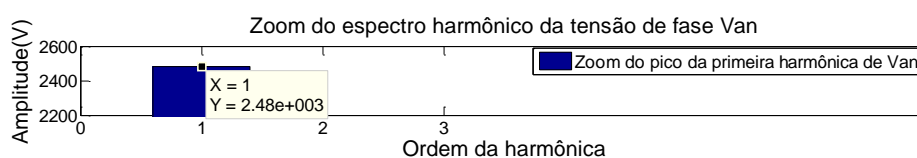
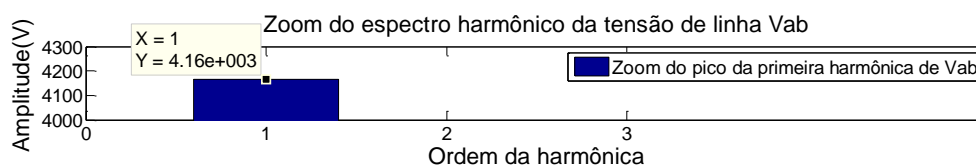


Figura 65 - Zoom do espectro harmônico da tensão de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação



É possível identificar, através da quinta simulação, que os gráficos dos espectros harmônicos não possuem valores distorcidos ao longo da ordem da harmônica e que atingiram valores similares aos desejados. Porém, para uma melhor visualização das harmônicas, os

espectros harmônicos das tensões de fase e de linha foram gerados sem a fundamental, como também alcançando o limite máxima da frequência de chaveamento das chaves = 15120 Hz (252 harmônicas), conforme Figura 66 e Figura 67, respectivamente. Nas harmônicas das tensões de fase (Figura 66) percebe-se que a terceira harmônica atinge um valor maior que as demais, e há uma concentração maior de harmônicas nas baixas frequências. Nas tensões de linha, é comum ter uma concentração de harmônicas na frequência de chaveamento e seus múltiplos. No caso da quinta simulação, a concentração de harmônicas deveria ocorrer próximas as frequências 5040 Hz, 10080 Hz e 15120 Hz, que correspondem as harmônicas 84, 168 e 252, respectivamente. Porém, as harmônicas estão mais espalhadas no espectro (Figura 67) devido a sequência de comutação não ter sido otimizada visando melhorar a frequência de cada chave em cada setor. Desta maneira, um método de melhoria para minimizar as harmônicas ao longo do espectro é realizar uma otimização da escolha dos vetores de chaveamento priorizando a frequência de comutação das chaves.

Figura 66 - Espectros harmônicos das tensões de linha do inversor de nove níveis proposto com “ma”= 1 e sem a primeira harmônica – quinta simulação

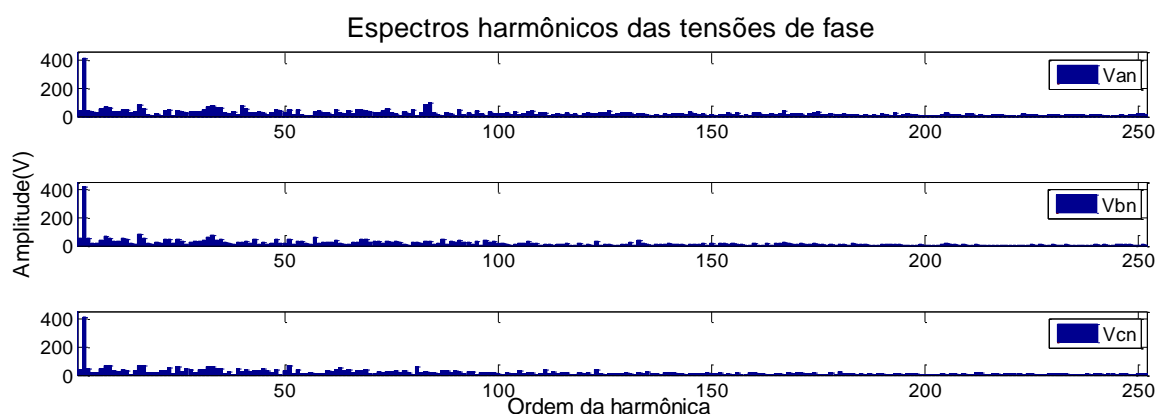
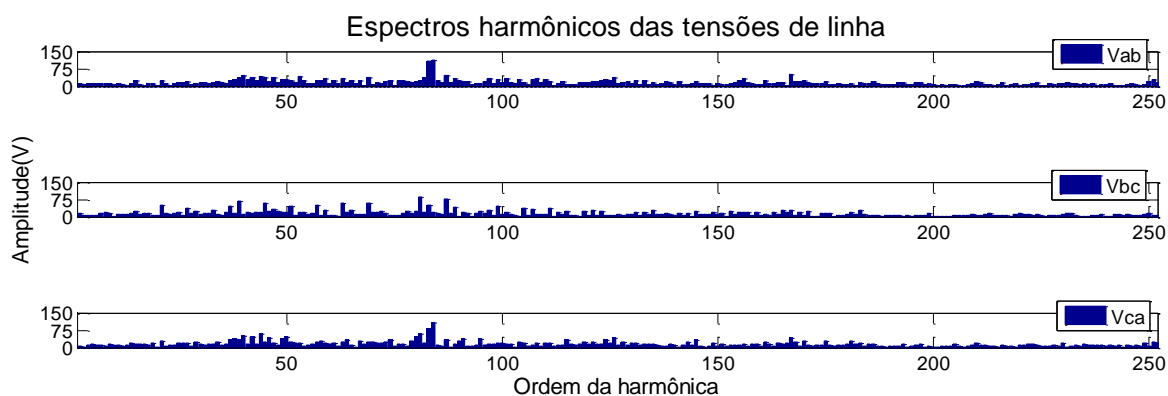
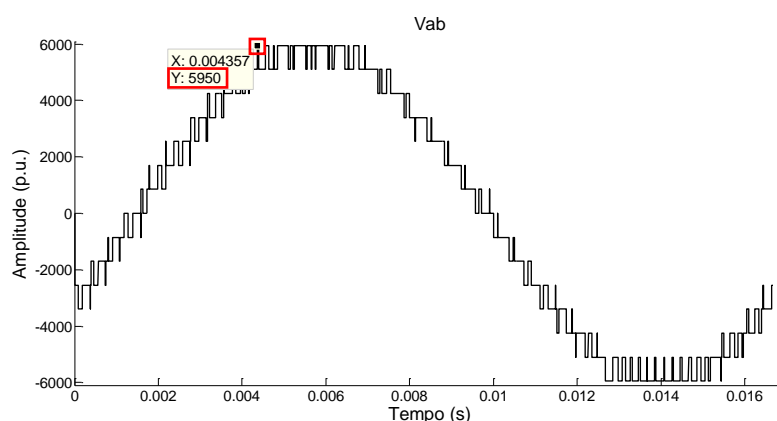


Figura 67 - Espectros harmônicos das tensões de linha do inversor de nove níveis proposto com “ma”= 1 e sem a primeira harmônica – quinta simulação



Outra consideração a se fazer sobre a quinta simulação é em relação aos valores de tensão utilizadas na simulação, indicadas na Tabela 19. Percebe-se que, através das substituições dos vetores em determinados setores, houveram diversas modificações positivas e desejadas nos sinais de saída das tensões de fase, não prejudicando os sinais das tensões de linha. Com esta quinta simulação, foi possível modificar todas as tensões de fase para nove níveis cada uma, e tornar tanto as tensões de fase como de linha, mais próximas a uma onda senoidal. Percebe-se também que o valor de pico da tensão de linha V_{ab} , em destaque no gráfico da Figura 68, atingiu o valor de 5950 V, ficando próximo aos 5883,13 V verificado em (16), demonstrando que a simulação está de acordo com o cálculo.

Figura 68 - Destaque no valor de pico da tensão de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 – quinta simulação



Através do gráfico Figura 52 (b) verifica-se que o vetor de referência (V_{ref}) não atingiu as bordas (limites) do hexágono, o que significa que é possível utilizar um valor de tensão base do barramento CC menor que o calculado no subitem 3.7.1. ($V_{cc} = 850$ V), mantendo os mesmos valores $V_{rms} = 4160$ V e $V_{Lpico} = 5880$ V (16) das tensões de linha. Esta possibilidade foi simulada com o valor de $V_{cc} = 730$ V (sexta simulação).

3.7.2.5. Sexta simulação – índice de modulação = 1 e com $V_{cc} = 735$ V

Afim de verificar a possibilidade do inversor proposto operar com uma tensão base do barramento CC menor que a calculado ($V_{cc} = 850$ V), fazendo com que o vetor de referência atingisse setores mais externos ao hexágono, foi realizada uma simulação com o V_{cc} igual a 730 V.

Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 69, que indica que o vetor de referência atingiu as bordas do hexágono; na Figura 70, que mostra o valor de pico da tensão de linha igual ao calculado em (16) e; na Figura 71, que ilustra os espectros harmônicos das

tensões de linha, em que o valor rms da tensão de linha V_{ab} igual a 4160 V está destacado na Figura 72. Observa-se também que na Figura 70 a tensão de linha obteve dezessete níveis, e na simulação cinco ($V_{cc} = 850$ V), a tensão de linha atingiu quinze níveis (vide Figura 68). Desta maneira, foi comprovado que o valor de tensão base do barramento CC pode ser diminuído. Porém, nesta dissertação, foram analisados os valores correspondentes a $V_{cc} = 850$ V como calculado no subitem 3.7.1. Sendo assim, nesta sexta simulação não ocorreu nenhum ajuste na sequência de comutação da Tabela 22, nem outro tipo de análise. Caso o valor V_{cc} fosse ainda menor, o vetor V_{ref} iria percorrer regiões fora do hexágono, e no algoritmo desenvolvido de busca do setor, iria gerar erro, não sintetizando as tensões de saída.

Figura 69 - Setores em que o vetor de referência percorre com $V_{cc} = 735$ V e “ma” = 1 – sexta simulação

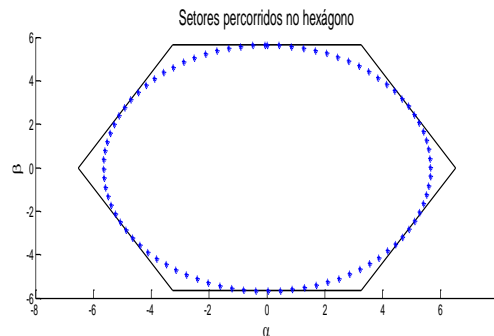


Figura 70 - Destaque no valor de pico da tensão de linha V_{ab} do inversor de nove níveis proposto com $V_{cc} = 735$ V e “ma” = 1 – sexta simulação

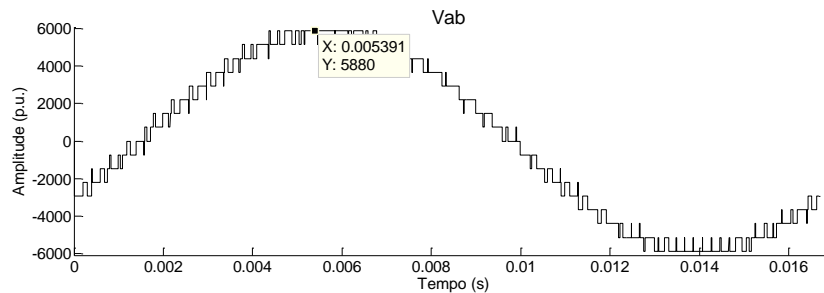


Figura 71 - Espectros harmônicos das tensões de fase do inversor de nove níveis proposto com $V_{cc} = 735$ V e “ma” = 1 – sexta simulação

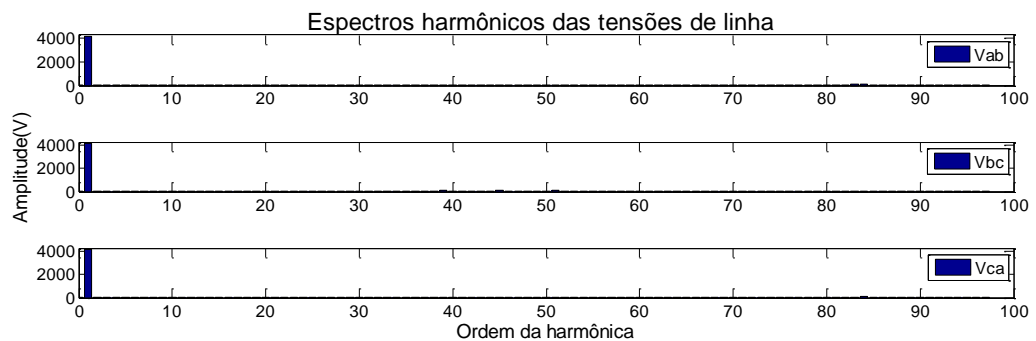
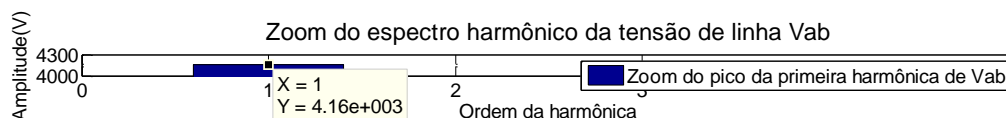


Figura 72 - Zoom do espectro harmônico da tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com $V_{cc} = 735 \text{ V}$ e “ma” = 1 – sexta simulação



Portanto, o desenvolvimento da modulação *space vector*, assim como as simulações realizadas estão corretas (válidas), sendo o próximo subcapítulo a explicação e análise dos valores dos índices de *THD*, *DFI* e tensão de modo comum dos sinais das tensões de fase e de linha da terceira e quinta simulação.

3.8. COMPARAÇÃO DOS VALORES DE *THD*, *DFI* E TENSÃO DE MODO COMUM DA TERCEIRA E DA QUINTA SIMULAÇÃO

Nesta etapa foram explicados os índices de *THD* – distorção harmônica total (*total harmonic distortion*), *DFI* – fator de distorção de primeira ordem (*first order distortion factor*) e tensão de modo comum. Também foi realizada a comparação desses índices gerados na terceira simulação, que utilizou uma sequência de comutação aleatória, com os valores oriundos da quinta simulação, que utilizou uma sequência otimizada.

THD indica o fator de distorção percentual de uma determinada forma de onda de tensão ou corrente com relação a uma forma de onda senoidal. É dada através da razão do valor eficaz do conteúdo harmônico pelo valor eficaz da parcela fundamental (ZAMBRA, 2010). Desta forma, nos sistemas elétricos pode-se adquirir dois valores de *THD*, sendo um para a tensão e outro para a corrente. Quanto menor o seu valor, melhor é o sistema. Como esta dissertação trabalha com um inversor de tensão, logo, a *THD* analisada é a *THD* de tensão, e esta pode ser calculada pela equação (18) (ZAMBRA, 2010).

$$THD (\%) = \frac{100}{V_{ef1}} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \quad (18)$$

Onde:

h = corresponde a componente harmônica

V_h = tensão do valor eficaz do conteúdo harmônico

V_{ef1} = tensão do valor eficaz da parcela da fundamental

O índice *DFI* é gerado para simular a adição de filtro de primeira ordem associado na saída do inversor. Este valor representa a ideia da atenuação harmônica que o filtro geraria na

saída do inversor. Ou seja, quanto menor o valor de DFI , menor será o peso, volume e custo deste filtro. A DFI é calculada pela equação (19) (ZAMBRA, 2010).

$$DFI(\%) = \frac{100}{V_{ef1}} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{h}\right)^2} \quad (19)$$

A tensão de modo comum representa a tensão gerada pela ação de chaveamento dos semicondutores que deve provocar uma tensão zero na saída do inversor. Esta tensão, portanto, deve apresentar um valor nulo. As tensões no modo comum diferentes de zero podem aumentar o valor das tensões de fase fornecidas ao motor, comprometendo o isolamento e, desta forma, podendo ocasionar uma redução na vida útil da máquina (ZAMBRA, 2010).

