



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
Doutorado

MODULAÇÃO PWM VETORIAL MULTIDIMENSIONAL PARA CONVERSORES DE DOIS NÍVEIS COM NÚMERO ÍMPAR DE FASES

Sabrina Alves de Freitas

*Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

Sabrina Alves de Freitas

**MODULAÇÃO PWM VETORIAL MULTIDIMENSIONAL PARA
CONVERSORES DE DOIS NÍVEIS COM NÚMERO ÍMPAR DE FASES**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Simplício Arnaud da Silva

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F866m Freitas, Sabrina Alves de.

Modulação PWM vetorial multidimensional para
conversores de dois níveis com número ímpar de fases /
Sabrina Alves de Freitas. - João Pessoa, 2021.
75 f. : il.

Orientação: Simplício Arnaud da Silva.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica. 2. Conversores estáticos. 3.
Acionamento de máquinas elétricas. 4. Pwm vetorial. I.
Silva, Simplício Arnaud da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621(043)

**MODULAÇÃO PWM VETORIAL MULTIDIMENSIONAL PARA
CONVERSORES DE DOIS NÍVEIS COM NÚMERO ÍMPAR DE FASES**

por

SABRINA ALVES DE FREITAS

Tese aprovada em 25 de março de 2021



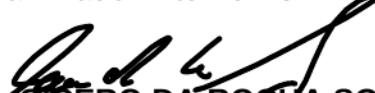
Prof. Dr. SIMPLICIO ARNAUD DA SILVA

Orientador – UFPB



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO

Examinador Interno - UFPB



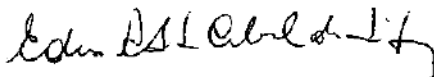
Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO

Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. FABIANO SALVADORI

Examinador Externo – UFPB



Prof. Dr. EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA

Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a José de Freitas Oliveira Neto

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Professor Simplício Arnaud Da Silva. Seus conselhos e ensinamentos foram extremamente importantes.
- Ao Professor Cícero da Rocha Souto pela confiança demonstrada no início da minha jornada no doutorado.
- Aos membros da banca examinadora que deram contribuições importantíssimas ao trabalho com sugestões que elevaram o nível da pesquisa.
- Ao meu esposo, Isaac Soares de Freitas. Sem você, nada disso teria sido possível.
- Aos colegas Gilielson e Alexandre pelo auxílio com os resultados experimentais.
- Aos meus pais pela confiança e apoio.

RESUMO

No presente trabalho é proposto um algoritmo geral para modulação vetorial por largura de pulso (SVPWM) multidimensional aplicado a inversores de dois níveis com um número ímpar de fases acionando máquinas elétricas com distribuição simétrica das fases. De uma maneira geral, o SVPWM consiste na escolha apropriada dos vetores espaciais de tensão ativos e nulos e na determinação dos intervalos de tempo de aplicação para cada um desses vetores, de modo que um dado vetor de referência seja sintetizado pelo inversor. Nos sistemas de acionamento com máquinas trifásicas, os vetores ativos de tensão mais apropriados para sintetizar um determinado vetor de referência são facilmente observados graficamente, já que os vetores são de dimensão dois, e, conseqüentemente, visualizados no plano. Porém, para máquinas com mais de três fases, o espaço vetorial no qual os vetores estão localizados são de dimensões maiores, o que dificulta uma visualização gráfica dos vetores. Como exemplo, num acionamento com cinco fases, o espaço vetorial é de dimensão quatro e embora a projeção destes vetores em dois planos ainda permita uma visualização gráfica, a identificação dos vetores ativos mais adequados não é óbvia. Neste trabalho é proposto um algoritmo para rápida identificação dos vetores ativos mais adequados a serem aplicados para sintetizar um determinado vetor de referência com base nas tensões de fase de referência. Tal abordagem permite uma rápida identificação dos vetores ativos que definem um determinado setor. Este método, além de não apresentar complexidade, requer baixo poder de processamento e armazenamento, o que o torna ideal para operação em tempo real. Além disso, o SVPWM requer inversão de matrizes de ordem igual à dimensão do espaço vetorial em questão para o cálculo do tempo de aplicação dos vetores. Embora no caso trifásico este cálculo seja simples, pois se trata da inversão de uma matriz de ordem dois, nas máquinas com número maior de fases a ordem da matriz aumenta e esta inversão requer tempo de processamento, o que pode se tornar inviável em operações em tempo real. Neste trabalho, mostra-se que devido a simetria existente em todos os setores do SVPWM, é possível evitar-se a inversão de matrizes. Com o algoritmo proposto também evita-se a necessidade de armazenar as informações dos setores em tabelas para operação em tempo real, pois a identificação dos vetores ativos que formam o setor é decorrência direta do ordenamento das tensões de fase de referência.

Palavras-chaves: Pwm vetorial, Conversores estáticos, Acionamento de máquinas elétricas.

ABSTRACT

In this paper is proposed a space vector pulse width modulation (SVPWM) algorithm for multiphase drive with any odd number of phases and symmetrical phase distribution. The SVPWM consists of choosing the appropriate active and null spatial voltage vectors and determining the time intervals of application for each of these vectors, so that a given reference voltage vector is synthesized by the inverter as the mean value in a switching period. In a three-phase drive system, the most appropriate active voltage vectors for synthesizing a given reference vector are easily observed graphically, since the vectors are of dimension two, and, consequently, visualized in a plane. However, for machines with more than three phases, the space vector in which the vectors are located is of larger dimensions, which makes a graphic visualization of the vectors difficult. As an example, in a five-phase drive, the dimension of the space vector is four and, although the projection of these vectors in two planes still allows some degree of graphical visualization, the identification of the most suitable active vectors is not so obvious, specially if the reference voltage vector has projection in both planes (that means a control system with harmonic injection). In this work, an algorithm based on the reference phase voltages for fast identification of the most suitable active vectors to be applied to synthesize a given reference voltage vector is proposed. Such an approach allows a quick identification of the active voltage vectors that define a certain sector. This method, in addition to simplicity, requires low storage space and processing power, which makes it suitable for real-time operation. Furthermore, a SVPWM requires the inversion of matrices of order equal to the dimension of the space vector in order to calculate the time application of the vectors. Although in the three-phase case this calculation is simple, as it is the inversion of an order two matrix, in machines with a larger number of phases the order of the matrix increases and this inversion requires large processing time, which can become unfeasible in real-time operations. Beside, there is numerical problems in calculating the inverse matrix for large order matrices. In this work, it is shown that due to the existing symmetry in all sectors of the SVPWM, it is possible to avoid matrix inversion. Hence, the main contributions in this paper is a SVPWM modulator for a multiphase two level inverter drive system with any odd number of phases.

Keywords: SVPWM; Power converters; Motor drive systems.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Motor de Indução	1
1.2	Modulação por largura de pulso - PWM	5
1.2.1	Modulação por largura de pulso escalar	6
1.2.2	Modulação por largura de pulso vetorial - SVPWM	6
1.2.3	SVPWM em sistemas com número de fases maior do que três	9
1.3	Contribuições do trabalho	11
1.4	Sinopse dos capítulos	11
2	Máquinas polifásicas e matriz de transformação	12
2.1	Distribuição de força magnetomotriz em máquinas polifásicas	12
2.1.1	FMM resultante no entreferro para um enrolamento com m_s fases no estator	13
2.2	Modelo de uma máquina de indução polifásica com m_s fases	15
2.3	Conclusões do capítulo 2	16
3	SVPWM em sistemas de acionamento de máquinas polifásicas com número ímpar de fases	17
3.1	Definição dos vetores ativos que compõem os setores	19
3.1.1	Identificação dos vetores de tensão ativos que formam cada setor conforme literatura	21
3.2	Método proposto para identificação dos vetores de tensão ativos que definem os setores	25
3.3	Cálculo do tempo de aplicação dos vetores ativos	27
3.4	Método proposto para cálculo dos tempos de aplicação dos vetores ativos	28
3.5	Algoritmo para o método proposto	30
3.6	Conclusões do capítulo 3	32
4	Análise do método e resultados experimentais	33
4.1	Análise gráfica	33
4.1.1	Exemplos para o caso de cinco fases	33
4.1.2	Exemplos para o caso de nove fases	38
4.2	Resultados experimentais	43
4.3	Conclusões do capítulo 4	44
5	Conclusões	47
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	48
	Referências	49