A tensão de modo comum (V_{no}) é calculada por (20) (ZAMBRA, 2010).

$$V_{no} = \frac{V_{an} + V_{bn} + V_{cn}}{3} \quad (20)$$

Estes índices foram analisados através da simulação de apenas um período da terceira e da quinta simulação. Os valores de THD , DFI e tensão de modo comum para as tensões de fase e tensões de linha da terceira simulação estão registrados na Tabela 20, e os da quinta simulação estão na Tabela 23. Através da análise dos valores obtidos, verifica-se que houve uma melhora em relação aos índices citados, uma vez que na maioria dos valores houve uma diminuição da terceira para a quinta simulação. Sendo assim, as substituições dos vetores de comutação referente a quinta simulação foi realizada com sucesso. No próximo subcapítulo há uma comparação desses índices, adquiridos na quinta simulação, com outras simulações que utilizaram diferentes métodos de modulação.

3.9. COMPARAÇÃO ENTRE A MODULAÇÃO SV NO INVERSOR PROPOSTO COM OUTRAS MODULAÇÕES

Este subcapítulo visa realizar uma comparação dos valores de THD , DFI e tensão de modo comum da modulação *space vector*, realizada nesta dissertação, com a modulação por síntese de formas de onda quase-quadradas (QQ) e a modulação híbrida, desenvolvida por Zambra (2010). Todas as modulações foram desenvolvidas para um inversor de nove níveis híbrido assimétrico em *CHB* com três células, sendo uma o dobro das outras.

A comparação tem como objetivo verificar se os valores da quinta simulação obtidos anteriormente (Tabela 23) são satisfatórios quando confrontados a outros métodos de modulação. Desta forma, os resultados obtidos em Zambra (2010) nas duas modulações citadas (QQ e híbrida) serão a base desta comparação.

Os valores iniciais utilizados em Zambra (2010) nas simulações realizadas para o inversor híbrido assimétrico de nove níveis foram os mesmos utilizados na modulação *SV* do inversor proposto neste trabalho, que foram: tensão base do barramento CC ($V_{cc} = 850$ V); tensão de linha ($V_{Lrms} = 4160$ V) e, conseqüentemente, tensão de fase ($V_{Frms} = 2400$ V) e; tensão de pico de fase ($V_{Fpico} = 3400$ V).

Os índices *THD*, *DFI* e tensão de modo comum gerados nas três simulações (da quinta simulação realizada neste trabalho e duas desenvolvidas por Zambra (2010)) estão expostas nas tabelas abaixo, sendo que na Tabela 24, há os valores de *THD* de tensão e *DFI* para as tensões de fase e de linha; e na Tabela 25 há os valores de tensão de modo comum.

Tabela 24 - Comparação entre os valores de *THD* e *DFI* entre a modulação *SV*, híbrida e quase quadrada para um inversor de nove níveis híbrido assimétrico

Tensão	Modulação <i>SV</i>		Modulação Híbrida		Modulação Quase Quadrada	
	<i>THD</i> de tensão (%)	<i>DFI</i> (%)	<i>THD</i> de tensão (%)	<i>DFI</i> (%)	<i>THD</i> de tensão (%)	<i>DFI</i> (%)
V_{an}	24,5098	4,2389	13,4700	0,0969	9,3300	0,5009
V_{bn}	23,3432	4,4350	13,4700	0,0969	9,3300	0,5009
V_{cn}	24,4866	4,5791	13,4700	0,0969	9,3300	0,5009
V_{ab}	8,5553	0,1905	8,0400	0,0527	12,4000	1,3500
V_{bc}	8,5553	0,1905	8,0400	0,0527	12,4000	1,3500
V_{ca}	8,6274	0,1772	8,0400	0,0527	12,4000	1,3500

Tabela 25 - Comparação entre os valores de tensão de modo comum entre a modulação *SV*, híbrida e quase quadrada para um inversor de nove níveis híbrido assimétrico

Modulação <i>SV</i>	Modulação Híbrida	Modulação Quase-Quadrada
Tensão de modo comum da fase (V)	Tensão de modo comum da fase (V)	Tensão de modo comum da fase (V)
0,6302	0,2886	0,2200

Com a análise dos valores das *THD* e *DFI* das tensões de fase na modulação *SV*, os resultados ficaram acima das outras duas modulações, sendo um resultado negativo. Estes parâmetros podem ser melhorados por meio de um outro processo de substituição dos vetores da sequência de comutação. Já os resultados de *THD* e *DFI* das tensões de linha foram satisfatórios, porque ficaram abaixo da modulação quase-quadrada e bem próximos da modulação híbrida. Em relação a tensão de modo comum de fase, na modulação *SV*, ficou acima das demais, em contrapartida é nula nas tensões de linha, conforme Tabela 23.

Percebe-se que os valores adquiridos na simulação da modulação *SV* para o inversor proposto, apesar de ter alguns valores acima das demais modulações (híbrida e quase-quadrada), estão condizentes com as outras duas simulações, validando assim todo o processo desenvolvido nesta dissertação. Estes índices podem ser melhorados se ocorrer mais substituições de vetores de cada setor, porém, para isso, uma análise computacional seria mais indicada, uma vez que este processo de substituição foi realizada de forma analítica, manual e para um específico valor de índice de modulação.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho explicou inicialmente a estrutura básica de um conversor de frequência, onde o foco principal foi direcionado para a conversão de tensão CC-CA. Também destacou-se que este é utilizado em acionamento de motores e controle de velocidade dos mesmos. Em seguida foram apresentadas diversas topologias de inversores de frequência e as estratégias de modulação para as mesmas. Através desta análise constatou-se que as topologias básicas de inversores multiníveis são utilizadas em sistemas de média tensão e cada uma delas possui suas características próprias. A topologia com ponto neutro grampeado (*NPC*), para os inversores de três e cinco níveis, tem como desvantagem possuir apenas uma combinação das chaves semicondutoras para gerar a tensão de saída. A topologia com capacitores flutuantes (*FC*) tem como vantagem uma maior flexibilidade no chaveamento dos dispositivos semicondutores devido ao número de chaveamentos redundantes, porém tem um elevado custo provocado pelo grande número de capacitores utilizados. A topologia com ponte-H em cascata (*CHB*) apresenta o menor número de componentes (diodos e capacitores) para gerar um mesmo número de níveis na tensão de saída, contudo necessita de fonte isolada para cada ponte-H. Há também as topologias multiníveis com módulos híbridos, que têm por característica reduzir o número de fontes isoladas, sendo essas simétricas ou assimétricas. A vantagem da topologia assimétrica é de poder atingir o mesmo número de níveis que a topologia simétrica, porém, com menos células ponte-H. Uma vez que a modulação *space vector* (*SV*) em uma topologia multinível híbrida assimétrica de nove níveis não foi constatada nas pesquisas realizadas na revisão bibliográfica, então esta foi selecionada para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo três todas as etapas da modulação *space vector* foram desenvolvidas para o inversor trifásico multinível híbrido assimétrico de nove níveis por fase com ponte-H em cascata. Os resultados gerados nas simulações via software de simulação matemática foram satisfatórios em relação as respostas dos sinais das tensões de fase, como das tensões de linha, uma vez que estes sinais ficaram muito similares a uma onda senoidal, que foi o propósito da otimização em relação a mudança na sequência de comutação. A validação do trabalho foi constatada através de seis simulações, sendo que a primeira demonstrou o funcionamento do inversor com um índice de modulação (m_a) variante no tempo; as outras duas simulações subsequentes foram realizadas para definir o valor do índice de modulação a ser utilizado, as quais a sequência de vetores de comutação foi feita de forma arbitrária, ou seja, sem analisar

os valores de tensão dos vetores de comutação. A quarta simulação teve como objetivo melhorar o sinal em relação ao nivelamento da tensão de fase V_{an} no nível +4. A quinta simulação foi realizada para melhorar os índices de THD , DFI e a redução da tensão de modo comum em relação à terceira simulação através da substituição dos vetores de comutação, como também fazer com que todos os sinais das tensões (de fase e de linha) ficassem de acordo com os dados e cálculos propostos. Para tanto, foi necessário analisar as tensões de cada vetor e desenvolver uma nova tabela da sequência de comutação para otimizar os resultados. Já a sexta simulação ocorreu para verificar a possibilidade de se atingir os valores dos sinais de tensão de linha, utilizando um valor menor de tensão base do barramento CC (V_{cc}).

Como conclusão dos resultados obtidos via software da quinta simulação foi constatado que a modulação *space vector* desenvolvida para o inversor multinível híbrido assimétrico de nove níveis proposto apresentou uma boa representação visual dos sinais das tensões de fase e tensões de linha através dos gráficos gerados, como também obteve valores das tensões similares aos dados e cálculos executados, verificados por meio dos espectros harmônicos das tensões (de fase e de linha). Em relação a comparação dos valores dos índices de THD , DFI , tensão de modo comum das tensões da terceira com a quinta simulação, foi possível verificar melhorias, indicando que através das substituições dos vetores de comutação, realizadas na quinta simulação, foi possível melhorar os índices mencionados. Por meio da comparação dos índices de THD , DFI , tensão de modo comum da quinta simulação com os valores adquiridos nas simulações realizadas para a mesma topologia do inversor com a modulação por síntese de formas de onda quase-quadradas (QQ) e a modulação híbrida, desenvolvida por Zambra (2010), foi comprovado que os resultados desta dissertação estão de acordo com as modulações utilizadas em inversores de frequência, validando o trabalho apresentado. Concluí-se também que foi possível mostrar que, mesmo utilizando menos de 0,28% das combinações possíveis que o inversor permite gerar, os resultados foram satisfatórios, identificando um potencial grandioso da modulação *SV* desenvolvida.

4.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste subcapítulo estão relacionadas algumas sugestões para os trabalhos futuros que envolvem esta dissertação.

Inicialmente, pode-se aprimorar o método de escolha dos vetores que formam a sequência de comutação para qualquer valor de índice de modulação “ m_a ”, sendo possível

selecionar automaticamente uma sequência de chaveamento que traga menos comutações na transição dos setores. Desta maneira, pode-se determinar a frequência de chaveamento de cada uma das chaves semicondutoras, minimizando o aquecimento sobre as chaves, visto que no processo utilizado nesta dissertação só pode-se identificar a frequência máxima de operação, assim como a análise e troca de vetores da sequência de comutação foram realizadas de forma manual para um específico valor de índice de modulação.

Sugere-se realizar simulações com valores de tensão base do barramento V_{cc} menores que os utilizados nas simulações desta dissertação, como também otimizar os resultados através das substituições dos vetores da sequência de comutação. Também, existe a possibilidade de se fazer um algoritmo que localize e sintetize o vetor de referência (V_{ref}), mesmo que este percorra fora do hexágono, uma vez que o algoritmo executado nesta dissertação não realiza esta operação.

Uma vez que um fator limitante para a comparação entre as estratégias de modulação ocorreu em adquirir trabalhos que relacionassem os valores de THD e DFI e tensão de modo comum para o inversor híbrido assimétrico de nove níveis e, que utilizassem os mesmos valores para as simulações, logo, recomenda-se realizar simulações com outros dados iniciais e comparar os resultados com outras estratégias de modulação além da modulação por síntese de formas de onda quase-quadradas (QQ) e a modulação híbrida.

Por fim, sugere-se realizar a implementação física do inversor proposto para análise dos resultados práticos com os resultados teóricos simulados, assim como compará-los com outros tipos de modulações. Desta maneira pode-se verificar a real eficiência da modulação *space vector*.

REFERENCIAS

ALVES, Thiago Berger Canuto. **Análise da força propulsora do motor de indução linear alimentado com imposição de corrente**. 2016. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

ANUJA, V.; ANANTH, B. J.; MARY, A. Three level voltage inverter using synchronized SVPWM and DSP. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS, AND OPTIMIZATION TECHNIQUES (ICEEOT), Chennai. 2016, p. 4748-4753.

BAHMAN, A. S.; BLAABJERG F. Comparison between 9-level Hybrid Asymmetric and Conventional Multi-Level Inverters for Medium Voltage Application. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE), Taipei. 2013.

BARBI, Ivo. **Teoria fundamental do motor de indução**. Florianópolis:Editora da UFSC/ELETRÓBRÁS, 1985.

BEIGI, L. M. A. et al. A New Multilevel Inverter Topology with Reduced Number of Power Switches. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY (PECON), Kota Kinabalu. 2012, p. 55-59.

BIABANI, M. A. K. A.; ALI, S. M. Control of Induction Motor Drive using Space Vector PWM. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS, AND OPTIMIZATION TECHNIQUES (ICEEOT), Chennai. 2016, p. 3344-3351.

BOOBALAN, S.; DHANASEKARAN, R. Hybrid Topology of Asymmetric Cascaded Multilevel Inverter with Renewable Energy Sources. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMMUNICATION CONTROL AND COMPUTING TECHNOLOGIES (ICACCCT), Ramanathapuram. 2014, p. 1046-1051.

BROADMEADOW, M. A. H.; WALKER, G. R.; BULMER, S. M. An FPGA-based, single transducer, active balancing scheme for a 5-level flying capacitor converter with 1 MHz effective switching frequency. In: IEEE 8th IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, MACHINES AND DRIVES (PEMD 2016), Glasgow. 2016.

BRÜCKNER, Thomas; BERNET, Steffen; GÜLDNER, Henry. The active NPC converter and its loss-balancing control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 52, n. 3, p. 855-868, june 2005.

CARNIELUTTI, Fernanda de Moraes. **Estratégias de modulação para conversores multiníveis em cascata sob faltas**. 2012. 136f. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

CARROLL, E., KLAKA, S., LINDER, S. Integrated Gate-Commutated Thyristors: A new approach to high power electronics. In: INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE (IEMDC), Milwaukee. 1997.

CASTRO, L. G. G. P. DE; CORRÊA, M. B. R. Modulação space vector rápida para eliminação da tensão de modo comum em inversores multiníveis. In: ANAIS DO XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA), Campina Grande. 2012, p. 1055-1060.

CHANDINI G S.; SHINY G.; BAIJU, M.R. Common-Mode Voltage Eliminated 2-level PWM Inverter Based on a Cascaded 3-level Inverter. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS, AND OPTIMIZATION TECHNIQUES (ICEEOT), Chennai. 2016, p. 561-566.

COLAK, I.; KABALCI, E.; KEVEN, G. Seven Level Asymmetric Cascade Inverter with Space Vector PWM Added PR Control. In: IEEE INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE (PEMC), Varna. 2016, p. 198-202.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **Manual de Eficiência Energética na Indústria**. 155f. 2005.

DOVAL-GANDOY, J. et al. Three Alternatives for Implementing Space Vector Modulation with The DSP TMS320F240. In: THE 25th ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON '99), San Jose. 1999, p. 336-341.

FILIPPO, Filho Guilherme, 1957. **Motor de indução**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2013.

GABE, Ivan Jorge. **Contribuição ao controle de inversores PWM alimentados em tensão conectados à rede através de filtro-LCL**. 2008. 131f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2008.

GIARETTA, Antonio Ricardo. **Análise de propostas de estratégias de controle para algumas topologias de multiconversores monofásicos**. 2009. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

GRIGOLETTO, Felipe Bovolini; PINHEIRO, Humberto. **Nova modulação vetorial para o controle da tensão do ponto central do divisor capacitivo do conversor com ponto neutro grampeado**. Revista Controle & Automação, v. 20, n. 3, p.439-453, jul./ago./set., 2009.

GUNASEKARI, R.; DHANALAKSHMI, R.; KISHORE RAJA, P. C. Power Flow Stability Improvement in Renewable Hybrid Power System using SVPWM Technique. In: IEEE BIENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY SYSTEMS:TOWARDS SUSTAINABLE ENERGY (PESTSE), Bangalore. 2016.

HEMALATHA, G.; KUMAR CHINNAIYAN, V. Performance analysis of permanent magnet synchronous motor using SVPWM technique. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN COMPUTING COMMUNICATION AND ELECTRICAL ENGINEERING (ICGCCEE), Coimbatore. 2014.

HOLMES, D. Grahame; LIPO, Thomas A. **Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice**. Wiley, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8LGi1AjSfpcC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 06 jan. 2017.

HU, Haibing; YAO, Wenxi; LU, Zhengyu. Design and Implementation of Three-Level Space Vector PWM IP Core for FPGAs. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 22, n. 6, p. 2234-2244, nov. 2007.

HYUN, S-W; HONG, S-J; WON, C-Y. A Compensation Method to reduce sampling delay of Zero Dead-time PWM using 3-Level NPC PWM Inverter. In: IEEE TRANSPORTATION ELECTRIFICATION CONFERENCE AND EXPO, ASIA - PACIFIC (ITEC), Busan. 2016, p. 465-469.

IEZZI, Gelson. **Fundamentos de matemática elementar, 3: trigonometria**. 9. ed. São Paulo, SP: Atual, 2013.

JOSHI, P. S.; SHETH, C. V. Modelling of Grid Tied 3-Level Diode Clamped Inverter Using Space Vector PWM For PV System. In: IEEE 5TH NIRMA UNIVERSITY INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING (NUICONE), Ahmedabad. 2015.

KANG, Feel-Soon et al. Multilevel PWM Inverters Suitable For The Use of Stand-Alone Photovoltaic Power Systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, n. 4, p. 906-915, dec. 2005.

KANG, F-S et al. New approach for cascaded-transformers-based multilevel inverter with an efficient switching function. In: THE 30th ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON 2004), Busan. 2004, p. 1805-1810.

KHARJULE S. Voltage Source Inverter. In: IEEE 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS AND APPLICATIONS (ICESA 2015), Pune. 2015, p.537-542.

LEE, S-J et al. Predictive Thermal Modeling for Loss Distribution Method of 3-Level Active NPC Inverter. In: IEEE INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS ENERGY CONFERENCE (INTELEC), Osaka. 2015.

MAHESHWARI, Ramkrishan et al., 2016. A Novel Approach to Generate Effective Carrier-Based Pulsewidth Modulation Strategies for Diode-Clamped Multilevel DC-AC Converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 11, p. 7243-7252, nov. 2016.

MERÇON, Alexandre Guimarães. **Filtros Ativos para Estações Conversoras de Corrente Contínua em Alta**. 2007. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2007.

MOCHIDATE, S.; MATSUO, K.; OBARA, H.; SATO, Y. A study on total loss reduction in motor drive systems based on flying capacitor multilevel inverter. In: IEEE 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS), Chiba. 2016.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3. ed. Wiley, 2002.

NETO, D. P. et al. Desempenho dos Medidores Monofásicos de Energia Elétrica dos Tipos Eletrônico e Indução. In: IEEE 9th IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), São Paulo. 2010.

NGUYEN, T. D.; TUONG, N.D. Carrier-based PWM Strategy for Post-fault Reconfigured 3-Level NPC Inverter under Imbalanced Dc-link Voltages. In: IEEE 8TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE (IPEMC-ECCE Asia), Hefei. 2016.

OH, J. S.; JIN, S-H; LEE, J-H. Fast space vector modulation without ntv identification for multilevel inverters. In: SECOND IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, Harbin. 2007, p. 2415-2420.

PEREIRA, Filho Nicolau. **Técnica de Modulação por Largura de Pulso Vetorial para Inversores Fonte de Tensão**. 2007. 235f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2007.

PETRUZELLA, Frank D. **Motores elétricos e acionamentos**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

PINHEIRO, Humberto et al. Modulação space vector para inversores alimentados em Tensão: uma abordagem unificada. **Sba Controle & Automação**, v.16 n. 1, jan./mar., 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592005000100002>. Acesso em: 16 jun. 2016.

PINHEIRO, H.; CAMARGO, ROBINSON F. DE. **Estudo da Teoria da Potência Instantânea**. Apostila didática da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

PINTO, Vinícius Maciel. **Um Estudo Comparativo de Técnicas de Chaveamento de Conversores Três Níveis**. 2005. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, 2005.

PINTO J. G. et al. Comparison of Current-Source and Voltage-Source Shunt Active Power Filters for Harmonic Compensation and Reactive Power Control. In: IEEE 38th ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON 2012), Montreal. 2012, p. 5161-5166.

RAO, S. N.; KUMAR, D.V. A.; BABU , C. S.. New Multilevel Inverter Topology with reduced number of Switches using Advanced Modulation Strategies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER, ENERGY AND CONTROL (ICPEC), Sri Rangalatchum Dindigul. 2013, p. 693-699.

RAMANI, K.; KRISHNAN, A. High Performance of Sinusoidal Pulse Width Modulation Based Flying Capacitor Multilevel Inverter fed induction Motor Drive. **2010 International Journal of Computer Applications**. v. 1, n. 24, p. 98-103, 2010.

RECH, Cassiano et al. Uma metodologia de Projeto Generalizada para Inversores Multiníveis Híbridos. **Revista Controle e Automação**, v. 15, n. 2, abr./maio/jun., 2004.

RODRIGUEZ, José; LAI, Jih-Sheng; PENG, Fang Zheng. Multilevel inverters: Survey of topologies, controls, and applications. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, v. 49, n. 4, p. 724-738, aug. 2002.

ROLIM, Matheus Eimael. **Análise da qualidade de energia elétrica: distorções harmônicas em uma planta industrial**. 2015. 58f. (Trabalho de conclusão de curso) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

RUSHIRAJ, J. G.; KAPIL, P.N. Analysis of Different Modulation Techniques for Multilevel Inverters. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS, AND OPTIMIZATION TECHNIQUES (ICEEOT), Delhi. 2016, p. 3017-3022.

SAEEDIFARD, M. et al. A fast and universal neuro-based svm algorithm for multi-level converters. In: TWENTY SECOND ANNUAL IEEE - APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 2007 (APEC 2007), Anaheim. 2007, p. 1508-1514.

SANZ, I. et al. Analysis of medium voltage modular multilevel converters for FACTS applications. In: 42nd ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON 2016), Florence. 2016, p. 6459-6464.

SILVA, Fernando José Giffoni da. **Estudo do chaveamento por vetores espaciais em modulação por largura de pulso em conversores multiníveis**. 2008. 130f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, 2008.

SOUZA, Joamir Roberto de. **Novo olhar matemática: 2**. 2. ed. São Paulo:FTD, 2103.

SUH, B-S et al. A. Multilevel Power Conversion – An overview of Topologies and Modulation Strategies. In: PROCEEDINGS OF THE 6th INTERNACIONAL CONFERENCE ON OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ELETRONIC EQUIPMENTS (OPTIM '98), Brasov. 1998, p. AD-11-AD-24.

RATHOR S. K. Hardware Realization of Space Vector-PWM 3-Level Inverter Using DSP with RTW. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS, AND OPTIMIZATION TECHNIQUES (ICEEOT), Chennai. 2016, p.3918-3921.

WANG, Zhiqiang et al. Novel Carrier-Based PWM Strategy With Zero-Sequence Voltage Injected for Three-Level NPC Inverter. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 4, n. 4, p. 1442-1451, dec. 2016.

WEG. **DT-6 Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão** – especificação, características e manutenção. 166f. 2015.

WINTERLE, Paulo. **Vetores e Geometria Analítica**. 1 ed. São Paulo:Makron Books, 2000.

ZAMBRA, Diorge Alex Bão. **Estudo e comparação de sistemas de acionamento multinível para aplicações de alta potência e média tensão**. 2010. 195f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.

APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DA MODULAÇÃO SPACE VECTOR (SV) EM UM INVERSOR DE DOIS NÍVEIS

O Apêndice A descreve os conceitos e a sequência de operações do desenvolvimento computacional da modulação *space vector* (SV) para um inversor de dois níveis. Sendo assim, este Apêndice serve como base para o capítulo três, detalhando os procedimentos e deduções da estratégia de modulação desenvolvida nesta dissertação.

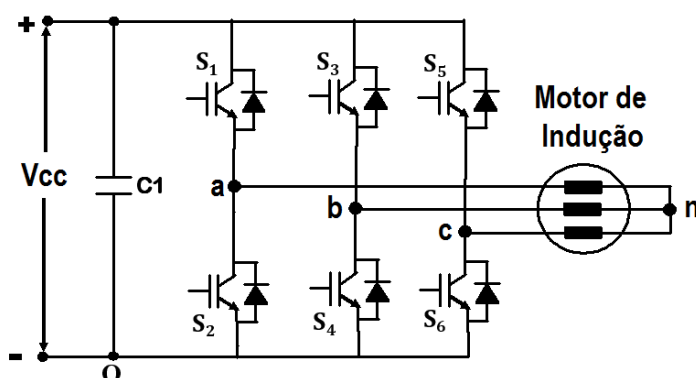
Pinheiro et al. (2005), esclarece que para o desenvolvimento da modulação *space vector* para um inversor de tensão, devem ser realizadas algumas etapas, como: a) definição dos possíveis vetores de comutação (estados de chaveamento) no espaço tridimensional e no plano α - β ; b) identificação dos planos limites e dos planos de separação dos setores do plano α - β ; c) obtenção das matrizes de decomposição; d) definição da sequência de comutação.

Para um melhor entendimento da modulação SV serão desenvolvidos todos os passos para um inversor de dois níveis (topologia trifásica mais simples presente na literatura).

A.1. DEFINIÇÃO DOS POSSÍVEIS VETORES DE COMUTAÇÃO (ESTADOS DE CHAVEAMENTO) DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS NO ESPAÇO TRIDIMENSIONAL

O inversor de dois níveis trifásico possui duas chaves semicondutoras por fase, conforme ilustrado na Figura 73, sendo o número de chaves por fase calculado por $[2.(w - 1)]$ (sendo “w” o número de níveis por fase) (PINHEIRO et al., 2005). Analisando apenas a fase “a”, pode-se observar que o número de possibilidades de chaveamento de S1 são duas (fechada “1” ou aberta “0”). Conseqüentemente, é possível gerar duas tensões na fase (+Vcc ou 0), conforme mostra a Tabela 26. A chave S2 deve operar de forma complementar a S1 para evitar curto-circuito no barramento CC. Logo, a fase “a” pode ser analisada apenas pela chave S1 (KHARJULE, 2015).

Figura 73 - Inversor de dois níveis trifásico a três fios



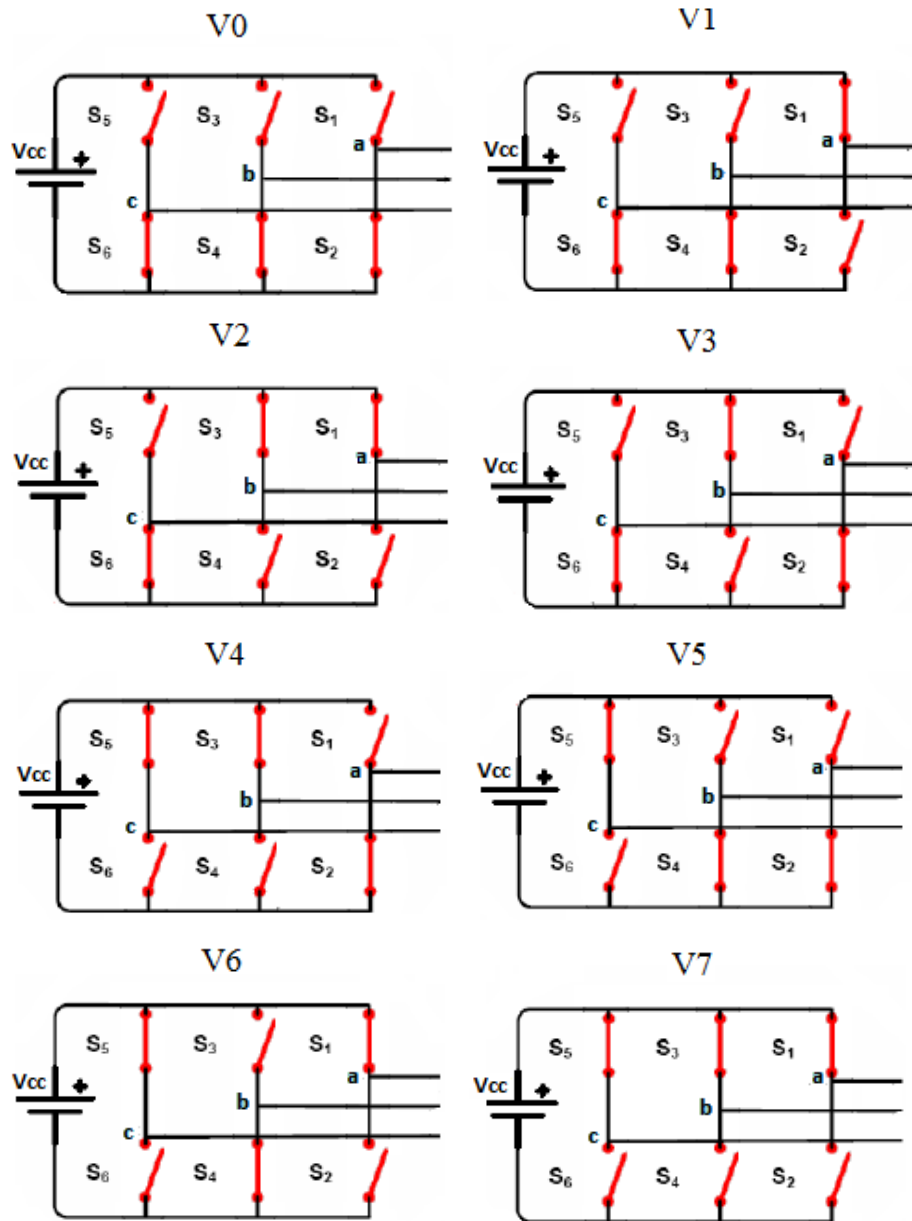
Fonte: CHANDINI; SHINY; BAIJU (2016).

Tabela 26 - Estados de chaveamento de uma fase do inversor de dois níveis

Chave S1	Tensão V_{an}
0	0
1	+Vcc

Considerando as três fases deste inversor, é possível gerar oito combinações diferentes de chaveamento (oito estados de comutação $\rightarrow 2^3 = 8$) (BIABANI; ALI, 2016; MAHESHWARI et al., 2016). Estas combinações são apresentadas na Figura 74, sendo que S1, S3 e S5 são as chaves superiores e S2, S4 e S6 as respectivas chaves complementares; ou seja, quando S1 está ligada, S2 deve estar desligada. O mesmo deve ocorrer com os pares (S3 e S4) e (S5 e S6) (BIABANI; ALI, 2016; PINHEIRO et al., 2005). Neste inversor, cada combinação gera um vetor de comutação diferente, nomeados de V0 a V7. Estes estados de chaveamento estão representados na Tabela 27, onde são exibidas as relações dos acionamentos das chaves superiores (S1, S3 e S5) com os oito vetores de comutação (BIABANI; ALI, 2016).

Figura 74 - Combinações de chaveamento de um inversor dois níveis



Fonte: Adaptado de SILVA (2008).

Tabela 27 - Estados de chaveamento de um inversor de dois níveis trifásico

Chave S1	Chave S3	Chave S5	Vetores de comutação
0	0	0	V0
1	0	0	V1
1	1	0	V2
0	1	0	V3
0	1	1	V4
0	0	1	V5
1	0	1	V6
1	1	1	V7

Fonte: BIABANI; ALI (2016).