Apêndices	53
APÊNDICE A Exemplos da utilização do método	54
A.1 Acionamento pentafásico senoidal	54
A.2 Acionamento pentafásico não senoidal: injeção harmônica	56
A.3 Acionamento senoidal da máquina de sete fases	59
A.4 Acionamento senoidal da máquina de nove fases	61
A.5 Acionamento senoidal da máquina de onze fases	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um motor de indução	1
Figura 2 – Sistema de acionamento de motor de indução usando inversor de frequência	2
Figura 3 – Diagrama de blocos do controle de velocidade de uma máquina de indução trifásica baseado no <i>IFOC</i>	3
Figura 4 – Diagrama de blocos do controle de velocidade de uma máquina de indução pentafásica com enrolamento concentrado, baseado no <i>IFOC</i> e com injeção de terceiro harmônico de tensão	4
Figura 5 – Modulação PWM escalar do tipo seno/triângulo	6
Figura 6 – Possíveis combinações de chaveamento em um inversor trifásico de dois níveis	7
Figura 7 – Vetores criados por um inversor trifásico de dois níveis e utilização desses para sintetizar um vetor de referência	7
Figura 8 – Vetores criados por um inversor pentafásico quando a componente fundamental e a terceira componente harmônica são aplicadas à máquina	9
Figura 9 – Vetores criados por um inversor pentafásico de dois níveis e utilização desses para sintetizar um vetor de referência quando o acionamento é senoidal	10
Figura 10 – Bobinas que formam uma fase do estator de uma máquina de corrente alternada com quatro polos $p = 2$ e com duas bobinas por polo por fase $q = 2$ alocadas em 48 ranhuras e distribuição de força magnetomotriz desta bobina ao longo do entreferro	13
Figura 11 – Enrolamento com m_s fases distribuídas simetricamente	15
Figura 12 – Sistema de acionamento polifásico	15
Figura 13 – Plano $d_1 q_1$ para sistema trifásico	21
Figura 14 – Vetores criados por um inversor pentafásico quando a componente fundamental e a terceira componente harmônica são aplicadas à máquina	22
Figura 15 – Identificação da matriz Λ para um sistema de acionamento com máquina de 5 fases para um vetor de tensão de referência localizado no setor identificado por $NIS = 34251$	26
Figura 16 – Identificação da matriz Λ para um sistema de acionamento de 9 fases para um vetor de tensão de referência localizado no setor de $NIS = 746293185$	27
Figura 17 – Diagrama de blocos do método SVPWM polifásico proposto	30
Figura 18 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no Exemplo 01 em um sistema pentafásico	33
Figura 19 – Visualização gráfica dos vetores de tensão para o Exemplo 01	34
Figura 20 – Posições das chaves para aplicação dos vetores ativos e nulos	35
Figura 21 – Processo de chaveamento	35

Figura 22 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no exemplo 02 em um sistema pentafásico: (a) Desenvolvimento passo a passo do algoritmo da Fig. 17; e (b) Visualização gráfica dos vetores de tensão.	36
Figura 23 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado em no exemplo 03 em um sistema pentafásico: (a) Desenvolvimento passo a passo do algoritmo da Fig. 17; e (b) Visualização gráfica dos vetores de tensão.	37
Figura 24 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no exemplo 04 em um sistema eneafásico	39
Figura 25 – Visualização gráfica dos vetores de tensão para o exemplo 04	40
Figura 26 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no exemplo 05 em um sistema eneafásico	41
Figura 27 – Visualização gráfica dos vetores de tensão para o exemplo 05	42
Figura 28 – Bancada Experimental	44
Figura 29 – Resultados experimentais usando o algoritmo proposto (Fig. 17) com um vetor de tensão de referência apenas com os componentes d_1q_1 , ou seja, acionamento senoidal: (a) Tensão de fase medida (superior) e corrente de fase medida(inferior); (b) Tensão de fase filtrada	45
Figura 30 – Resultados experimentais usando o algoritmo proposto (Fig. 17) com um vetor de tensão de referência com as componentes d_1q_1 e d_3q_3 , ou seja, injeção do terceiro harmônico: (a) Tensão de fase medida (superior) e corrente de fase medida (inferior); (b) Tensão de fase filtrada	46
Figura 31 – Espaço de vetores de cinco fases e todos os 10 setores utilizados quando apenas a componente fundamental é aplicada a máquina com tensão de referência nula em d_3q_3	55
Figura 32 – Vetor de referência localizado no setor 51234 e suas projeções quando a componente fundamental e a terceira hamônica são injetadas	56
Figura 33 – Espaço de vetores de cinco fases e 15 dos setores usados quando a componente fundamental e a terceira componente harmônica são aplicadas à máquina	59
Figura 34 – Espaço de vetores para um sistema de acionamento de sete fases e 3 dos setores usados quando apenas a componente fundamental é aplicada à máquina e tensão de referência é nula em d_3q_3 e d_5q_5	61
Figura 35 – Espaço de vetores para um sistema de acionamento de nove fases e 2 dos setores usados quando apenas a componente fundamental é aplicada à máquina e tensão de referência é nula em d_3q_3 , d_5q_5 e d_7q_7	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de vetores ativos(NVA) para diferentes números de fases m_s em um sistemas de acionamento polifásicos	18
Tabela 2 – Número de vetores ativos(NVA) e número de setores(NS) para diferentes números de fases m_s em um sistemas de acionamento polifásicos	19
Tabela 3 – OTF, NIS, e as matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos (Λ) para todos os 6 setores em um sistema de acionamento trifásico	20
Tabela 4 – OTF, NIS e matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos (Λ) em 3 dos 120 setores de um sistema de acionamento de cinco fases	23
Tabela 5 – NIS e matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ em todos os 120 setores de um sistema de acionamento de cinco fases	24
Tabela 6 – Número de identificação do setor NIS, matrizes de setor normalizadas $\bar{S}_e$ e matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ para o acionamento pentafásico senoidal	54
Tabela 7 – Os trinta setores no espaço de vetores de um sistema pentafásico, juntamente com o NIS e o padrão de chaveamento em cada um deles quando componente fundamental e a terceira harmônica são injetadas	58
Tabela 8 – Os catorze setores no espaço de vetores para um sistema de acionamento de sete fases, juntamente com o NIS e o padrão de chaveamento em cada um deles quando apenas a componente fundamental é alimentada	60
Tabela 9 – Os dezoito setores no espaço de vetores para um sistema de acionamento de nove fases, juntamente com o NIS e o padrão de chaveamento em cada um deles quando apenas a componente fundamental é alimentada	62
Tabela 10 – Os vinte e dois setores no espaço de vetores para um sistema de acionamento de onze fases, juntamente com o NIS e o padrão de chaveamento em cada um deles quando apenas a componente fundamental é alimentada	64

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 MOTOR DE INDUÇÃO

O motor de indução com rotor em gaiola de esquilos é amplamente utilizado devido sua estrutura simples, baixo custo, elevada confiabilidade e fácil manutenção (XU *et al.*, 2018). Na Fig. 1 é mostrada a estrutura básica de um motor de indução, ressaltando-se os dois circuitos principais da máquina: o circuito do estator e do rotor.

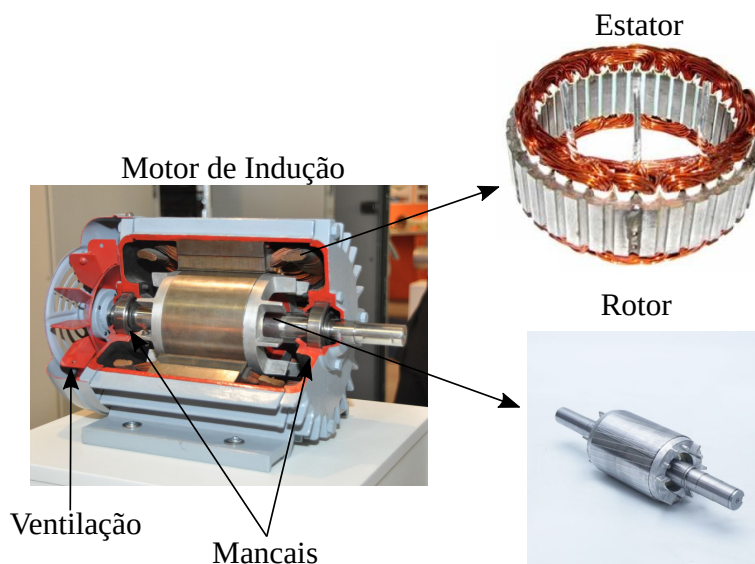


Figura 1 – Estrutura de um motor de indução

O circuito do estator é formado por bobinas distribuídas ao longo de ranhuras, enquanto o circuito do rotor é formado por barras curto-circuitadas por um anel, formando uma estrutura similar a uma gaiola de esquilos. A máquina é alimentada a partir de uma fonte de tensão alternada conectada ao circuito do estator. Antes dos avanços ocorridos na eletrônica de potência, era inviável o desenvolvimento de fontes variáveis de tensão alternada (frequência e amplitude), o que dificultava a utilização de máquinas de corrente alternada em sistemas de acionamento com velocidade variável. Portanto, as máquinas de corrente alternada sempre eram alimentadas diretamente da rede elétrica em sistemas de acionamento com velocidade fixa. Neste cenário, as máquinas de indução consolidaram-se como tendo circuitos trifásicos no estator devido ao sistema elétrico de potência ser trifásico. Além disso, considerando que as máquinas de indução possuem boa regulação de velocidade (velocidade varia pouco entre operação em vazio e plena carga), tal tipo de máquina sempre foi bastante empregada em aplicações ditas de velocidade fixa, tais como bombas centrífugas, nas quais a velocidade pode variar dentro de uma pequena

faixa. Nestes sistemas a máquina é alimentada diretamente da rede elétrica sendo seu sistema de acionamento formado unicamente por dispositivos necessários à partida e proteção.