Através da segunda Lei de Kirchhoff (Lei das malhas), é possível analisar as tensões de fase de entrada em relação ao ponto “n” (vide Figura 73), obtendo as equações em (21), onde “o” é a referência do barramento CC do inversor e “n” o ponto neutro (central da carga). (CHANDINI; SHINY; BAIJU, 2016; HOLMES; LIPO, 2003)

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_{ao} - V_{no} \\ V_{bn} &= V_{bo} - V_{no} \\ V_{cn} &= V_{co} - V_{no} \end{aligned} \quad (21)$$

A tensão no modo comum V_{no} , para cargas balanceadas, representa a média das tensões V_{ao} , V_{bo} , V_{co} . Desta forma, esta deve ser expressa por (22) (CHANDINI; SHINY; BAIJU, 2016; HOLMES; LIPO, 2003).

$$V_{no} = \frac{V_{ao} + V_{bo} + V_{co}}{3} \quad (22)$$

Substituindo (22) em (21), obtém-se as tensões de fase dadas por (23).

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_{ao} - \left(\frac{V_{ao} + V_{bo} + V_{co}}{3} \right) \\ V_{bn} &= V_{bo} - \left(\frac{V_{ao} + V_{bo} + V_{co}}{3} \right) \\ V_{cn} &= V_{co} - \left(\frac{V_{ao} + V_{bo} + V_{co}}{3} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

Manipulando matematicamente as equações em (23), se adquire (24).

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3} \cdot V_{ao} - \frac{1}{3} \cdot V_{bo} - \frac{1}{3} \cdot V_{co} \\ V_{bn} &= -\frac{1}{3} \cdot V_{ao} + \frac{2}{3} \cdot V_{bo} - \frac{1}{3} \cdot V_{co} \\ V_{cn} &= -\frac{1}{3} \cdot V_{ao} - \frac{1}{3} \cdot V_{bo} + \frac{2}{3} \cdot V_{co} \end{aligned} \quad (24)$$

Através das equações em (24), obtém-se a equação matricial (25).

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (25)$$

V_{ao} , V_{bo} e V_{co} são valores correspondentes às tensões de cada fase (de dois níveis), que depende do estado de chaveamento do inversor, conforme a Tabela 28.

Tabela 28 - Estados de chaveamento e tensões V_{ao} , V_{bo} e V_{co} de um inversor de dois níveis trifásico

Chave S1	Chave S3	Chave S5	V_{ao}	V_{bo}	V_{co}	Vetores de comutação
0	0	0	0	0	0	V0
1	0	0	Vcc	0	0	V1
1	1	0	Vcc	Vcc	0	V2
0	1	0	0	Vcc	0	V3
0	1	1	0	Vcc	Vcc	V4
0	0	1	0	0	Vcc	V5
1	0	1	Vcc	0	Vcc	V6
1	1	1	Vcc	Vcc	Vcc	V7

Substituindo os valores de V_{ao} , V_{bo} e V_{co} da Tabela 28 nas equações das tensões entre fase e neutro demonstradas em (24), é possível adquirir os valores das tensões V_{an} , V_{bn} e V_{cn} de cada vetor. A partir das equações em (26), pode-se determinar as tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} (SILVA, 2008; PINHEIRO et al., 2005). Os resultados das substituições dos valores V_{ao} , V_{bo} e V_{co} da Tabela 28 nas equações em (24) e (26) estão apresentados na Tabela 29.

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} &= V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} &= V_{co} - V_{ao} \end{aligned} \quad (26)$$

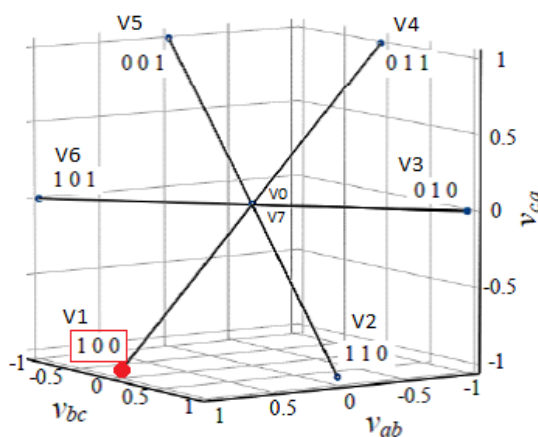
Tabela 29 - Estados de chaveamento e tensões de fase-neutro e fase-fase de um inversor de dois níveis trifásico

Chaves			Tensões fase-neutro			Tensões fase-fase			Vetores de comutação
S1	S3	S5	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	V0
1	0	0	$\frac{2 \cdot V_{cc}}{3}$	$-\frac{V_{cc}}{3}$	$-\frac{V_{cc}}{3}$	Vcc (1)	0	-Vcc (-1)	V1
1	1	0	$\frac{V_{cc}}{3}$	$\frac{V_{cc}}{3}$	$-\frac{2 \cdot V_{cc}}{3}$	0	Vcc (1)	-Vcc (-1)	V2
0	1	0	$-\frac{V_{cc}}{3}$	$\frac{2 \cdot V_{cc}}{3}$	$-\frac{V_{cc}}{3}$	-Vcc (-1)	Vcc (1)	0	V3
0	1	1	$-\frac{2 \cdot V_{cc}}{3}$	$\frac{V_{cc}}{3}$	$\frac{V_{cc}}{3}$	-Vcc (-1)	0	Vcc (1)	V4
0	0	1	$-\frac{V_{cc}}{3}$	$-\frac{V_{cc}}{3}$	$\frac{2 \cdot V_{cc}}{3}$	0	-Vcc (-1)	Vcc (1)	V5
1	0	1	$\frac{V_{cc}}{3}$	$-\frac{2 \cdot V_{cc}}{3}$	$\frac{V_{cc}}{3}$	Vcc (1)	-Vcc (-1)	0	V6
1	1	1	0	0	0	0	0	0	V7

Fonte: BIABANI; ALI (2016).

Conhecidas as tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} , é possível representar os oito vetores de comutação (V0, V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7) sobre um espaço tridimensional em coordenadas “abc” (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}), como ilustrado na Figura 75. O vetor V1 (em destaque), pela consulta à Tabela 29, possui a combinação 1, 0, 0 das respectivas chaves S1, S3 e S5, e possui as coordenadas $V_{ab} = 1$; $V_{bc} = 0$ e $V_{ca} = -1$.

Figura 75 - Combinações dos oito vetores de chaveamento do inversor de dois níveis trifásico em coordenadas “abc”



Fonte: Adaptado de PINHEIRO et al. (2005).

A.2. DEFINIÇÃO DOS POSSÍVEIS VETORES DE COMUTAÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS NO ESPAÇO BIDIMENSIONAL

Com o intuito de simplificar o processo de modulação, é possível representar os vetores de comutação em um plano de duas dimensões (plano α - β). Para tanto é preciso aplicar uma transformada linear ortogonal, transformando as grandezas do espaço “abc” para o sistema de coordenadas bidimensional α - β . Para esse processo, se utiliza a matriz de transformação de Clarke (BIABANI; ALI, 2016; COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016; PINHEIRO et al., 2005; RATHOR, 2016).

A.2.1 Obtenção da matriz de transformação

Em acionamentos, quando uma máquina trifásica CA é submetida a tensões de alimentação de um inversor de frequência, é gerado um fluxo girante no entreferro. Este fluxo pode ser representado por um vetor girante, o qual é utilizado no método *space vector* (SV) como sendo o vetor de referência (V_{ref}) (RATHOR, 2016; MAHESHWARI et al., 2016; SILVA, 2008). Este vetor girante, gerado em uma base tridimensional “abc” pelas tensões de alimentação, pode ser projetado em uma base bidimensional, conhecido como plano α - β . Para tanto, a nova base do plano deve ser ortogonal (PINHEIRO; CAMARGO, 2001). Os vetores da base no eixo α (X_α) e no eixo β (X_β) estão representados em (27). Uma dedução mais detalhada da formação desta base α - β está no Apêndice D.

$$X_\alpha = \left[1 \quad -\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2} \right]^T \quad X_\beta = \left[0 \quad \frac{\sqrt{3}}{2} \quad -\frac{\sqrt{3}}{2} \right]^T \quad (27)$$

Com os dois vetores (X_α , X_β) para formar o plano α - β , existe a necessidade de comprovar se eles são realmente ortogonais. Para tanto, o produto escalar tem que ser zero ($X_\alpha \cdot X_\beta = 0$) (PINHEIRO; CAMARGO, 2001).

Calculando o produto escalar através de (28).

$$X_\alpha \cdot X_\beta = (x'_\alpha \cdot x'_\beta) + (y'_\alpha \cdot y'_\beta) + (z'_\alpha \cdot z'_\beta) \quad (28)$$

Substituindo os valores de $X_\alpha = (1, -1/2, -1/2)$ e $X_\beta = (0, \sqrt{3}/2, -\sqrt{3}/2)$ em (28) resulta em (29), demonstrando que os vetores são ortogonais,

$$X_\alpha \cdot X_\beta = (1 \cdot 0) + \left(\left(-\frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \left(\left(-\frac{1}{2} \right) \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) = 0 \quad (29)$$

Assim, a representação dos vetores que compõem a nova base, na forma matricial, é dada pela matriz M_s (30), onde a primeira coluna indica o vetor X_α da base do plano α , β ; e a segunda coluna o vetor X_β da mesma base.

$$M_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Os vetores da base devem ser ortogonais e ortonormais, pois desta forma se garante que a potência associada à representação dos vetores de tensão e corrente em relação a uma nova base seja idêntica a potência real do sistema. Para que a nova base α - β seja ortonormal é preciso que seus vetores sejam normalizados, isto é, devem ser um vetor unitário que aponta no mesmo sentido do original (PINHEIRO; CAMARGO, 2001). Desta maneira, foi realizada a normalização dos vetores da base e formada a nova matriz de transformação.

Um vetor é normalizado conforme a expressão (31) (WINTERLE, 2000).

$$\text{Vetor normalizado} = \frac{\text{Vetor}}{||\text{Vetor}||} \quad (31)$$

Assim, deve-se normalizar os dois vetores da base, conforme a seguir.

Normalizando o vetor X_α se obtém o resultado em (32).

$$\widehat{X}_\alpha = \frac{X_\alpha}{||X_\alpha||} = \frac{(x'_\alpha, y'_\alpha, z'_\alpha)}{\sqrt{x'^2_\alpha + y'^2_\alpha + z'^2_\alpha}}$$

$$\begin{aligned}\widehat{X}_\alpha &= \frac{(1, -1/2, -1/2)}{\sqrt{1^2 + (-1/2)^2 + (-1/2)^2}} \\ \widehat{X}_\alpha &= \frac{(1, -1/2, -1/2)}{\sqrt{1 + 1/4 + 1/4}} = \frac{(1, -1/2, -1/2)}{\sqrt{3/2}} \\ \widehat{X}_\alpha &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3/2}} & -\frac{1/2}{\sqrt{3/2}} & -\frac{1/2}{\sqrt{3/2}} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (32)$$

Normalizando o vetor X_β se obtém o resultado em (33).

$$\begin{aligned}\widehat{X}_\beta &= \frac{X_\beta}{|X_\beta|} \\ \widehat{X}_\beta &= \frac{(0, \sqrt{3}/2, -\sqrt{3}/2)}{\sqrt{0^2 + (\sqrt{3}/2)^2 + (-\sqrt{3}/2)^2}} \\ \widehat{X}_\beta &= \frac{(0, \sqrt{3}/2, -\sqrt{3}/2)}{\sqrt{0 + 3/4 + 3/4}} = \frac{(0, \sqrt{3}/2, -\sqrt{3}/2)}{\sqrt{3/2}} \\ \widehat{X}_\beta &= \begin{bmatrix} \frac{0}{\sqrt{3/2}} & \frac{\sqrt{3}/2}{\sqrt{3/2}} & -\frac{\sqrt{3}/2}{\sqrt{3/2}} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (33)$$

Assim, a matriz M_s em (30), com os vetores normalizados, foi alterada conforme os resultados obtidos em (32) e (33), gerando assim uma nova matriz M_c (34), indicando o vetor X_α da base do plano α , β na primeira coluna; e o vetor X_β da mesma base na segunda coluna. Simplificando a matriz M_c em (34), retirando o termo em comum e desenvolvendo, chega-se em (35).

$$M_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3/2}} & \frac{0}{\sqrt{3/2}} \\ \frac{1/2}{\sqrt{3/2}} & \frac{\sqrt{3}/2}{\sqrt{3/2}} \\ -\frac{1/2}{\sqrt{3/2}} & -\frac{\sqrt{3}/2}{\sqrt{3/2}} \end{bmatrix}\quad (34)$$

Extraindo o termo em comum.

$$M_c = \frac{1}{\sqrt{3/2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

Reorganizando o termo $\frac{1}{\sqrt{3/2}} = \sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{\sqrt{6}}{3}$, obtém-se a forma matricial em (35).

$$M_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (35)$$

A transformação de coordenadas “abc” em α - β pode ser relacionada a matriz de transformação de mudança de base ($M_c^T = T_{\alpha\beta}$), conforme (36) (SILVA, 2008; PINHEIRO et al., 2005).

$$M_c^T = T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Através da matriz $T_{\alpha\beta}$ (36), é possível determinar a representação de um vetor que compõem uma base “abc” em uma nova base α - β . Assim, uma vez determinada a matriz de mudança de base, é possível identificar as coordenadas de qualquer vetor no plano, tanto de comutação como o vetor de referência (vetor girante).

Então, seguindo com a estratégia de modulação *SV*, primeiro, é necessário formar a região no plano em que o vetor de referência irá se localizar. Esta região é demarcada pelas projeções dos oito vetores de comutação (V0, V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7). Assim, cada vetor de comutação (vide Figura 75) deve ter sua representação no plano α - β , através da matriz de transformação.

Os cálculos dos vetores no referido plano são obtidos através do produto da matriz de transformação $T_{\alpha\beta}$ (36) com os níveis das tensões dos vetores (tensão de entrada do sistema de transformação) V_a , V_b e V_c . Neste caso do inversor de dois níveis, esses valores são adquiridos pelos estados das chaves semicondutoras S1, S3 e S5 da Tabela 27. Assim, a fórmula para calcular as coordenadas α - β para cada vetor é dada pela equação (37) (COLAK; KABALCI; KEVEN, 2016; RATHOR, 2016; PINTO et al., 2012).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (37)$$

Como demonstração, abaixo foram calculadas as coordenadas α , β do vetor 1 (V1), que possui, segundo a Tabela 27, o seguinte chaveamento S1=1 (V_a); S3=0 (V_b) e S5=0 (V_c).

Desta forma, aplicando os valores das chaves na equação (37), tem-se o desenvolvimento a seguir, resultando nas coordenadas (V_α) e (V_β) de V1 no plano α - β em (38).

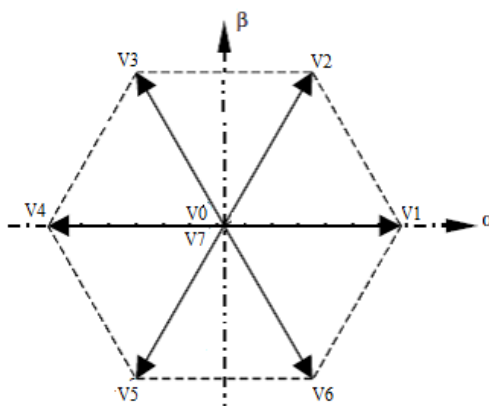
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V1_\alpha \\ V1_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V1_\alpha \\ V1_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} (1.1) + \left(-\frac{1}{2} \cdot 0\right) + \left(-\frac{1}{2} \cdot 0\right) \\ (0.1) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0\right) + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0\right) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V1_\alpha \\ V1_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} (1) + (0) + (0) \\ (0) + (0) + (0) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} \\ 0 \end{bmatrix} \\ v1 &= \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (38)$$

Aplicando o mesmo cálculo para os demais vetores de comutação (V0, V2, V3, V4, V5, V6 e V7) se encontra as coordenadas no plano α - β para cada um deles, conforme a Tabela 30.

Tabela 30 - Coordenadas dos vetores no plano α - β

Vetor	Coordenadas no plano α - β (V_α , V_β)
V0	(0, 0)
V1	$\left(\frac{\sqrt{6}}{3}, 0\right)$
V2	$\left(\frac{\sqrt{6}}{6}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$
V3	$\left(-\frac{\sqrt{6}}{6}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$
V4	$\left(-\frac{\sqrt{6}}{3}, 0\right)$
V5	$\left(-\frac{\sqrt{6}}{6}, -\frac{\sqrt{2}}{2}\right)$
V6	$\left(\frac{\sqrt{6}}{6}, -\frac{\sqrt{2}}{2}\right)$
V7	(0, 0)

Com estas coordenadas é possível adquirir as projeções dos oito vetores de comutação no plano α - β , conforme ilustra a Figura 76. É nesta região que o vetor V_{ref} irá girar.

Figura 76 - Projeção dos oito vetores de chaveamento do inversor dois níveis no plano α - β 

Este novo sistema de coordenadas (plano α - β) tem o formato de um hexágono, o qual, no caso do inversor de dois níveis, tem seis vetores não nulos com módulo igual a $\sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{\sqrt{6}}{3}$, onde a equação do módulo se dá por $|V| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$, e possuem um ângulo de 60° entre eles, formando os vértices do hexágono. No centro, há os outros dois vetores restantes com módulo igual a zero, como indicado na Figura 76 (PINHEIRO et al., 2005).

Para implementar o processo de busca do vetor V_{ref} dentro do hexágono, pela modulação *space vector*, deve-se dividir este diagrama hexagonal em setores (A, B, C, D, E e F) (SILVA, 2008; PINHEIRO et al., 2005). Para tal função, é realizada uma demarcação em que se precisa definir os planos limites (PL) e os planos de separação (PS) de cada setor. É importante determinar estes planos, pois através deles se encontra o setor exato em que o vetor de referência (V_{ref}) está (PINHEIRO et al., 2005). Sendo assim, conhecer estes planos é o próximo passo.

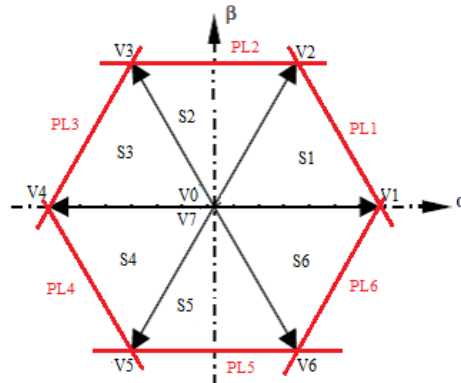
A.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS LIMITES DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS

Os planos limites (PL), conforme destacados na Figura 77, são os planos extremos que formam o hexágono, ou seja, formam as linhas que limitam a região aonde o vetor de referência (V_{ref}) vai estar.

Os planos limites (PL) são conhecidos através de dois pontos que estão contidos no plano α - β e, desta maneira, é possível identificá-los através da equação de uma reta. A identificação das equações destes planos é importante porque através da inserção das

coordenadas do vetor V_{ref} nas equações dos planos, pode-se saber se o vetor V_{ref} está sobre o plano, acima, ou abaixo dele; ou seja, dentro ou fora do hexágono.

Figura 77 - Planos limites (PL) do inversor de dois níveis



Para exemplificar a identificação das equações dos planos limites, o plano limite 1 (PL1), possui como pontos no hexágono os vetores V1 e V2 e, de acordo com a Tabela 30, estes possuem as coordenadas abaixo. Neste caso, estes vetores são os únicos pontos que pode-se gerar o plano de limite 1. Em inversores que possuem mais vetores de comutação, pode haver mais opções de pontos, como no caso do inversor de nove níveis proposto.

- Ponto 1 (vetor V1) = $(V1_{\alpha}, V1_{\beta}) = \left(\frac{\sqrt{6}}{3}, 0\right)$
- Ponto 2 (vetor V2) = $(V2_{\alpha}, V2_{\beta}) = \left(\frac{\sqrt{6}}{6}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$

Por meio da equação fundamental da reta representada em (2) e sua complementação em (3), calculando com os valores de V1 e V2, se obtém o plano limite PL1 (39). Para tanto, na equação da reta se considera: $V1_{\alpha} = x1$; $V1_{\beta} = y1$; $V2_{\alpha} = x2$ e $V2_{\beta} = y2$.

$$\text{PL1} \quad \therefore \quad V_{\beta} + \sqrt{3}.V_{\alpha} - \sqrt{2} = 0 \quad (39)$$

Aplicando o mesmo cálculo para os outros planos limites, se adquire os valores da Tabela 31.

Tabela 31 - Planos limites (PL) do inversor trifásico de dois níveis

PL	Equação do Plano limite (PL)
PL1	$V_{\beta} + \sqrt{3}.V_{\alpha} - \sqrt{2} = 0$
PL2	$V_{\beta} + \sqrt{2}/2 = 0$
PL3	$V_{\beta} - \sqrt{3}.V_{\alpha} - \sqrt{2} = 0$
PL4	$V_{\beta} + \sqrt{3}.V_{\alpha} + \sqrt{2} = 0$
PL5	$V_{\beta} + \sqrt{2}/2 = 0$
PL6	$V_{\beta} - \sqrt{3}.V_{\alpha} + \sqrt{2} = 0$

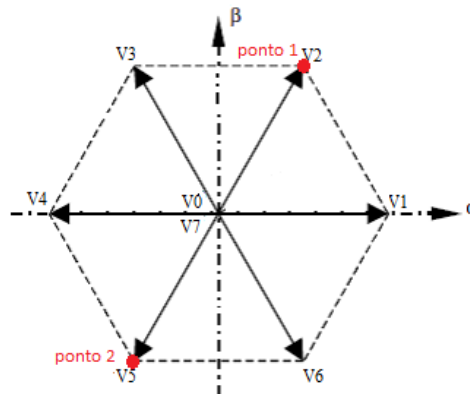
Fonte: PINHEIRO et al. (2005).

Uma vez identificados os planos limites, o passo seguinte é calcular os planos de separação do hexágono.

A.4. IDENTIFICAÇÃO DOS PLANOS DE SEPARAÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS

Os planos de separação (PS) são identificados de forma similar aos planos limites (PL), ou seja, através de dois pontos no plano α - β aplicados na equação da reta. Porém, para formar um plano de separação deve-se identificar dois pontos que formam uma reta que divide o interior do hexágono, como no caso dos pontos destacados na Figura 78, que formam o plano de separação 1 (PS1).

Figura 78 - Identificação dos dois pontos no plano de separação (PS1)



Então, o plano de separação (PS1) é calculado utilizando as coordenadas dos vetores V2 e V5, consultadas na Tabela 30, e aplicadas na equação da reta (2) e seu complemento (3), onde, nas referidas equações se considera: $V2_\alpha = x1$; $V2_\beta = y1$; $V5_\alpha = x2$ e $V5_\beta = y2$. O resultado do plano de separação 1 (PS1) está em (40).

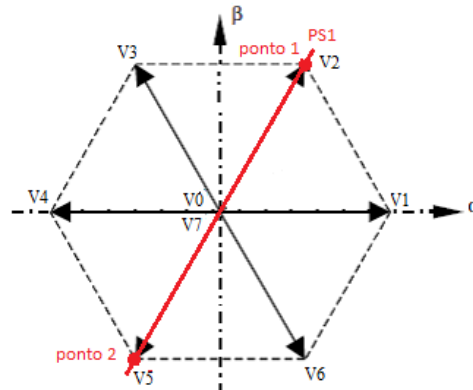
Os valores abaixo são as coordenadas do pontos no plano (PS1).

- Ponto 1 (vetor V2) = $(V2_\alpha, V2_\beta) = \left(\frac{\sqrt{6}}{6}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$
- Ponto 2 (vetor V5) = $(V5_\alpha, V5_\beta) = \left(-\frac{\sqrt{6}}{6}, -\frac{\sqrt{2}}{2}\right)$

$$\text{PS1} \quad \therefore \quad V_\beta - \sqrt{3} \cdot V_\alpha = 0 \quad (40)$$

O plano PS1 foi destacado na Figura 79.

Figura 79 - PS1 para o inversor de dois níveis



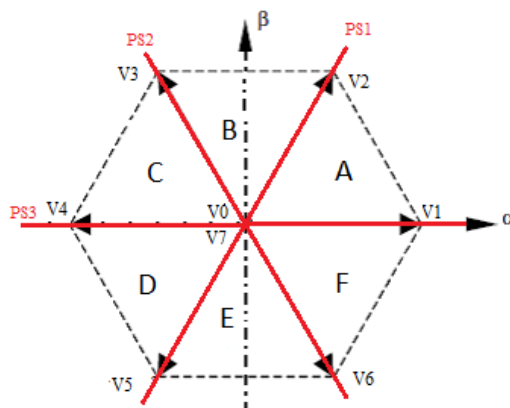
Aplicando o mesmo cálculo para os outros dois planos do hexágono, sendo um dos planos (PS2) formado pelos pontos dos vetores (V3 e V6), e o outro (PS3) formado pelos vetores V2 e V5, se obtém os valores da Tabela 32. Todos os planos podem ser representados conforme a Figura 80, separando o hexágono em seis setores (A, B, C, D, E e F).

Tabela 32 - Planos de separação (PS) para um inversor de dois níveis

PS	Equação do Plano de Separação (PS)
PS1	$V_{\beta} - \sqrt{3}.V_{\alpha} = 0$
PS2	$V_{\beta} + \sqrt{3}.V_{\alpha} = 0$
PS3	$V_{\beta} = 0$

Fonte: PINHEIRO et al. (2005).

Figura 80 - Planos de separação (PS) do inversor de dois níveis



A diferença entre os planos (de separação e limites) é que os planos de separação são utilizados para a identificação do setor onde o vetor de referência (V_{ref}) se encontra no hexágono; e os planos limites indicam se este vetor ultrapassa os limites do hexágono ou não, e conseqüentemente, determina se este poderá ou não ser utilizado pelo algoritmo do inversor. A lógica de localização do vetor de referência (V_{ref}) dentro do hexágono (plano α - β) ocorre

através de comparações entre os planos de separação e os planos limites até encontrar o triângulo (A, B, C, D, E ou F) ao qual V_{ref} está situado (PINHEIRO et al., 2005).

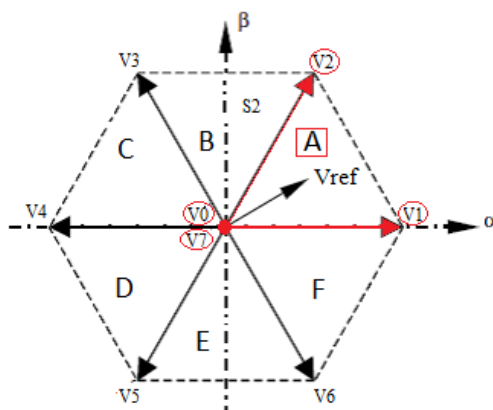
Como cada setor (triângulo) é formado pelos vetores de comutação, logo estes são utilizados para gerar a equação que forma o vetor de referência (V_{ref}). Identificados estes vetores, é importante determinar a sequência de comutação e os respectivos tempos de duração. Dependendo da localização do vetor de referência, pode haver mais de uma combinação possível entre os vetores de comutação, sendo, normalmente, escolhida a sequência que obtiver o número mínimo de mudanças nos interruptores do inversor (PINHEIRO et al., 2005).

Os tempos de duração das chaves semicondutoras associados a cada vetor são calculados através da matriz de decomposição desenvolvida para o setor em que o vetor V_{ref} está localizado (PINHEIRO et al., 2005). Sendo assim, cada setor terá uma matriz de decomposição associada a ela.

A.5. OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE DECOMPOSIÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS

Para obter a matriz de decomposição de um setor e, conseqüentemente, deduzir a equação que calcula os tempos da ativação de cada vetor, é necessário, primeriamente, conhecer as coordenadas (α , β) dos vetores de comutação que estão associados ao setor. Logo, se o vetor de referência estiver no setor A, conforme a Figura 81, os vetores de comutação envolvidos (que formam o triângulo) são: V_0 ou V_7 , V_1 e V_2 (PINHEIRO et al., 2005).

Figura 81 - Vetor V_{ref} no setor A do inversor trifásico de dois níveis



Fonte: Adaptado de PINHEIRO et al. (2005).

Identificados os vetores de comutação possíveis (V0 ou V7, V1 e V2) a serem utilizados para sintetizar o vetor de referência (V_{ref}), é necessário então, determinar os tempos de comutação (Δt_0 , Δt_1 e Δt_2) associados a cada vetor em um período T. Desta forma, para que a tensão média produzida pelo inversor em um período de comutação seja igual a V_{ref} , a seguinte equação (41) deve ser satisfeita (PINHEIRO et al., 2005). Esta equação (41) pode ser desenvolvida em (42), que indica que o valor do vetor de referência será composto pelo valor de tensão produzido pelo vetor V0, que permanecerá acionado por um tempo Δt_0 ; somado com o valor de tensão gerado pelo vetor V1, ativado pelo intervalo de tempo Δt_1 , e somado ao valor de V2, que será acionado pelo restante do tempo do período. O somatório dos tempos em que cada vetor ficará ativado será igual ao período de chaveamento do setor (T), conforme (43).

$$V_{ref} = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_{t_0}^{t_1} V0. dt + \int_{t_1}^{t_2} V1. dt + \int_{t_2}^T V2. dt \right] \quad (41)$$

$$V_{ref} \cdot T = V0 \cdot \Delta t_0 + V1 \cdot \Delta t_1 + V2 \cdot \Delta t_2 \quad (42)$$

$$\text{Onde: } T = \Delta t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (43)$$

As equações (42) e (43), desde que V0 e V1 sejam vetores não nulos, podem ser reescritas na forma matricial, indicada por (44) (PINHEIRO et al., 2005).

$$\begin{bmatrix} V_{ref} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T = \begin{bmatrix} V0 & V1 & V2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Como V_{ref} e os vetores possuem os componentes α e β , logo a equação (44) pode ser representada por (45).

$$\begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T = \begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Uma vez que os vetores de comutação V0, V1 e V2 formam vértices de um triângulo (não são colineares), então a matriz quadrada 3x3 da equação (45) possui determinante diferente de zero. Logo, com essas condições (a matriz ser quadrada e possuir determinante diferente de zero), a matriz 3x3 admite inversa. Portanto, para isolar a matriz, cujos elementos são Δt_0 , Δt_1 e Δt_2 , da equação (45), é necessário multiplicar pela matriz inversa nos dois lados da igualdade, conforme (46) (SOUZA, 2013).

$$\begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T = \begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} \quad (46)$$

Visto que se trata de uma matriz quadrada com determinante diferente de zero, então é possível aplicar a propriedade das matrizes: $A_m^{-1} \cdot A_m = I$, onde “ A_m^{-1} ” é a matriz inversa da matriz A_m ; “ A_m ” é a matriz quadrada com determinante diferente de zero e; “ I ” é a matriz identidade (SOUZA, 2013). Sendo assim é possível simplificar (46), obtendo (47).

$$\begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T = I \cdot \begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Por fim, para se conseguir isolar a matriz dos tempos Δt_0 , Δt_1 e Δt_2 em (47), é possível aplicar a propriedade refere à multiplicação de uma matriz identidade por uma matriz qualquer (“ A_n ”), resultando na própria matriz, desde que sejam respeitadas as restrições da multiplicação das matrizes relacionadas aos números de linhas e colunas. Nesse caso, tem-se: $I_{3 \times 3} \cdot A_{n \times 3} = A_{n \times 3}$ (SOUZA, 2013). Assim, é possível deduzir a equação que calcula os tempos de ativação de cada vetor do setor, conforme (48).

$$\begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T = \begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} \therefore \begin{bmatrix} \Delta t_0 \\ \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T \quad (48)$$

Então, a matriz de decomposição do setor A (M_A) é igual a (49).

$$M_A = \begin{bmatrix} V0_\alpha & V1_\alpha & V2_\alpha \\ V0_\beta & V1_\beta & V2_\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (49)$$

Os tempos de duração para os demais setores são calculados de forma semelhante, ou seja, com base na matriz de decomposição associada para o setor e nos componentes do vetor de referência (PINHEIRO et al., 2005).