Com o avanço da eletrônica de potência, especialmente com o desenvolvimento de chaves controladas de média tensão e altas velocidades de chaveamento, a exemplo do IGBT (BALIGA *et al.*, 1984), e com o avanço das estratégias de controle vetorial de máquinas de corrente alternada (MATSUO; LIPO, 1985; OGASAWARA *et al.*, 1988; MURATA *et al.*, 1990), as máquinas de indução trifásicas acionadas por inversores trifásicos passaram a ser dominantes nos sistemas de acionamento a velocidade variável de alto desempenho (LIU *et al.*, 2018). Na Fig. 2 é mostrado um típico sistema de acionamento de motor de indução a partir de um inversor de frequência comercial. O dispositivo inversor de frequência é alimentado a partir de uma rede elétrica trifásica (ou mesmo monofásica), a tensão alternada de alimentação é retificada formando o barramento CC que, por sua vez, através de um circuito inversor, é convertida em um sistema trifásico de tensões alternadas para alimentar a máquina de indução.

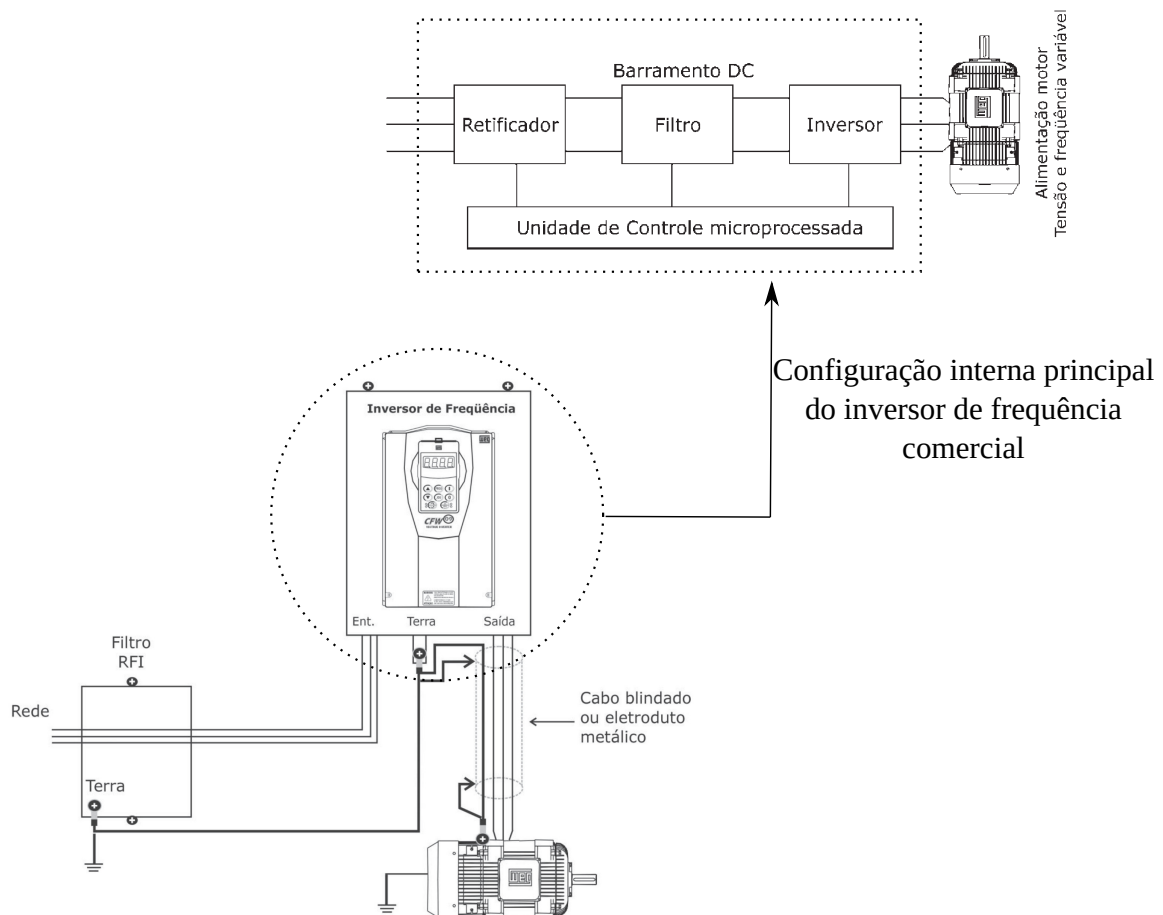


Figura 2 – Sistema de acionamento de motor de indução usando inversor de frequência

Na unidade de controle microprocessada da Fig. 2 é implementada a estratégia de controle da máquina de indução e são gerados os sinais de comando para as chaves estáticas que formam o circuito inversor, de maneira que as tensões sejam apropriadamente aplicadas à máquina. Uma das estratégias mais empregadas no controle de máquinas de indução trifásicas é o

controle vetorial indireto orientado com o campo do rotor, do inglês *IFOC - Indirect Field Oriented Control*. Na Fig. 3 é mostrado um diagrama de blocos do *IFOC*, que define as tensões de referência a serem aplicadas à máquina, bem como o bloco PWM que é responsável por definir os instantes de comutação das chaves do circuito inversor para que as tensões desejadas sejam aplicadas corretamente. Portanto, a estratégia de controle fornece as tensões de referência no espaço de vetores ao modulador PWM, que por sua vez produz os padrões de chaveamento necessários para que tais tensões sejam corretamente aplicadas à máquina. Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento do modulador PWM vetorial para acionamento de máquina com qualquer número ímpar de fases.

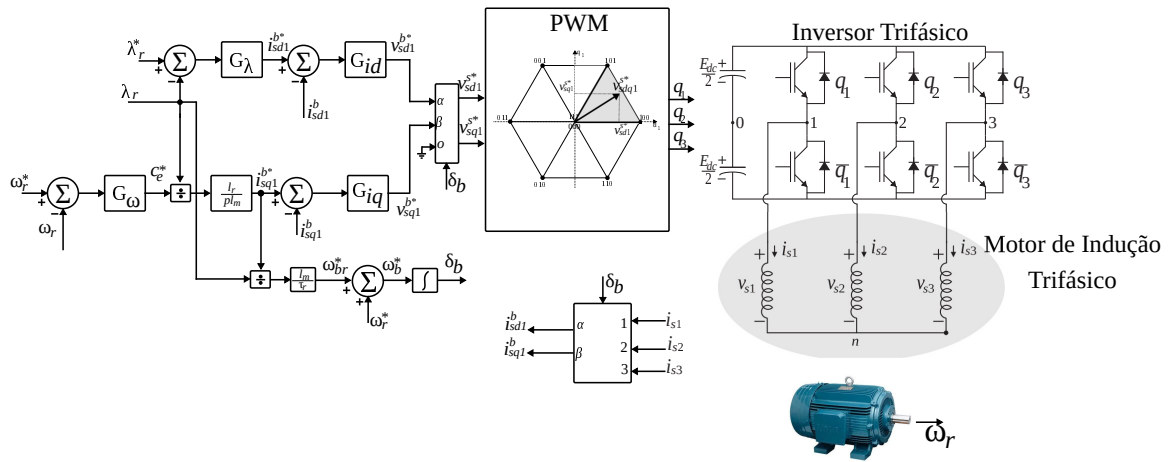


Figura 3 – Diagrama de blocos do controle de velocidade de uma máquina de indução trifásica baseado no *IFOC*

Uma vez que a máquina não é mais alimentada diretamente pela rede elétrica, o número de fases não é mais limitado pelas três fases do sistema elétrico de potência, já que o circuito inversor pode fornecer qualquer número de fases. A necessidade de sistemas de acionamento a velocidade variável de alto desempenho com potências cada vez mais elevadas, a exemplo de sistemas de laminação na indústria do aço, sistemas de içamento em mineração, tração de locomotivas, entre outros, levou a necessidade de soluções tais como a utilização de máquinas com mais de três fases (LIU *et al.*, 2018). Portanto, sistemas de acionamentos com máquinas com mais de três fases têm sido amplamente propostos e estudados na literatura (LIU *et al.*, 2018; SALEM; NARIMANI, 2019). Tais sistemas são especialmente justificados para aplicações que exigem maior capacidades de potência e melhor tolerância a falhas, uma vez que ambas essas características são uma consequência natural do número extra de fases. Além disso, sabe-se que as máquinas polifásicas apresentam pulsação de torque reduzida e melhores densidades de fluxo e torque, se comparadas às tradicionais máquinas trifásicas (TOLIYAT *et al.*, 1991a; TOLIYAT *et al.*, 1991b; LEVI *et al.*, 2007).

Em uma máquina com o número de fases maior do que três, além da componente fundamental, algumas das componentes harmônicas espaciais de fluxo são capazes de produzir torque médio com a injeção de componentes harmônicas de tensão apropriadas (FUDEH; ONG, 1983a;

FUDEH; ONG, 1983b; FUDEH; ONG, 1983c). Esta capacidade é bem demonstrada para uma máquina de indução assimétrica de seis fases em (LYRA; LIPO, 2002), para uma máquina de indução de onze fases em (ABDELKHALIK *et al.*, 2010) e para uma máquina de sete fases em (MENGONI *et al.*, 2015). Portanto, em uma máquina polifásica, além da componente fundamental de tensão, componentes harmônicas podem ser injetadas para elevar a capacidade de torque da máquina e melhorar o formato do fluxo. Nestes casos, o enrolamento da máquina é do tipo concentrado, como forma de potencializar a influência das componentes harmônicas de fluxo. Em (RAY *et al.*, 2018) é mostrado um sistema de controle de máquina de indução de cinco fases utilizando injeção de terceira harmônica para fins de produção de torque. Na Fig. 4 é mostrado um diagrama de blocos do *IFOC* aplicado à máquinas de indução de cinco fases com injeção de terceiro harmônico.

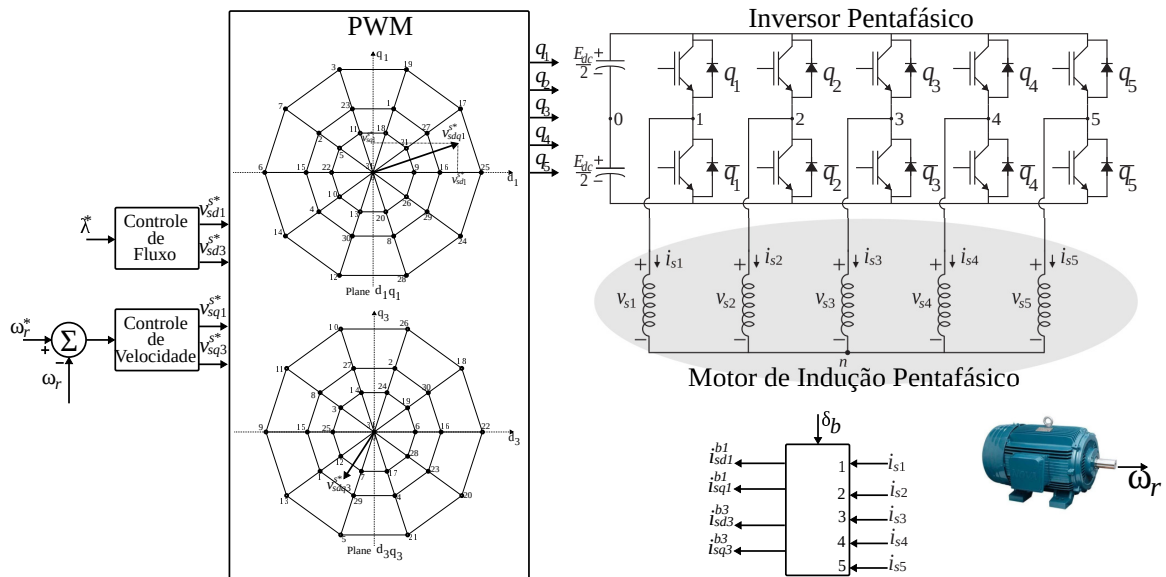


Figura 4 – Diagrama de blocos do controle de velocidade de uma máquina de indução pentafásica com enrolamento concentrado, baseado no *IFOC* e com injeção de terceiro harmônico de tensão

Em um motor trifásico, todas as componentes harmônicas de fluxo são mapeadas em um único plano dq exceto pelas componentes múltiplas de três, que são mapeadas no eixo homopolar o . Por tal razão, o enrolamento da máquina de indução trifásica é distribuído como forma de minimizar a influência das harmônicas espaciais de fluxo, de sorte que ao se analisar máquinas de indução trifásicas apenas a componente fundamental de fluxo é levada em consideração no modelo. A tensão aplicada à máquina trifásica deve ter apenas a componente fundamental, uma vez que a presença de harmônicos de tensão perturbariam a componente fundamental de fluxo resultando em pulsação de torque. Na figura 3 observa-se o diagrama de blocos da estratégia de acionamento, do tipo campo orientado, aplicada ao controle de velocidade de uma máquina de indução trifásica. Observa-se uma malha de controle de fluxo que define a tensão de referência de eixo “d” e uma malha de controle de torque que define a tensão de referência de eixo “q”. A

estratégia PWM gera os sinais de comando de forma a sintetizar estas tensões de referência e aplicá-las à máquina.

Quando o número de fases é maior do que três, componentes harmônicas espaciais de fluxo de ordem mais alta são mapeadas em planos ortogonais ao plano da componente fundamental, portanto, podem ser usadas para produzir torque útil, se excitadas com componentes harmônicas de tensão apropriadas. Por exemplo, em uma máquina de cinco fases, a componente harmônica espacial de fluxo de terceira ordem é mapeada em um plano ortogonal ao plano dq da componente fundamental (PEREIRA *et al.*, 2006). Se apenas a componente de tensão fundamental é aplicada à máquina de cinco fases com a terceira harmônica de tensão nula, a pulsação de torque é menor que na máquina trifásica. Porém, a terceira harmônica de tensão pode ser aplicada para produzir torque útil devido à interação com a terceira harmônica de fluxo. Na figura 4 observa-se o diagrama de blocos de controle de velocidade para uma máquina de indução pentafásica. Observam-se o plano d_1q_1 onde é mapeada a componente fundamental e o plano d_3q_3 onde a componente terceira harmônica é mapeada.

Já em uma máquina de sete fases, haverá três planos ortogonais onde são mapeadas as componentes harmônicas fundamental, de terceira e de quinta ordem, respectivamente. De uma forma geral, em uma máquina com número ímpar de fases m_s haverá $(m_s - 1) / 2$ planos ortogonais nos quais são mapeadas as primeiras $(m_s - 1) / 2$ componentes harmônicas espaciais de fluxo de ordem ímpar. Nesses casos, o enrolamento de fase é normalmente concentrado para maximizar a produção de torque pelas componentes harmônicas espaciais de fluxo (WANG *et al.*, 2021; CERVONE *et al.*, 2021; LYRA; LIPO, 2002; ABDELKHALIK *et al.*, 2010; MENGONI *et al.*, 2015; BU *et al.*, 2020; YONG; QIU-LIANG, 2019).

1.2 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO - PWM

Em um sistema de acionamento a velocidade variável, uma questão de grande relevância é a estratégia de modulação PWM empregada para sintetizar, nas fases da máquina, a tensão desejada a partir dos níveis discretos de tensão que podem ser gerados pelo conversor estático. Diversas estratégias de modulação por largura de pulso foram propostas a fim de fornecer os sinais de disparo para o inversor trifásico de dois níveis (BLASKO, 1997; HOLMES, 1992; JACOBINA *et al.*, 2001; TZOU; HSU, 1997; NARAYANAN *et al.*, 2008; HARI; NARAYANAN, 2016; BOYS; HANDLEY, 1990). O principal objetivo da estratégia PWM é sintetizar as tensões ou correntes de saída em baixa frequência corretamente. Uma vez atendido o principal objetivo outros objetivos, tais como minimizar distorções harmônicas, minimizar perdas ou algum outro critério específico de desempenho são explorados e novas estratégias são propostas (TRZYNADLOWSKI *et al.*, 1997; TRZYNADLOWSKI *et al.*, 2001).

As estratégias PWM podem ser divididas em escalares e vetoriais (BLASKO, 1997; HOLMES, 1992; JACOBINA *et al.*, 2001).

1.2.1 Modulação por largura de pulso escalar

As estratégias escalares são baseadas na comparação entre sinais de referência por fase (modulantes) com sinais triangulares de alta frequência (portadoras), cujos cruzamentos definem os instantes de abertura e fechamento das chaves do inversor, como forma de sintetizar uma determinada tensão de referência a ser aplicada nas fases da máquina (HOLMES; LIPO, 2003). Na Fig. 5 é exemplificada uma forma de onda PWM obtida em uma das fases de um conversor de dois níveis a partir da comparação seno/triângulo. Nas estratégias escalares são definidas uma modulante por fase que são comparadas com uma ou mais portadoras.