Portanto, as matrizes de decomposição possibilitam obter o tempo de comutação que cada vetor do triângulo deve permanecer ativo em um período T, e, consequentemente, os tempos de duração das chaves semicondutoras associados a cada vetor (PINHEIRO et al., 2005).

A.6. DEFINIÇÃO DA SEQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO DO INVERSOR DE DOIS NÍVEIS

Há várias sequências de comutação possíveis dos vetores associados aos seus setores, onde cada uma delas gera diferentes resultados em relação às perdas de comutação, valores de *THD* e, para alguns inversores, como no *NPC*, desbalanceamento do ponto neutro do barramento CC. Comutações em baixa frequência, por exemplo, resultam em baixas perdas de comutação. Na estratégia de modulação *SV*, normalmente a escolha da sequência de vetores a ser implementada é aquela que utiliza os vetores mais próximos do V_{ref} , pois assim as ondulações sobre as variáveis de interesse são menores (PINHEIRO et al., 2005).

Conforme Grigoletto e Pinheiro (2009), devido à modulação vetorial possibilitar a utilização de diferentes possibilidades de comutação, podem ser consideradas para a escolha de uma sequência de chaveamento os seguintes requisitos:

- 1 - Taxa de distorção harmônica da tensão de saída (*THD*);
- 2 - Número de comutações;
- 3 - Simplicidade de implementação.

Os requisitos que cada autor, que desenvolve modulação *SV*, irá satisfazer depende dos objetivos e da necessidade do projeto do inversor. O intuito da combinação dos vetores de chaveamento é sintetizar o vetor girante de referência (V_{ref}) e, para tanto, é necessário selecionar uma sequência de chaveamento dos vetores que compõe o setor. Dependendo dos vetores selecionados, os níveis das tensões de saída irão se alterar (PINTO, 2005; DOVAL-GANDOY et al., 1999).

APÊNDICE B – IDENTIFICAÇÃO DO SETOR E SUBSTITUIÇÃO DA SEQUÊNCIA DOS VETORES DO SETOR

Este Apêndice B visa ilustrar o impacto provocado pela substituição de apenas um dos vetores de comutação onde há nivelamento na amplitude do sinal V_{an} em +4 (vide Figura 55). Sendo assim, a proposta deste Apêndice é, através da região do nivelamento (+4) de V_{an} , encontrar um setor qualquer e, a partir deste, que possui três vetores de comutação, substituir apenas um deles. Após a substituição, realizar uma simulação para verificar a mesma região do nivelamento para analisar o impacto da mudança dos vetores. Deste modo, na Figura 82, está destacada em vermelho uma região em que ocorre o nivelamento, assim como um ponto específico desta região (tempo de 0,001984 segundos). Com o tempo escolhido, foi possível identificar o setor 48, por meio do gráfico gerado conforme a Figura 83, que relaciona o tempo com o setor ao qual o vetor de referência se encontra.

Figura 82 - Zoom da tensão de fase V_{an} do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 indicando o nivelamento do sinal em +4 no tempo igual a 0,001984

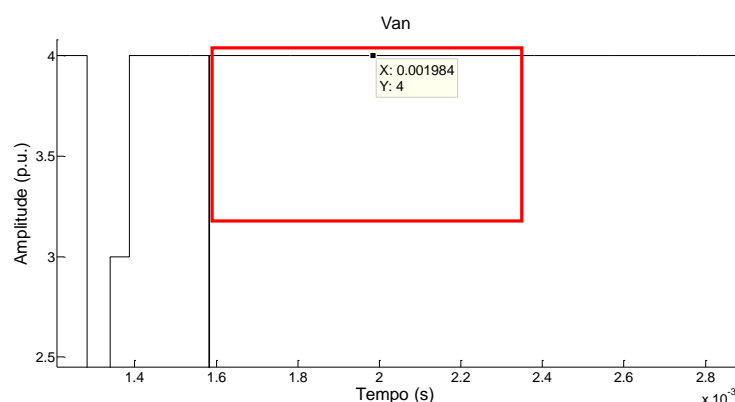
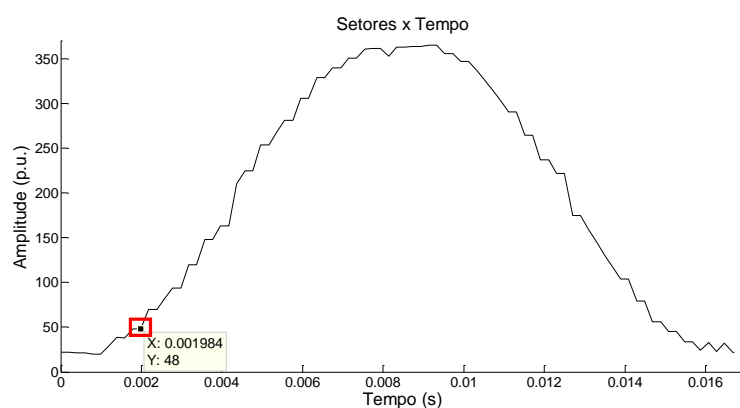


Figura 83 - Zoom do gráfico de identificação dos setores destacando o setor 48 do inversor de nove níveis proposto com “ m_a ” = 1 no tempo igual a 0,001984



Conhecido o setor, foram analisados os valores dos níveis de cada um dos três vetores que compunham o setor 48. Através da consulta das Tabela 16 e Tabela 18 foi possível adquirir vários dados do setor 48, entre eles: os vetores de chaveamento V26, V16 e V17; os seus respectivos pontos do hexágono d2, d3 e c2; e os níveis de tensão de cada vetor em cada fase. Estes valores foram registrados na Tabela 33. Percebe-se que na tensão V_{an} em destaque, os três vetores estão com o valor +4 ($N1 = +4$). Desta forma, procurou-se trocar um dos vetores por outro que tivesse valor $N2 = +3$ em V_{an} .

Tabela 33- Dados do setor 48 sem alteração do vetor de comutação

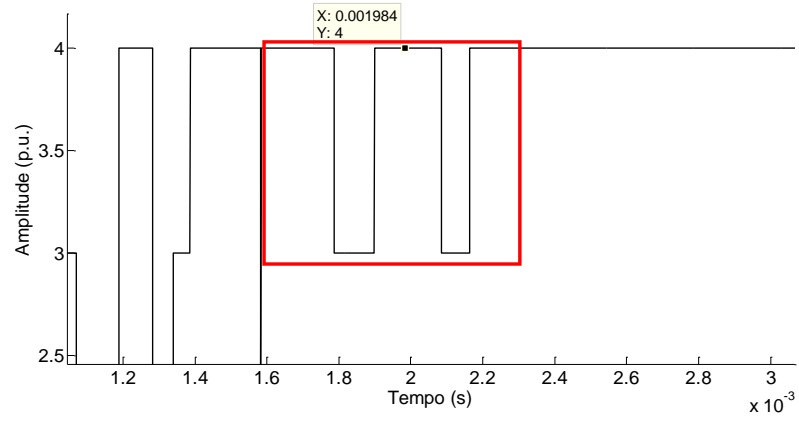
	Vetor	Ponto no hexágono	Vetor	Ponto no hexágono	Vetor	Ponto no hexágono
	V26	d2	V16	d3	V17	c2
	Nível do Vetor		Nível do Vetor		Nível do Vetor	
V_{an}	N1 = +4		N1 = +4		N1 = +4	
V_{bn}	N3 = +2		N2 = +3		N2 = +3	
V_{cn}	N8 = -3		N7 = -2		N7 = -2	

Para realizar a troca, foi desenvolvida a Tabela 35 do Apêndice C, a qual mostra os pontos do hexágono, os vetores redundantes associados a cada ponto e os valores dos níveis dos vetores em cada uma das tensões de fase. Sendo assim, através da Tabela 35, percebe-se que, para o ponto e2, além do vetor V16, também podem ser escolhidos os vetores V107 e V198. Porém as tensões em cada um deles são diferentes, $V_{an} = +3$ e $V_{an} = -2$, respectivamente. Desta maneira, foi escolhido o vetor V107 para substituir V16. Como o objetivo é fazer com que o sinal em V_{an} oscile entre os níveis +4 e +3, então os outros vetores V26 e V17 do setor não foram substituídos. A nova tabela dos dados do setor 48, após a troca de V16 por V107, está representada na Tabela 34.

Tabela 34 - Dados do setor 48 com alteração do vetor de comutação

	Vetor	Ponto no hexágono	Vetor	Ponto no hexágono	Vetor	Ponto no hexágono
	V26	d2	V107	d3	V17	c2
	Nível do Vetor		Nível do Vetor		Nível do Vetor	
V_{an}	N1 = +4		N2 = +3		N1 = +4	
V_{bn}	N3 = +2		N3 = +2		N2 = +3	
V_{cn}	N8 = -3		N8 = -3		N7 = -2	

Após a simulação, registrada na Figura 84, com a nova sequência de comutação do setor 48 (Tabela 34), verificou-se que próximo ao tempo de 0,001984, que antes tinha apenas o valor de +4 (Figura 82), agora tem uma troca de valores de +4 e +3, melhorando o sinal de V_{an} .

Figura 84 - Zoom do gráfico V_{an} indicando alteração de nível no tempo próximo a 0,001984

APÊNDICE C – TABELA QUE IDENTIFICA QUAIS VETORES PODEM SER UTILIZADOS EM CADA PONTO NO PLANO α - β

Através da Tabela 12, que identifica os vetores redundantes em cada ponto no plano α - β ; e da Tabela 10, que mostra os níveis que cada vetor gera, foi feita esta Tabela 35 com os 217 pontos do hexágono referente a Figura 30.

Tabela 35 - Lista os 217 pontos do hexágono e todos os vetores redundantes em cada ponto, além de mostrar o nível de tensão de cada vetor em cada uma das fases

Nº	Ponto no plano α - β	Vetor	Nível fase 1	Nível fase 2	Nível fase 3
1	a1	V9	N1=4	N1=4	N9=-4
2	a2	V90	N2=3	N1=4	N9=-4
3	a3	V171	N3=2	N1=4	N9=-4
4	a4	V252	N4=1	N1=4	N9=-4
5	a5	V333	N5=0	N1=4	N9=-4
6	a6	V414	N6=-1	N1=4	N9=-4
7	a7	V495	N7=-2	N1=4	N9=-4
8	a8	V576	N8=-3	N1=4	N9=-4
9	a9	V657	N9=-4	N1=4	N9=-4
10	b1	V18	N1=4	N2=3	N9=-4
11	b10	V656	N9=-4	N1=4	N8=-3
12	c1	V27	N1=4	N3=2	N9=-4
13	c11	V655	N9=-4	N1=4	N7=-2
14	d1	V36	N1=4	N4=1	N9=-4
15	d12	V654	N9=-4	N1=4	N6=-1
16	e1	V45	N1=4	N5=0	N9=-4
17	e13	V653	N9=-4	N1=4	N5=0
18	f1	V54	N1=4	N6=-1	N9=-4
19	f14	V652	N9=-4	N1=4	N4=1
20	g1	V63	N1=4	N7=-2	N3=2
21	g15	V651	N9=-4	N1=4	N3=2
22	h1	V72	N1=4	N8=-3	N9=-4
23	h16	V650	N9=-4	N1=4	N2=3
24	i1	V81	N1=4	N9=-4	N9=-4

Cada ponto possui apenas um chaveamento (1 vetor)

Nº	Ponto no plano α - β	Vetor	Nível fase 1	Nível fase 2	Nível fase 3
157	e5	V5	N1=4	N1=4	N5=0
		V278	N4=1	N4=1	N8=-3
		V96	N2=3	N2=3	N6=-1
		V369	N5=0	N5=0	N9=-4
158	e6	V187	N3=2	N3=2	N7=-2
		V268	N4=1	N3=2	N7=-2
		V86	N2=3	N1=4	N5=0
		V359	N5=0	N4=1	N8=-3
159	e7	V177	N3=2	N2=3	N6=-1
		V450	N6=-1	N5=0	N9=-4
		V258	N4=1	N2=3	N6=-1
		V531	N7=-2	N5=0	N9=-4
160	e8	V349	N5=0	N3=2	N7=-2
		V167	N3=2	N1=4	N5=0
		V440	N6=-1	N4=1	N8=-3
		V248	N4=1	N1=4	N5=0
161	e9	V521	N7=-2	N4=1	N8=-3
		V339	N5=0	N2=3	N6=-1
		V612	N8=-3	N5=0	N9=-4
		V430	N6=-1	N3=2	N7=-2
161	e9	V511	N7=-2	N3=2	N7=-2
		V329	N5=0	N1=4	N5=0
		V602	N8=-3	N4=1	N8=-3
		V420	N6=-1	N2=3	N6=-1

Cada ponto possui cinco possibilidade de chaveamento (5 vetores)

25	i17	V649	N9=-4	N1=4	N1=4	Cada ponto possui apenas um chaveamento (1 vetor)			V693	N9=-4	N5=0	N9=-4	Cada ponto possui cinco possibilidade de chaveamento (5 vetores)
26	j1	V80	N1=4	N9=-4	N8=-3		162	f5	V14	N1=4	N2=3	N5=0	
27	j16	V658	N9=-4	N2=3	N1=4		V287	N4=1	N5=0	N8=-3			
28	k1	V79	N1=4	N9=-4	N7=-2		V105	N2=3	N3=2	N6=-1			
29	k15	V667	N9=-4	N3=2	N1=4		V378	N5=0	N6=-1	N9=-4			
30	l1	V78	N1=4	N9=-4	N6=-1		V196	N3=2	N4=1	N7=-2			
31	l14	V676	N9=-4	N4=1	N1=4		163	f10	V510	N7=-2	N3=2	N6=-1	
32	m1	V77	N1=4	N9=-4	N5=0				V328	N5=0	N1=4	N4=1	
33	m13	V685	N9=-4	N5=0	N1=4				V601	N8=-3	N4=1	N7=-2	
34	n1	V76	N1=4	N9=-4	N4=1				V419	N6=-1	N2=3	N5=0	
35	n12	V694	N9=-4	N6=-1	N1=4		V692	N9=-4	N5=0	N8=-3			
36	o1	V75	N1=4	N9=-4	N3=2		164	g5	V23	N1=4	N3=2	N5=0	
37	o11	V703	N9=-4	N7=-2	N1=4				V296	N4=1	N6=-1	N8=-3	
38	p1	V74	N1=4	N9=-4	N2=3				V114	N2=3	N4=1	N6=-1	
39	p10	V712	N9=-4	N8=-3	N1=4				V387	N5=0	N7=-2	N9=-4	
40	q1	V73	N1=4	N9=-4	N1=4		165	g11	V205	N3=2	N5=0	N7=-2	
41	q2	V154	N2=3	N9=-4	N1=4				V509	N7=-2	N3=2	N5=0	
42	q3	V235	N3=2	N9=-4	N1=4				V327	N5=0	N1=4	N3=2	
43	q4	V316	N4=1	N9=-4	N1=4				V600	N8=-3	N4=1	N6=-1	
44	q5	V397	N5=0	N9=-4	N1=4		166	h5	V418	N6=-1	N2=3	N4=1	
45	q6	V478	N6=-1	N9=-4	N1=4				V691	N9=-4	N5=0	N7=-2	
46	q7	V559	N7=-2	N9=-4	N1=4				V32	N1=4	N4=1	N5=0	
47	q8	V640	N8=-3	N9=-4	N1=4				V305	N4=1	N7=-2	N8=-3	
48	q9	V721	N9=-4	N9=-4	N1=4		167	h12	V123	N2=3	N5=0	N6=-1	
49	b2	V8	N1=4	N1=4	N8=-3				V396	N5=0	N8=-3	N9=-4	
		V99	N2=3	N2=3	N9=-4				V214	N3=2	N6=-1	N7=-2	
50	b3	V89	N2=3	N1=4	N8=-3				168	i5	V508	N7=-2	
		V180	N3=2	N2=3	N9=-4		V326	N5=0			N1=4	N2=3	
51	b4	V261	N4=1	N2=3	N9=-4		V599	N8=-3			N4=1	N5=0	
		V170	N3=2	N1=4	N8=-3		V417	N6=-1			N2=3	N3=2	
52	b5	V251	N4=1	N1=4	N8=-3		V690	N9=-4	N5=0	N6=-1			
		V342	N5=0	N2=3	N9=-4		V41	N1=4	N5=0	N5=0			
53	b6	V332	N5=0	N1=4	N8=-3		V314	N4=1	N8=-3	N8=-3			
		V423	N6=-1	N2=3	N9=-4		V132	N2=3	N6=-1	N6=-1			
54	b7	V504	N7=-2	N2=3	N9=-4		V405	N5=0	N9=-4	N9=-4			
		V413	N6=-1	N1=4	N8=-3		V223	N3=2	N7=-2	N7=-2			
55	b8	V494	N7=-2	N1=4	N8=-3		169	i13	V507	N7=-2	N3=2	N3=2	
		V585	N8=-3	N2=3	N9=-4				V325	N5=0	N1=4	N1=4	
56	b9	V575	N8=-3	N1=4	N8=-3				V598	N8=-3	N4=1	N4=1	
		V666	N9=-4	N2=3	N9=-4				V416	N6=-1	N2=3	N2=3	