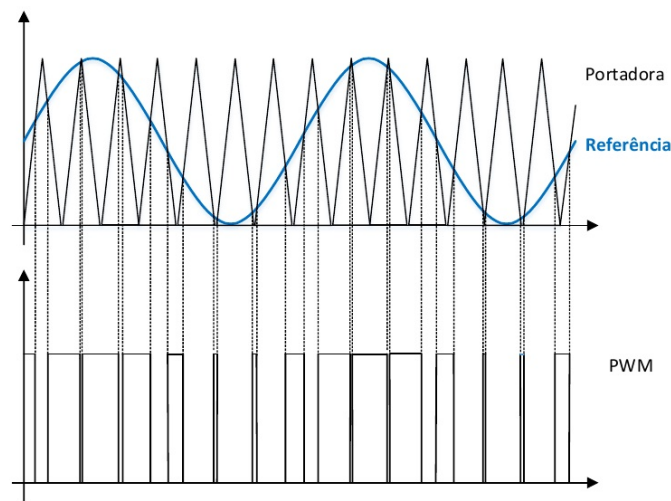


Figura 5 – Modulação PWM escalar do tipo seno/triângulo

1.2.2 Modulação por largura de pulso vetorial - SVPWM

As estratégias de modulação vetoriais (SVPWM) são baseadas em vetores espaciais de tensão. Todas as tensões de fase de referência (e as tensões que o inversor é capaz de aplicar instantaneamente à máquina) são observadas como componentes de um vetor espacial em uma base canônica. Utilizando uma matriz de mudança de base (Transformada de Clarke) tais vetores são representados de forma simplificada. O inversor é capaz de produzir um determinado número máximo de vetores e a estratégia SVPWM consiste na escolha apropriada de um determinado número de vetores dentre os vetores possíveis e na determinação do tempo de aplicação de cada um destes de maneira que um determinado vetor de referência seja aplicado corretamente à máquina (HOLMES; LIPO, 2003). As modulações vetoriais por largura de pulso SVPWM permitem uma análise mais completa das possibilidades que o sistema de acionamento pode oferecer.

No caso do inversor trifásico, por exemplo, as tensões de fase de referência e as tensões que o inversor é capaz de aplicar instantaneamente à carga podem ser vistas como vetores tri-dimensionais, sendo cada uma das tensões de fases uma coordenada da base canônica do $\mathbb{R}^3$. Aplicando a transformada de Clarke estes vetores passam a ser representados com apenas duas

dimensões, ou seja, podem ser observados num plano (KUNDUR, 1994). Um inversor trifásico de dois níveis é capaz de produzir oito vetores espaciais distintos que correspondem a cada uma das oito possíveis combinações de estados de chaveamento dos braços que formam o inversor. Na Fig. 6 são mostradas as oito possíveis combinações de estados de chaveamento de um inversor trifásico de dois níveis e na Fig. 7 são mostrados os oito vetores criados no plano. Observa-se que dos oito vetores, dois são nulos e seis são não nulos (chamados de vetores ativos).

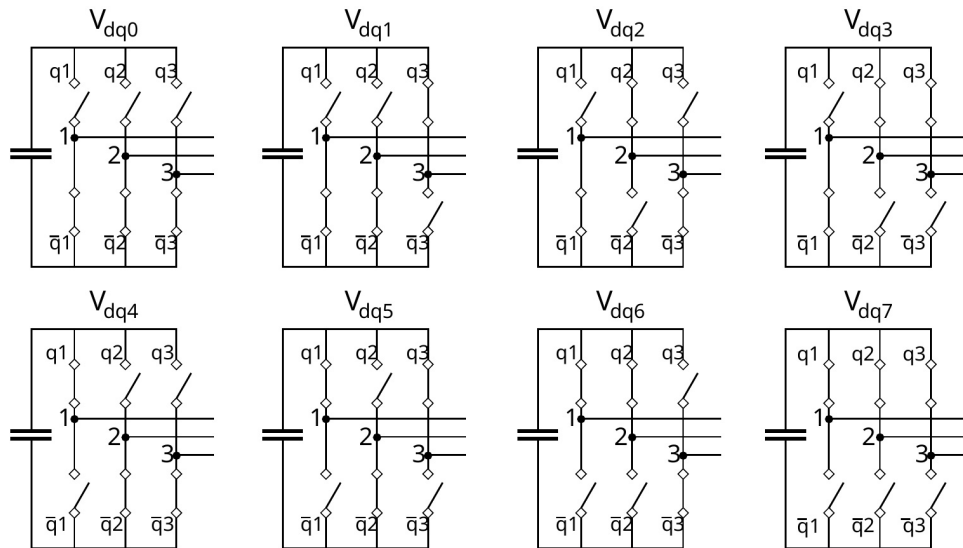


Figura 6 – Possíveis combinações de chaveamento em um inversor trifásico de dois níveis

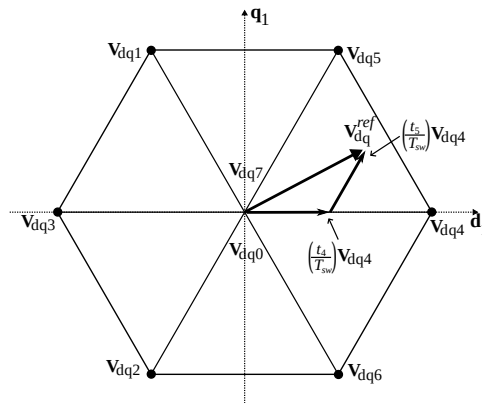


Figura 7 – Vetores criados por um inversor trifásico de dois níveis e utilização desses para sintetizar um vetor de referência

Dado um vetor de referência $\mathbf{V}_{dq}^{ref}$ ele pode ser escrito como a combinação linear de dois vetores ativos, conforme mostrado na Fig. 7 (HOLMES; LIPO, 2003). A modulação vetorial consiste em, dado um vetor de referência, escolher os vetores ativos e determinar o tempo de aplicação de cada um destes dentro de um período PWM constante de forma que o valor médio aplicado dentro do período PWM seja igual ao vetor de referência. No caso trifásico é facilmente observado na Fig. 7 que os vetores ativos a serem utilizados serão os dois adjacentes ao vetor de referência, neste caso, os vetores $\mathbf{V}_{dq4}$ e $\mathbf{V}_{dq5}$. Os tempos de aplicação destes vetores ativos,

τ_4 e τ_5 , dentro do período de chaveamento T_{sw} são encontrados a partir da solução da seguinte equação

$$\mathbf{V}_{dq}^{ref} = \frac{\tau_4}{T_{sw}} \mathbf{V}_{dq4} + \frac{\tau_5}{T_{sw}} \mathbf{V}_{dq5}, \quad (1.1)$$

que corresponderá a

$$\begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{d4} & v_{d5} \\ v_{q4} & v_{q5} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_d^{ref} \\ v_q^{ref} \end{bmatrix} T_{sw}. \quad (1.2)$$

Ou seja, a solução do PWM envolve a necessidade de inversão de matrizes. No caso trifásico, a matriz a ser invertida é uma matriz quadrada de ordem 2. Para esses casos, a inversão pode ser calculada utilizando a equivalência

$$\begin{bmatrix} v_{d4} & v_{d5} \\ v_{q4} & v_{q5} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{v_{d4}v_{q5} - v_{d5}v_{q4}} \begin{bmatrix} v_{q5} & -v_{d5} \\ -v_{q4} & v_{d4} \end{bmatrix}$$

Assim,

$$\begin{aligned} \tau_4 &= \frac{v_{q5}v_d^{ref} - v_{d5}v_q^{ref}}{v_{d4}v_{q5} - v_{d5}v_{q4}} \\ \tau_5 &= \frac{v_{d4}v_q^{ref} - v_{q4}v_d^{ref}}{v_{d4}v_{q5} - v_{d5}v_{q4}}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

Porém, para um número maior de fases, a matriz a ser invertida apresenta maior ordem e isto acarreta em uma maior complexidade nos cálculos.

O período de chaveamento consiste no tempo de aplicação de vetores ativos e nulos a fim de sintetizar um dado vetor de tensão de referência.

Os vetores ativos são aplicados por um intervalo total

$$\tau_{ativo} = \tau_4 + \tau_5, \quad (1.4)$$

e durante o restante do período de chaveamento são aplicados os vetores nulos,

$$\tau_{nulo} = T_{sw} - \tau_{ativo} \quad (1.5)$$

de maneira a seguir a tensão de referência, mas mantendo a frequência de chaveamento constante. Em geral divide-se o tempo de aplicação dos vetores nulos igualmente entre o início e o fim do período de chaveamento. Além disso, os vetores nulos a serem aplicados são escolhidos adequadamente de maneira a manter mínimo chaveamento entre vetores consecutivos.

1.2.3 SVPWM em sistemas com número de fases maior do que três

Em sistemas de acionamento de três fases a análise o SVPWM é bastante facilitada, uma vez que existem apenas seis vetores ativos em um espaço vetorial de duas dimensões. Porém, em sistemas com mais de três fases, existe um maior número de vetores ativos em um espaço vetorial cuja dimensão aumenta conforme cresce o número de fases, o que contribui muito para uma maior complexidade na análise do SVPWM. Por exemplo, em um sistema de acionamento de cinco fases existem 30 vetores ativos em um espaço de vetores de dimensão quatro. Nessas condições são definidos 120 setores onde o vetor de tensão de referência pode estar localizado. Um setor em um sistema com m_s fases é definido como sendo uma região do espaço de vetores delimitada por $m_s - 1$ vetores ativos. Estes vetores ativos que definem o setor correspondem aos $m_s - 1$ vetores ativos cujos coeficientes da combinação linear destes vetores que sintetiza o vetor de tensão de referência são positivos e a soma destes é máxima. Esse grande número de possibilidades e o aumento na dimensão do espaço de vetores dificultam a análise visual (LEGA *et al.*, 2008; BU *et al.*, 2020; DURAN *et al.*, 2007a).

Na figura 8 é ilustrado um dos 120 setores do acionamento de cinco fases. Estão ilustradas as projeções dos vetores que definem este setor nos dois planos ortogonais. Também se pode observar nesta figura as projeções da região na qual o vetor de referência deve estar localizado.

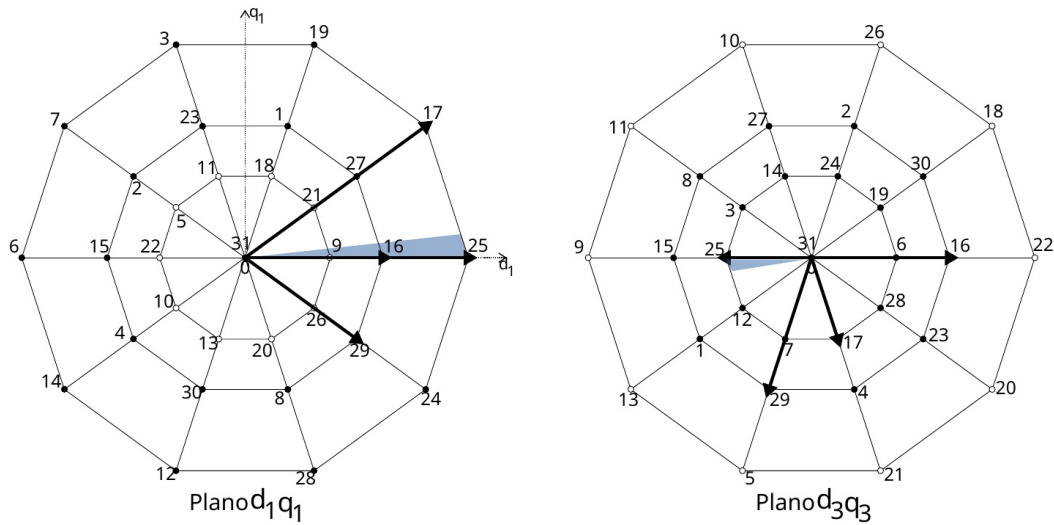


Figura 8 – Vetores criados por um inversor pentafásico quando a componente fundamental e a terceira componente harmônica são aplicadas à máquina

Para sistemas de acionamento de 5 fases uma análise visual do SVPWM ainda é possível com acionamento senoidal pois o vetor de tensão de referência percorre apenas 10 setores (CHINMAYA; SINGH, 2018; TOMASOV *et al.*, 2020). Um destes setores do acionamento senoidal é mostrado na figura 9. Estão ilustradas as projeções nos planos ortogonais dos vetores que definem o setor além da projeção da região na qual o vetor de referência deve estar localizado. Neste caso, como o acionamento é senoidal, o vetor de referência não tem projeção no plano d_3q_3 .

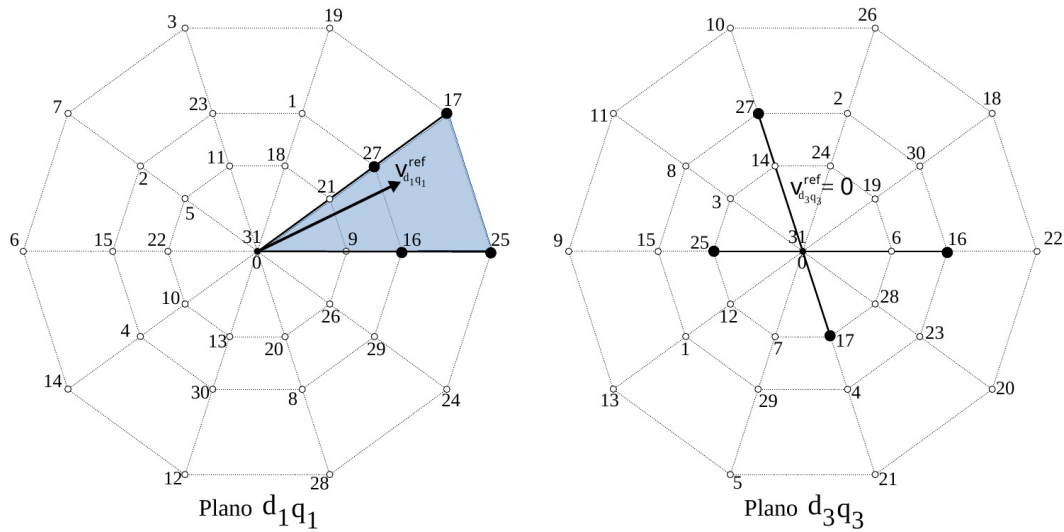


Figura 9 – Vetores criados por um inversor pentafásico de dois níveis e utilização desses para sintetizar um vetor de referência quando o acionamento é senoidal

Outro problema no SVPWM para sistemas de acionamento com mais de três fases é a necessidade de inversão de matrizes para o cálculo dos intervalos de tempo de aplicação de cada vetor ativo. Em (LEGA *et al.*, 2008) é apresentada uma análise SVPWM para o sistema de acionamento de cinco fases permitindo a injeção da terceira componente harmônica em que todos os setores em um sistema de cinco fases (120 setores) são armazenados em uma tabela de consulta juntamente com vetores denominados recíprocos para evitar a necessidade de inversão de matriz. No entanto, essa abordagem tem várias limitações, pois a tabela de consulta pode se tornar muito grande, e isto requer grande espaço de memória, especialmente se o número de fases for maior do que cinco. Além disso, o algoritmo para identificação do setor, que é acionado em tempo real, pode levar muito tempo para ser executado. Uma abordagem semelhante é apresentada em (CASADEI *et al.*, 2009) e uma maneira de identificar os setores com base nas tensões de fase é usada. Em (DURAN; LEVI, 2006) é apresentada uma interessante identificação vetorial das tensões em cada setor com base no produto escalar do vetor de tensão referência por todos os vetores normalizados pelos quadrados de seus módulos e sua implementação usando tabelas de consulta são discutidas em (DURAN *et al.*, 2007b).

Todos os métodos apresentados na literatura requerem a inversão de matrizes em tempo real ou então utilizam vetores recíprocos para evitar a necessidade por inversão de matrizes. Além de usarem tabelas de consulta para armazenar as informações dos setores. Neste trabalho é apresentada uma nova metodologia para identificar os vetores ativos que definem um setor onde o vetor de tensão de referência está localizado baseado nas tensões de fase de referência. A principal vantagem dessa metodologia proposta é a simplificação do processo, pois esta é feita com uma identificação direta. O método não se utiliza de tabelas de consulta e leva pouco tempo de processamento, o que faz com que operações em tempo real sejam factíveis. Uma outra importante contribuição do trabalho é a proposta de um algoritmo para cálculo dos intervalos de tempo de aplicação para cada vetor ativo que não necessita de vetores recíprocos ou inversão

de matrizes. Com a não necessidade de inversão de matrizes, problemas com matrizes próximas à singularidade são evitados.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Neste trabalho é apresentado um algoritmo geral de modulação PWM vetorial aplicada a inversores polifásicos de dois níveis acionando máquinas polifásicas com qualquer número ímpar de fases distribuídas simetricamente. As máquinas com número de fases par, normalmente do tipo assimétricas, não foram abordadas neste trabalho. O algoritmo proposto generaliza para qualquer máquina simétrica, com qualquer número ímpar de fases, a identificação dos vetores ativos que devem ser aplicados na sintetização de um dado vetor de referência, ou seja, identificam os setores do SVPWM. Esta identificação é realizada sem a necessidade de observação das projeções dos vetores nos diversos planos do espaço vetorial e ocorre de maneira simples e ágil. O método proposto não se utiliza de tabelas de consulta além de apresentar baixa demanda computacional, o que permite sua aplicação em tempo real. Uma segunda contribuição do trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo para cálculo dos intervalos de tempo de aplicação dos vetores ativos que não necessita de inversão de matrizes.

1.4 SINOPSE DOS CAPÍTULOS

Após as considerações deste capítulo inicial, o restante do documento é organizado conforme segue:

1. No capítulo 2 é apresentado o modelo da máquina;
2. No capítulo 3 é descrito o método proposto e feita uma comparação com métodos existentes;
3. No capítulo 4 é apresentada uma análise gráfica do método e são expostos os resultados de experimentos;
4. Nas capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e propostas para trabalhos futuros;
5. No apêndice é mostrado o método proposto para máquinas de cinco, sete, nove e onze fases.