57	c2	V17	N1=4	N2=3	N8=-3
		V108	N2=3	N3=2	N9=-4
58	c10	V574	N8=-3	N1=4	N7=-2
		V665	N9=-4	N2=3	N8=-3
59	d2	V26	N1=4	N3=2	N8=-3
		V117	N2=3	N4=1	N9=-4
60	d11	V573	N8=-3	N1=4	N6=-1
		V664	N9=-4	N2=3	N7=-2
61	e2	V35	N1=4	N4=1	N8=-3
		V126	N2=3	N5=0	N9=-4
62	e12	V572	N8=-3	N1=4	N5=0
		V663	N9=-4	N2=3	N6=-1
63	f2	V44	N1=4	N5=0	N8=-3
		V135	N2=3	N6=-1	N9=-4
64	f13	V571	N8=-3	N1=4	N4=1
		V662	N9=-4	N2=3	N5=0
65	g2	V53	N1=4	N6=-1	N8=-3
		V144	N2=3	N7=-2	N9=-4
66	g14	V570	N8=-3	N1=4	N3=2
		V661	N9=-4	N2=3	N4=1
67	h2	V62	N1=4	N7=-2	N8=-3
		V153	N2=3	N8=-3	N9=-4
68	h15	V569	N8=-3	N1=4	N2=3
		V660	N9=-4	N2=3	N3=2
69	i2	V71	N1=4	N8=-3	N8=-3
		V162	N2=3	N9=-4	N9=-4
70	i16	V568	N8=-3	N1=4	N1=4
		V659	N9=-4	N2=3	N2=3
71	j2	V70	N1=4	N8=-3	N7=-2
		V161	N2=3	N9=-4	N8=-3
72	j15	V577	N8=-3	N2=3	N1=4
		V668	N9=-4	N3=2	N2=3
73	k2	V69	N1=4	N8=-3	N6=-1
		V160	N2=3	N9=-4	N7=-2
74	k14	V586	N8=-3	N3=2	N1=4
		V677	N9=-4	N4=1	N2=3
75	l2	V68	N1=4	N8=-3	N5=0
		V159	N2=3	N9=-4	N6=-1
76	l13	V595	N8=-3	N4=1	N1=4
		V686	N9=-4	N5=0	N2=3

Cada ponto possui duas
possibilidade de chaveamento
(2 vetores)

170	j5	V689	N9=-4	N5=0	N5=0
		V40	N1=4	N5=0	N4=1
		V313	N4=1	N8=-3	N7=-2
		V131	N2=3	N6=-1	N5=0
171	j12	V404	N5=0	N9=-4	N8=-3
		V222	N3=2	N7=-2	N6=-1
		V516	N7=-2	N4=1	N3=2
		V334	N5=0	N2=3	N1=4
172	k5	V607	N8=-3	N5=0	N4=1
		V425	N6=-1	N3=2	N2=3
		V698	N9=-4	N6=-1	N5=0
		V39	N1=4	N5=0	N3=2
173	k11	V312	N4=1	N8=-3	N6=-1
		V130	N2=3	N6=-1	N4=1
		V403	N5=0	N9=-4	N7=-2
		V221	N3=2	N7=-2	N5=0
174	15	V525	N7=-2	N5=0	N3=2
		V343	N5=0	N3=2	N1=4
		V616	N8=-3	N6=-1	N4=1
		V434	N6=-1	N4=1	N2=3
175	110	V707	N9=-4	N7=-2	N5=0
		V38	N1=4	N5=0	N2=3
		V311	N4=1	N8=-3	N5=0
		V129	N2=3	N6=-1	N3=2
176	m5	V402	N5=0	N9=-4	N6=-1
		V220	N3=2	N7=-2	N4=1
		V534	N7=-2	N6=-1	N3=2
		V352	N5=0	N4=1	N1=4
177	m6	V625	N8=-3	N7=-2	N4=1
		V443	N6=-1	N5=0	N2=3
		V716	N9=-4	N8=-3	N5=0
		V37	N1=4	N5=0	N1=4
		V310	N4=1	N8=-3	N4=1
		V128	N2=3	N6=-1	N2=3
		V401	N5=0	N9=-4	N5=0
		V219	N3=2	N7=-2	N3=2
		V300	N4=1	N7=-2	N3=2
		V118	N2=3	N5=0	N1=4
		V391	N5=0	N8=-3	N4=1
		V209	N3=2	N6=-1	N2=3

Cada ponto possui cinco
possibilidade de chaveamento
(5 vetores)

95	c7	V513	N7=-2	N3=2	N9=-4
		V331	N5=0	N1=4	N7=-2
		V422	N6=-1	N2=3	N8=-3
96	c8	V503	N7=-2	N2=3	N8=-3
		V594	N8=-3	N3=2	N9=-4
		V412	N6=-1	N1=4	N7=-2
97	c9	V493	N7=-2	N1=4	N7=-2
		V584	N8=-3	N2=3	N8=-3
		V675	N9=-4	N3=2	N9=-4
98	d3	V16	N1=4	N2=3	N7=-2
		V107	N2=3	N3=2	N8=-3
		V198	N3=2	N4=1	N9=-4
99	d10	V492	N7=-2	N1=4	N6=-1
		V583	N8=-3	N2=3	N7=-2
		V674	N9=-4	N3=2	N8=-3
100	e3	V25	N1=4	N3=2	N7=-2
		V116	N2=3	N4=1	N8=-3
		V207	N3=2	N5=0	N9=-4
101	e11	V491	N7=-2	N1=4	N5=0
		V582	N8=-3	N2=3	N6=-1
		V673	N9=-4	N3=2	N7=-2
102	f3	V34	N1=4	N4=1	N7=-2
		V125	N2=3	N5=0	N8=-3
		V216	N3=2	N6=-1	N9=-4
103	f12	V490	N7=-2	N1=4	N4=1
		V581	N8=-3	N2=3	N5=0
		V672	N9=-4	N3=2	N6=-1
104	g3	V43	N1=4	N5=0	N7=-2
		V134	N2=3	N6=-1	N8=-3
		V225	N3=2	N7=-2	N9=-4
105	g13	V489	N7=-2	N1=4	N3=2
		V580	N8=-3	N2=3	N4=1
		V671	N9=-4	N3=2	N5=0
106	h3	V52	N1=4	N6=-1	N7=-2
		V143	N2=3	N7=-2	N8=-3
		V234	N3=2	N8=-3	N9=-4
107	h14	V488	N7=-2	N1=4	N2=3
		V579	N8=-3	N2=3	N3=2
		V670	N9=-4	N3=2	N4=1
108	i3	V61	N1=4	N7=-2	N7=-2

Cada ponto possui três possibilidade de chaveamento (3 vetores)

185	g6	V13	N1=4	N2=3	N4=1
		V286	N4=1	N5=0	N7=-2
		V104	N2=3	N3=2	N5=0
		V377	N5=0	N6=-1	N8=-3
		V195	N3=2	N4=1	N6=-1
		V468	N6=-1	N7=-2	N9=-4
186	g10	V246	N4=1	N1=4	N3=2
		V519	N7=-2	N4=1	N6=-1
		V337	N5=0	N2=3	N4=1
		V610	N8=-3	N5=0	N7=-2
		V428	N6=-1	N3=2	N5=0
		V701	N9=-4	N6=-1	N8=-3
187	h6	V22	N1=4	N3=2	N4=1
		V295	N4=1	N6=-1	N7=-2
		V113	N2=3	N4=1	N5=0
		V386	N5=0	N7=-2	N8=-3
		V204	N3=2	N5=0	N6=-1
		V477	N6=-1	N8=-3	N9=-4
188	h11	V245	N4=1	N1=4	N2=3
		V518	N7=-2	N4=1	N5=0
		V336	N5=0	N2=3	N3=2
		V609	N8=-3	N5=0	N6=-1
		V427	N6=-1	N3=2	N4=1
		V700	N9=-4	N6=-1	N7=-2
189	i6	V31	N1=4	N4=1	N4=1
		V304	N4=1	N7=-2	N7=-2
		V122	N2=3	N5=0	N5=0
		V395	N5=0	N8=-3	N8=-3
		V213	N3=2	N6=-1	N6=-1
		V486	N6=-1	N9=-4	N9=-4
190	i12	V244	N4=1	N1=4	N1=4
		V517	N7=-2	N4=1	N4=1
		V335	N5=0	N2=3	N2=3
		V608	N8=-3	N5=0	N5=0
		V426	N6=-1	N3=2	N3=2
		V699	N9=-4	N6=-1	N6=-1
191	j6	V30	N1=4	N4=1	N3=2
		V303	N4=1	N7=-2	N6=-1
		V121	N2=3	N5=0	N4=1
		V394	N5=0	N8=-3	N7=-2

Cada ponto possui seis possibilidade de chaveamento (6 vetores)

		V152	N2=3	N8=-3	N8=-3
		V243	N3=2	N9=-4	N9=-4
109	i15	V487	N7=-2	N1=4	N1=4
		V578	N8=-3	N2=3	N2=3
		V669	N9=-4	N3=2	N3=2
		V60	N1=4	N7=-2	N6=-1
110	j3	V151	N2=3	N8=-3	N7=-2
		V242	N3=2	N9=-4	N8=-3
		V496	N7=-2	N2=3	N1=4
111	j14	V587	N8=-3	N3=2	N2=3
		V678	N9=-4	N4=1	N3=2
112	k3	V59	N1=4	N7=-2	N5=0
		V150	N2=3	N8=-3	N6=-1
		V241	N3=2	N9=-4	N7=-2
113	k13	V505	N7=-2	N3=2	N1=4
		V596	N8=-3	N4=1	N2=3
		V687	N9=-4	N5=0	N3=2
114	l3	V58	N1=4	N7=-2	N4=1
		V149	N2=3	N8=-3	N5=0
		V240	N3=2	N9=-4	N6=-1
115	l12	V514	N7=-2	N4=1	N1=4
		V605	N8=-3	N5=0	N2=3
		V696	N9=-4	N6=-1	N3=2
116	m3	V57	N1=4	N7=-2	N3=2
		V148	N2=3	N8=-3	N4=1
		V239	N3=2	N9=-4	N5=0
117	m11	V523	N7=-2	N5=0	N1=4
		V614	N8=-3	N6=-1	N2=3
		V705	N9=-4	N7=-2	N3=2
118	n3	V56	N1=4	N7=-2	N2=3
		V147	N2=3	N8=-3	N3=2
		V238	N3=2	N9=-4	N4=1
119	n10	V532	N7=-2	N6=-1	N1=4
		V623	N8=-3	N7=-2	N2=3
		V714	N9=-4	N8=-3	N3=2
120	o3	V55	N1=4	N7=-2	N1=4
		V146	N2=3	N8=-3	N2=3
		V237	N3=2	N9=-4	N3=2
121	o4	V318	N4=1	N9=-4	N3=2
		V136	N2=3	N7=-2	N1=4

Cada ponto possui três
possibilidade de chaveamento
(3 vetores)

		V212	N3=2	N6=-1	N5=0
		V485	N6=-1	N9=-4	N8=-3
192	j11	V253	N4=1	N2=3	N1=4
		V526	N7=-2	N5=0	N4=1
		V344	N5=0	N3=2	N2=3
		V617	N8=-3	N6=-1	N5=0
		V435	N6=-1	N4=1	N3=2
		V708	N9=-4	N7=-2	N6=-1
193	k6	V29	N1=4	N4=1	N2=3
		V302	N4=1	N7=-2	N5=0
		V120	N2=3	N5=0	N3=2
		V393	N5=0	N8=-3	N6=-1
		V211	N3=2	N6=-1	N4=1
194	k10	V484	N6=-1	N9=-4	N7=-2
		V262	N4=1	N3=2	N1=4
		V535	N7=-2	N6=-1	N4=1
		V353	N5=0	N4=1	N2=3
		V626	N8=-3	N7=-2	N5=0
195	l6	V444	N6=-1	N5=0	N3=2
		V717	N9=-4	N8=-3	N6=-1
		V28	N1=4	N4=1	N1=4
		V301	N4=1	N7=-2	N4=1
		V119	N2=3	N5=0	N2=3
196	l7	V392	N5=0	N8=-3	N5=0
		V210	N3=2	N6=-1	N3=2
		V483	N6=-1	N9=-4	N6=-1
		V291	N4=1	N6=-1	N3=2
		V564	N7=-2	N9=-4	N6=-1
197	l8	V109	N2=3	N4=1	N1=4
		V382	N5=0	N7=-2	N4=1
		V200	N3=2	N5=0	N2=3
		V473	N6=-1	N8=-3	N5=0
		V281	N4=1	N5=0	N2=3
198	l9	V554	N7=-2	N8=-3	N5=0
		V372	N5=0	N6=-1	N3=2
		V645	N8=-3	N9=-4	N6=-1
		V190	N3=2	N4=1	N1=4
199	l9	V463	N6=-1	N7=-2	N4=1
		V271	N4=1	N4=1	N1=4
		V544	N7=-2	N7=-2	N4=1

Cada ponto possui seis
possibilidade de chaveamento
(6 vetores)

133	e4	V15	N1=4	N2=3	N6=-1
		V288	N4=1	N5=0	N9=-4
		V106	N2=3	N3=2	N7=-2
		V197	N3=2	N4=1	N8=-3
134	e10	V501	N7=-2	N2=3	N6=-1
		V592	N8=-3	N3=2	N7=-2
		V410	N6=-1	N1=4	N5=0
		V683	N9=-4	N4=1	N8=-3
135	f4	V24	N1=4	N3=2	N6=-1
		V297	N4=1	N6=-1	N9=-4
		V115	N2=3	N4=1	N7=-2
		V206	N3=2	N5=0	N8=-3
136	f11	V500	N7=-2	N2=3	N5=0
		V591	N8=-3	N3=2	N6=-1
		V409	N6=-1	N1=4	N4=1
		V682	N9=-4	N4=1	N7=-2
137	g4	V33	N1=4	N4=1	N6=-1
		V306	N4=1	N7=-2	N9=-4
		V124	N2=3	N5=0	N7=-2
		V215	N3=2	N6=-1	N8=-3
138	g12	V499	N7=-2	N2=3	N4=1
		V590	N8=-3	N3=2	N5=0
		V408	N6=-1	N1=4	N3=2
		V681	N9=-4	N4=1	N6=-1
139	h4	V42	N1=4	N5=0	N6=-1
		V315	N4=1	N8=-3	N9=-4
		V133	N2=3	N6=-1	N7=-2
		V224	N3=2	N7=-2	N8=-3
140	h13	V498	N7=-2	N2=3	N3=2
		V589	N8=-3	N3=2	N4=1
		V407	N6=-1	N1=4	N2=3
		V680	N9=-4	N4=1	N5=0
141	i4	V51	N1=4	N6=-1	N6=-1
		V324	N4=1	N9=-4	N9=-4
		V142	N2=3	N7=-2	N7=-2
		V233	N3=2	N8=-3	N8=-3
142	i14	V497	N7=-2	N2=3	N2=3
		V588	N8=-3	N3=2	N3=2
		V406	N6=-1	N1=4	N1=4
		V679	N9=-4	N4=1	N4=1