CAPÍTULO II

MÁQUINAS POLIFÁSICAS E MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO

2.1 DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA MAGNETOMOTRIZ EM MÁQUINAS POLIFÁSICAS

A matriz de transformação para uma máquina com qualquer número de fases pode ser obtida a partir da distribuição de força magnetomotriz **FMM**. A distribuição de força magnetomotriz em máquinas de corrente alternada é bem discutida em (LIPO, 2017). Os enrolamentos das máquinas de corrente alternada são arranjos de tal forma que apenas as componentes harmônicas ímpares estão presentes na forma de onda. Para uma fase com q lados da bobina por polo por fase, a distribuição de força magnetomotriz é dada por:

$$f_{s1}(\theta_e) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{+\infty} \frac{4}{\pi} \frac{N_t i_{s1}}{2} \frac{k_h}{h} \sin(h\theta'_e), \quad (2.1)$$

onde θ'_e é o ângulo magnético medido a partir do centro do lado de bobina, conforme mostrado na Fig. 10 (caso particular de um enrolamento com quatro polos ($p = 2$) e dois lados da bobina por polo por fase ($q = 2$) arranjos em um estator de 48 ranhuras), N_t é o total de voltas nos q lados da bobina(Espiras), e k_h é o fator de bobina. O fator de bobina é uma composição do fator de distribuição k_{dh} , fator de passo da bobina k_{ph} , fator de skew k_{sh} e o fator de abertura de ranhura $k_{\chi h}$, que são dados por

$$k_h = k_{dh} k_{ph} k_{sh} k_{\chi h} \quad (2.2)$$

$$k_{dh} = \frac{\sin \frac{qh\gamma_e}{2}}{q \sin \frac{h\gamma_e}{2}}, \quad (2.3)$$

$$k_{ph} = \cos \frac{qh\gamma_e}{2}, \quad (2.4)$$

$$k_{\chi h} = \frac{\sin \frac{h\chi}{2}}{\frac{h\chi}{2}}, \quad (2.5)$$

$$k_{sh} = \frac{\sin \frac{h\alpha_s}{2}}{\frac{h\alpha_s}{2}}. \quad (2.6)$$

Uma fase k com a mesma distribuição de força magnetomotriz da fase 1, porém deslocada da fase 1 por um ângulo

$$\Delta\theta_e = \phi_k \quad (2.7)$$

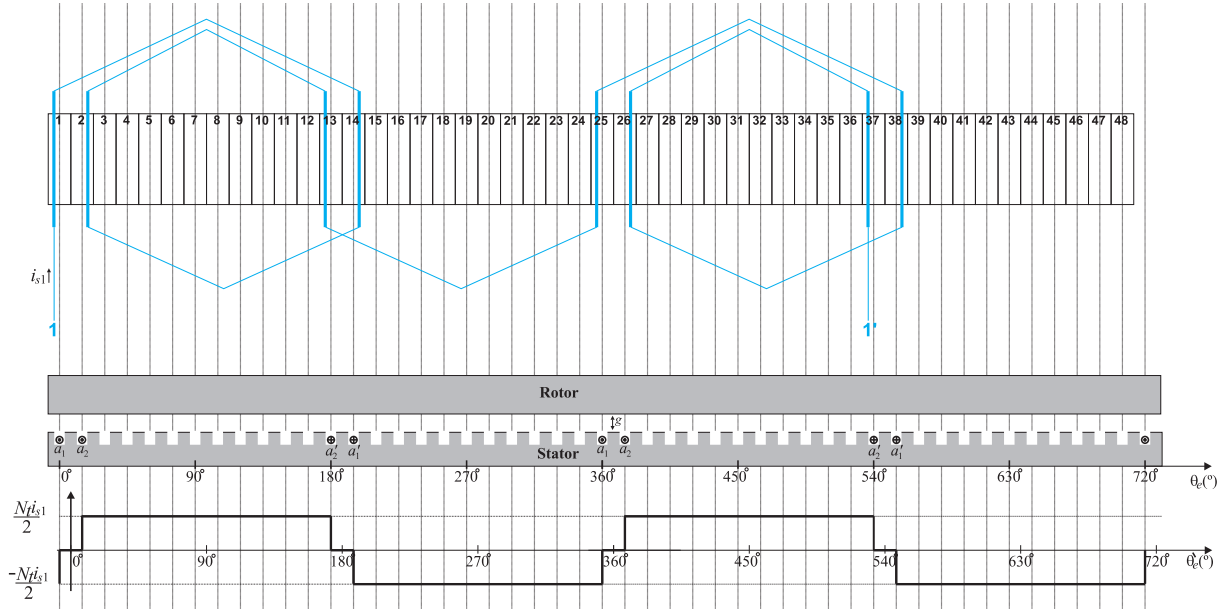


Figura 10 – Bobinas que formam uma fase do estator de uma máquina de corrente alternada com quatro polos $p = 2$ e com duas bobinas por polo por fase $q = 2$ alocadas em 48 ranhuras e distribuição de força magnetomotriz desta bobina ao longo do entreferro

terá uma distribuição de força magnetomotriz dada por

$$f_{sk}(\theta'_e) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{+\infty} \frac{4}{\pi} \frac{N_t i_{sk}}{2} \frac{k_h}{h} \sin(h(\theta'_e - \phi_k)). \quad (2.8)$$

2.1.1 FMM resultante no entreferro para um enrolamento com m_s fases no estator

Para m_s fases no estator com distribuições de força magnetomotriz dadas por (2.8), com $k = 1, 2, \dots, m_s$, a FMM resultante no entreferro é dada por:

$$\begin{aligned} f_s(\theta'_e) &= \sum_{k=1}^{m_s} f_{sk}(\theta'_e) \\ &= \sum_{k=1}^{m_s} \left[\sum_{h=1,3,5,\dots}^{+\infty} \frac{4}{\pi} \frac{N_t i_{sk}}{2} \frac{k_h}{h} \sin(h(\theta'_e - \phi_k)) \right] \\ &= \frac{4}{\pi} \frac{N_t}{2} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{+\infty} \frac{k_h}{h} \left[\left(\sum_{k=1}^{m_s} i_{sk} \cos h\phi_k \right) \sin h\theta'_e - \left(\sum_{k=1}^{m_s} i_{sk} \sin h\phi_k \right) \cos h\theta'_e \right] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Definindo

$$i_{s\alpha h} = \sum_{k=1}^{m_s} i_{sk} \cos h\phi_k \quad (2.10)$$

$$i_{s\beta h} = - \sum_{k=1}^{m_s} i_{sk} \sin h\phi_k, \quad (2.11)$$

a equação (2.9) pode ser escrita como

$$f_s(\theta'_e) = \frac{4}{\pi} \frac{N_t}{2} \sum_{h=1,3,5,\dots}^{+\infty} \frac{k_h}{h} (i_{s\alpha h} \sin h\theta'_e + i_{s\beta h} \cos h\theta'_e). \quad (2.12)$$

De (2.12) cada componente harmônica da *FMM* pode ser vista como dois sistemas de enrolamentos perpendiculares alimentados pelas correntes $i_{s\alpha h}$ e $i_{s\beta h}$, que são combinações lineares das correntes de fase. Essas combinações lineares, mostradas em (2.10)-(2.11) podem ser escritas matricialmente como:

$$i_{s\alpha h} = \mathbf{t}_{s\alpha h}^T \mathbf{i}_s \quad (2.13)$$

$$i_{s\beta h} = \mathbf{t}_{s\beta h}^T \mathbf{i}_s \quad (2.14)$$

onde,

$$\mathbf{t}_{s\alpha h}^T = \begin{bmatrix} 1 & \cos h\phi_2 & \cos h\phi_3 & \cdots & \cos h\phi_{m_s} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{t}_{s\beta h}^T = \begin{bmatrix} 0 & -\sin h\phi_2 & -\sin h\phi_3 & \cdots & -\sin h\phi_{m_s} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

e

$$\mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{s1} & i_{s2} & i_{s3} & \cdots & i_{sm_s} \end{bmatrix}^T. \quad (2.17)$$

A equação (2.12) indica que existe um número infinito de componentes $i_{s\alpha h}$ e $i_{s\beta h}$. No entanto, devido a periodicidade das funções *seno* e *coseno*, existe um número finito de vetores linearmente independentes $\mathbf{t}_{s\alpha h}^T$ e $\mathbf{t}_{s\beta h}^T$ em (2.15)-(2.16). De fato, os ângulos de defasagem ϕ_k da máquina são sempre escolhidos de tal forma que para uma máquina com m_s fases devem existir exatamente m_s vetores linearmente independentes $\mathbf{t}_{s\alpha h}^T$ e $\mathbf{t}_{s\beta h}^T$, portanto, existem apenas m_s componentes de corrente $i_{s\alpha h}$ e $i_{s\beta h}$ distintos em (2.12).