Cada ponto possui quatro possibilidade de chaveamento (4 vetores)

205	i11	V294	N4=1	N6=-1	N6=-1
		V567	N7=-2	N9=-4	N9=-4
		V112	N2=3	N4=1	N4=1
		V385	N5=0	N7=-2	N7=-2
		V203	N3=2	N5=0	N5=0
		V476	N6=-1	N8=-3	N8=-3
		V254	N4=1	N2=3	N2=3
206	j7	V527	N7=-2	N5=0	N5=0
		V345	N5=0	N3=2	N3=2
		V618	N8=-3	N6=-1	N6=-1
		V163	N3=2	N1=4	N1=4
		V436	N6=-1	N4=1	N4=1
		V709	N9=-4	N7=-2	N7=-2
		V20	N1=4	N3=2	N2=3
207	j10	V293	N4=1	N6=-1	N5=0
		V566	N7=-2	N9=-4	N8=-3
		V111	N2=3	N4=1	N3=2
		V384	N5=0	N7=-2	N6=-1
		V202	N3=2	N5=0	N4=1
		V475	N6=-1	N8=-3	N7=-2
		V263	N4=1	N3=2	N2=3
208	k7	V536	N7=-2	N6=-1	N5=0
		V354	N5=0	N4=1	N3=2
		V627	N8=-3	N7=-2	N6=-1
		V172	N3=2	N2=3	N1=4
		V445	N6=-1	N5=0	N4=1
		V718	N9=-4	N8=-3	N7=-2
		V19	N1=4	N3=2	N1=4
209	k8	V292	N4=1	N6=-1	N4=1
		V565	N7=-2	N9=-4	N7=-2
		V110	N2=3	N4=1	N2=3
		V383	N5=0	N7=-2	N5=0
		V201	N3=2	N5=0	N3=2
		V474	N6=-1	N8=-3	N6=-1
		V282	N4=1	N5=0	N3=2
209	k8	V555	N7=-2	N8=-3	N6=-1
		V100	N2=3	N3=2	N1=4
		V373	N5=0	N6=-1	N4=1
		V646	N8=-3	N9=-4	N7=-2
		V191	N3=2	N4=1	N2=3

Cada ponto possui sete possibilidade de chaveamento (7 vetores)

143	j4	V50	N1=4	N6=-1	N5=0
		V323	N4=1	N9=-4	N8=-3
		V141	N2=3	N7=-2	N6=-1
		V232	N3=2	N8=-3	N7=-2
144	j13	V506	N7=-2	N3=2	N2=3
		V597	N8=-3	N4=1	N3=2
		V415	N6=-1	N2=3	N1=4
		V688	N9=-4	N5=0	N4=1
145	k4	V49	N1=4	N6=-1	N4=1
		V322	N4=1	N9=-4	N7=-2
		V140	N2=3	N7=-2	N5=0
146	k12	V231	N3=2	N8=-3	N6=-1
		V515	N7=-2	N4=1	N2=3
		V606	N8=-3	N5=0	N3=2
		V424	N6=-1	N3=2	N1=4
147	l4	V697	N9=-4	N6=-1	N4=1
		V48	N1=4	N6=-1	N3=2
		V321	N4=1	N9=-4	N6=-1
		V139	N2=3	N7=-2	N4=1
148	i11	V230	N3=2	N8=-3	N5=0
		V524	N7=-2	N5=0	N2=3
		V615	N8=-3	N6=-1	N3=2
		V433	N6=-1	N4=1	N1=4
149	m4	V706	N9=-4	N7=-2	N4=1
		V47	N1=4	N6=-1	N2=3
		V320	N4=1	N9=-4	N5=0
		V138	N2=3	N7=-2	N3=2
150	m10	V229	N3=2	N8=-3	N4=1
		V533	N7=-2	N6=-1	N2=3
		V624	N8=-3	N7=-2	N3=2
		V442	N6=-1	N5=0	N1=4
151	n4	V715	N9=-4	N8=-3	N4=1
		V46	N1=4	N6=-1	N1=4
		V319	N4=1	N9=-4	N4=1
		V137	N2=3	N7=-2	N2=3
152	n5	V228	N3=2	N8=-3	N3=2
		V309	N4=1	N8=-3	N3=2
		V127	N2=3	N6=-1	N1=4
		V400	N5=0	N9=-4	N4=1
		V218	N3=2	N7=-2	N2=3

Cada ponto possui quatro possibilidade de chaveamento (4 vetores)

210	k9	V464	N6=-1	N7=-2	N5=0
		V272	N4=1	N4=1	N2=3
		V545	N7=-2	N7=-2	N5=0
		V363	N5=0	N5=0	N3=2
		V636	N8=-3	N8=-3	N6=-1
		V181	N3=2	N3=2	N1=4
211	h8	V454	N6=-1	N6=-1	N4=1
		V727	N9=-4	N9=-4	N7=-2
		V2	N1=4	N1=4	N2=3
		V275	N4=1	N4=1	N5=0
		V548	N7=-2	N7=-2	N8=-3
		V93	N2=3	N2=3	N3=2
212	h9	V366	N5=0	N5=0	N6=-1
		V639	N8=-3	N8=-3	N9=-4
		V184	N3=2	N3=2	N4=1
		V457	N6=-1	N6=-1	N7=-2
		V265	N4=1	N3=2	N4=1
		V538	N7=-2	N6=-1	N7=-2
213	i8	V83	N2=3	N1=4	N2=3
		V356	N5=0	N4=1	N5=0
		V629	N8=-3	N7=-2	N8=-3
		V174	N3=2	N2=3	N3=2
		V447	N6=-1	N5=0	N6=-1
		V720	N9=-4	N8=-3	N9=-4
214	i10	V11	N1=4	N2=3	N2=3
		V284	N4=1	N5=0	N5=0
		V557	N7=-2	N8=-3	N8=-3
		V102	N2=3	N3=2	N3=2
		V375	N5=0	N6=-1	N6=-1
		V648	N8=-3	N9=-4	N9=-4
214	i10	V193	N3=2	N4=1	N4=1
		V466	N6=-1	N7=-2	N7=-2
		V264	N4=1	N3=2	N3=2
		V537	N7=-2	N6=-1	N6=-1
		V82	N2=3	N1=4	N1=4
		V355	N5=0	N4=1	N4=1
214	i10	V628	N8=-3	N7=-2	N7=-2
		V173	N3=2	N2=3	N2=3
		V446	N6=-1	N5=0	N5=0
		V719	N9=-4	N8=-3	N8=-3

Cada ponto possui sete possibilidade de chaveamento (7 vetores)

Cada ponto possui oito possibilidade de chaveamento (8 vetores)

153	n6	V299	N4=1	N7=-2	N2=3
		V390	N5=0	N8=-3	N3=2
		V208	N3=2	N6=-1	N1=4
		V481	N6=-1	N9=-4	N4=1
154	n7	V289	N4=1	N6=-1	N1=4
		V562	N7=-2	N9=-4	N4=1
		V380	N5=0	N7=-2	N2=3
		V471	N6=-1	N8=-3	N3=2
		V370	N5=0	N6=-1	N1=4
		V643	N8=-3	N9=-4	N4=1
156	n9	V461	N6=-1	N7=-2	N2=3
		V542	N7=-2	N7=-2	N2=3
		V633	N8=-3	N8=-3	N3=2
		V451	N6=-1	N6=-1	N1=4
		V724	N9=-4	N9=-4	N4=1

Cada ponto possui quatro possibilidade de chaveamento (4 vetores)

215	j8	V10	N1=4	N2=3	N1=4
		V283	N4=1	N5=0	N4=1
		V556	N7=-2	N8=-3	N7=-2
		V101	N2=3	N3=2	N2=3
		V374	N5=0	N6=-1	N5=0
		V647	N8=-3	N9=-4	N8=-3
		V192	N3=2	N4=1	N3=2
		V465	N6=-1	N7=-2	N6=-1
216	j9	V273	N4=1	N4=1	N3=2
		V546	N7=-2	N7=-2	N6=-1
		V91	N2=3	N2=3	N1=4
		V364	N5=0	N5=0	N4=1
		V637	N8=-3	N8=-3	N7=-2
		V182	N3=2	N3=2	N2=3
		V455	N6=-1	N6=-1	N5=0
217	i9	V728	N9=-4	N9=-4	N8=-3
		V1	N1=4	N1=4	N1=4
		V274	N4=1	N4=1	N4=1
		V547	N7=-2	N7=-2	N7=-2
		V92	N2=3	N2=3	N2=3
		V365	N5=0	N5=0	N5=0
		V638	N8=-3	N8=-3	N8=-3
		V183	N3=2	N3=2	N3=2
V456	N6=-1	N6=-1	N6=-1		
V729	N9=-4	N9=-4	N9=-4		

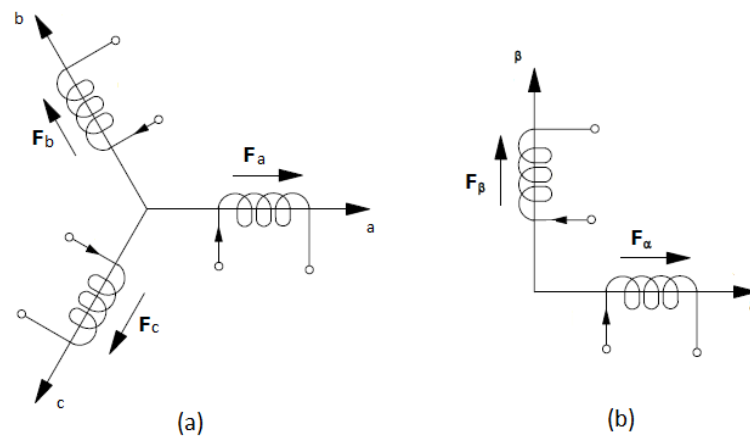
Cada ponto possui oito possibilidade de chaveamento (8 vetores)

Cada ponto possui nove possibilidade de chaveamento (9 vetores)

APÊNDICE D – DEDUÇÃO DA FORMAÇÃO DA BASE α - β

Segundo Barbi (1985) a transformação do sistema “abc” para nova base em α - β pode ser realizada através da análise de sistemas equilibrados das estruturas de máquina de indução simétrica trifásica e bifásica, conforme Figura 85 (a) e Figura 85 (b). Para tanto, deve-se decompor vetorialmente F_a , F_b e F_c segundo os eixos ortogonais α e β . A transformação permite encontrar F_α e F_β em função de F_a , F_b e F_c , fazendo com que a estrutura bifásica produza uma força magnetomotriz resultante com efeito semelhante à resultante da estrutura trifásica.

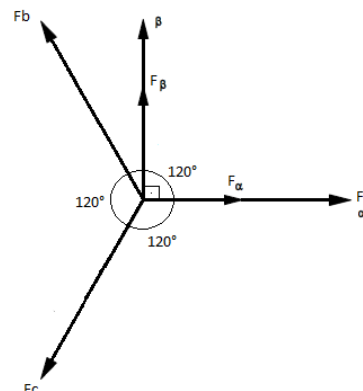
Figura 85 - (a) Circuito trifásico simétrico; (b) Circuito bifásico simétrico



Fonte: Adaptado de BARBI (1985).

A Figura 86 ilustra a união das duas estruturas da máquina de indução simétrica demonstrada na Figura 85 (a) e Figura 85 (b), onde o eixo do sistema bifásico α está sobreposto ao eixo F_a do sistema trifásico. Os vetores F_α e F_β , que se encontram nos eixos ortogonais α e β , respectivamente, serão decompostos nos eixos F_a , F_b e F_c , que estão defasados em 120° .

Figura 86 - Vetores F_α e F_β em função de F_a , F_b e F_c

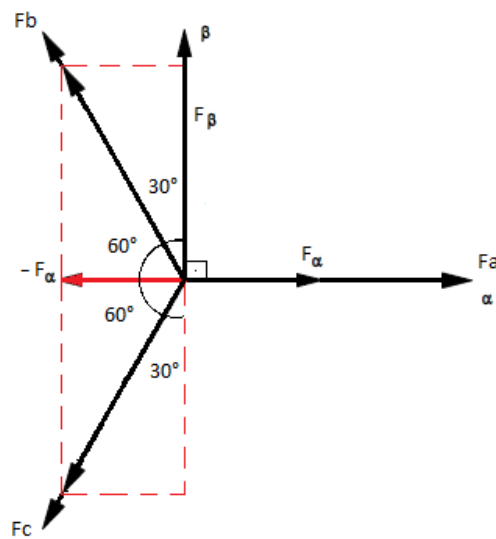


A decomposição das forças e a formação da matriz transformação estão demonstradas a seguir, sendo que para isso, foi utilizada a fórmula de trigonometria do triângulo (50) (IEZZI, 2013).

$$\cos(\theta) = \frac{\text{cateto adjacente}}{\text{hipotenusa}} \quad (50)$$

A representação do vetor F_α através dos eixos F_a , F_b e F_c está demonstrada na Figura 87 e calculada em (51).

Figura 87 - Decomposição do vetor F_α em função de F_a , F_b e F_c

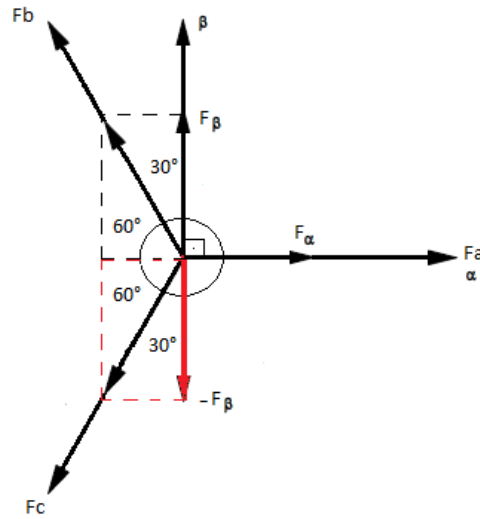


$$F_\alpha = F_a \cdot \cos(0^\circ) - F_b \cdot \cos(60^\circ) - F_c \cdot \cos(60^\circ)$$

$$F_\alpha = F_a \cdot \cos(0) - F_b \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - F_c \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

$$F_\alpha = F_a \cdot 1 - F_b \cdot \frac{1}{2} - F_c \cdot \frac{1}{2} \quad (51)$$

A decomposição do vetor F_β em função de F_a , F_b e F_c está representada na Figura 88 e calculada em (52).

Figura 88 - Decomposição do vetor F_β em função de F_a , F_b e F_c 

$$F_\beta = F_a \cdot \cos(90^\circ) + F_b \cdot \cos(30^\circ) - F_c \cdot \cos(30^\circ)$$

$$F_\beta = F_a \cdot \cos(0) + F_b \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - F_c \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$F_\beta = F_a \cdot 0 + F_b \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - F_c \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (52)$$

Desta forma, pode-se representar a decomposição na forma matricial em (53), igualando assim, as equações em (27).

$$F_\alpha = F_a \cdot 1 - F_b \cdot \frac{1}{2} - F_c \cdot \frac{1}{2}$$

$$F_\beta = F_a \cdot 0 + F_b \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - F_c \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\begin{bmatrix} F_\alpha \\ F_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (53)$$