Uma máquina com número ímpar de fases m_s distribuídas de maneira simétrica ao longo do entreferro, conforme Fig. 11, onde ϕ_k ($k = 2, 3, \dots, m_s$) são os ângulos magnéticos defasados de cada fase da máquina para a fase 1, ou seja:

$$\phi_k = (k-1) \frac{2\pi}{m_s}, \quad k = 1, 2, \dots, m_s, \quad (2.18)$$

terá os termos (2.15)-(2.16) distintos para $h = 1, 3, 5, \dots, m_s-2$, e o termo (2.15) para $h = m_s$, que é a componente homopolar. Assim, as m_s correntes de fase são convertidas em m_s correntes $\alpha\beta$ pela seguinte matriz de transformação

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha 1}^s \\ i_{s\beta 1}^s \\ i_{s\alpha 3}^s \\ i_{s\beta 3}^s \\ \vdots \\ i_{s\alpha(m_s-2)}^s \\ i_{s\beta(m_s-2)}^s \\ i_{s\alpha m_s}^s \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{m_s}} \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{s\alpha 1}^T \\ \mathbf{t}_{s\beta 1}^T \\ \mathbf{t}_{s\alpha 3}^T \\ \mathbf{t}_{s\beta 3}^T \\ \vdots \\ \mathbf{t}_{s\alpha(m_s-2)}^T \\ \mathbf{t}_{s\beta(m_s-2)}^T \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{t}_{s\alpha m_s}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \\ i_{s4} \\ i_{s5} \\ \vdots \\ i_{sm_s} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Na Fig 11 é mostrado um enrolamento com m_s fases distribuídas simetricamente.

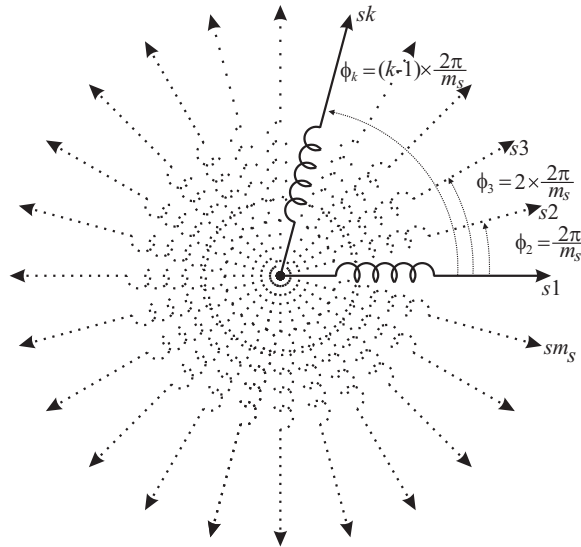


Figura 11 – Enrolamento com m_s fases distribuídas simetricamente

2.2 MODELO DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO POLIFÁSICA COM m_s FASES

Seja uma máquina de corrente alternada simétrica com número ímpar de fases m_s conectada em estrela e acionada por um inversor de dois níveis com mesmo número de fases conforme Fig. 12.

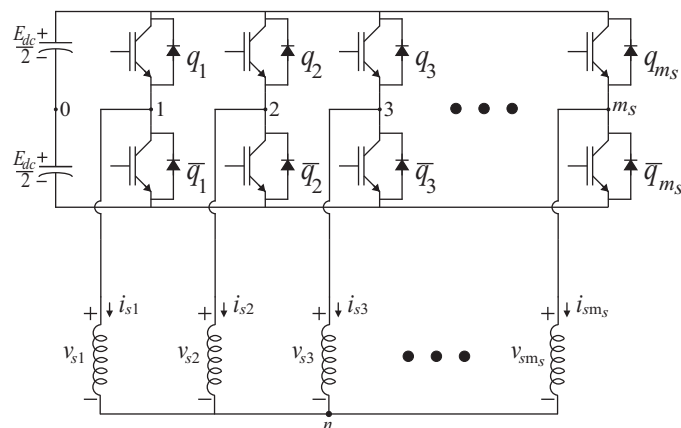


Figura 12 – Sistema de acionamento polifásico

Devido ao neutro flutuante, a componente homopolar da máquina é identicamente nula e o seu modelo transformado em variáveis dq pode ser representado em $\frac{m_s - 1}{2}$ planos ortogonais (FUDEH; ONG, 1983a), que no referencial estacionário para cada plano é dado por:

$$\hat{\lambda}_{sdqh}^s = l_{sh}\hat{i}_{sdqh}^s + l_{mh}\hat{i}_{rdqh}^s \quad (2.20)$$

$$\hat{\lambda}_{rdqh}^s = l_{rh}\hat{i}_{rdqh}^s + l_{mh}\hat{i}_{sdqh}^s \quad (2.21)$$

$$\hat{v}_{sdqh}^s = r_s\hat{i}_{sdqh}^s + j\omega_s\hat{\lambda}_{sdqh}^s + \frac{d\hat{\lambda}_{sdqh}^s}{dt} \quad (2.22)$$

$$0 = r_{rh}\hat{i}_{rdqh}^s + j(\omega_s - h\omega_r)\hat{\lambda}_{rdqh}^s + \frac{d\hat{\lambda}_{rdqh}^s}{dt} \quad (2.23)$$

$$c_e = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{m_s-2} phl_{mh} (i_{sqh}^s i_{rdh}^s - i_{sdh}^s i_{rqh}^s), \quad (2.24)$$

onde $\hat{\mathbf{x}}_{sdqh}^s = x_{sdh}^s + jx_{sqh}^s$ e $\hat{\mathbf{x}}_{rdqh}^s = x_{rdh}^s + jx_{rqh}^s$, com $h = 1, 3, 5, \dots, m_s - 2$.

As tensões, fluxos e correntes do estator em (2.20) a (2.24) podem ser convertidas para a referência dq por:

$$\begin{bmatrix} x_{sd1}^s \\ x_{sq1}^s \\ x_{sd3}^s \\ x_{sq3}^s \\ \vdots \\ x_{sd(m_s-2)}^s \\ x_{sq(m_s-2)}^s \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{m_s}} \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{sd1}^T \\ \mathbf{t}_{sq1}^T \\ \mathbf{t}_{sd3}^T \\ \mathbf{t}_{sq3}^T \\ \vdots \\ \mathbf{t}_{sd(m_s-2)}^T \\ \mathbf{t}_{sq(m_s-2)}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \\ x_{s3} \\ x_{s4} \\ x_{s5} \\ \vdots \\ x_{sm_s} \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

onde,

$$\mathbf{t}_{sdh}^T = \begin{bmatrix} 1 & \cos h\phi_2 & \cos h\phi_3 & \cdots & \cos h\phi_{m_s} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{t}_{sqh}^T = \begin{bmatrix} 0 & -\sin h\phi_2 & -\sin h\phi_3 & \cdots & -\sin h\phi_{m_s} \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Ou seja, uma máquina simétrica com número ímpar de fases m_s tem seu modelo vetorial representado por $(m_s - 1)/2$ planos, nos quais são mapeadas as primeiras $(m_s - 1)/2$ componentes harmônicas ímpares de fluxo. Cada plano pode ser alimentado por uma componente harmônica de tensão, sendo o torque total da máquina a soma dos torques produzidos em cada plano.

2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo foram apresentados, a partir da distribuição de força magnetomotriz, o modelo da máquina transformado em variáveis dq e a matriz de transformação para uma máquina simétrica com número ímpar de fases, que são necessários para se fazer a análise do SVPWM a ser apresentada no capítulo 3.

CAPÍTULO III

SVPWM EM SISTEMAS DE ACIONAMENTO DE MÁQUINAS POLIFÁSICAS COM NÚMERO ÍMPAR DE FASES

Indiquemos o estado de condução de cada chave do conversor no sistema da Fig. 12 pela variável binária q_k , $k = 1, 2, \dots, m_s$, ou seja, $q_k = 0$ ou 1 , onde $q_k = 0$ indica q_k em estado de bloqueio e $q_k = 1$ indica q_k em estado de condução. Portanto, existem 2^{m_s} possíveis vetores de tensão obtidos de (2.19),

$$\mathbf{V}_{dq n} = \mathbf{A}_s^T \mathbf{Q}_n E_{dc}, \text{ para } n = 0, 1, 2, 3, \dots, 2^{m_s} - 1. \quad (3.1)$$

Onde,

$$\mathbf{V}_{dq n} = \begin{bmatrix} v_{sd1} \\ v_{sq1} \\ v_{sd3} \\ v_{sq3} \\ \vdots \\ v_{sd(m_s-2)} \\ v_{sq(m_s-2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_s^T = \sqrt{\frac{2}{m_s}} \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{sd1}^T \\ \mathbf{t}_{sq1}^T \\ \mathbf{t}_{sd3}^T \\ \mathbf{t}_{sq3}^T \\ \vdots \\ \mathbf{t}_{sd(m_s-2)}^T \\ \mathbf{t}_{sq(m_s-2)}^T \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

e

$$\mathbf{Q}_n = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 & \dots & q_{m_s} \end{bmatrix}^T. \quad (3.3)$$

Substituindo (2.26) e (2.27) em (3.2), a matriz de transformação $\mathbf{A}_s^T$ para uma máquina simétrica com número de fases ímpar qualquer é na forma:

$$\mathbf{A}_s^T = \sqrt{\frac{2}{m_s}} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{1 \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \cos\left(\frac{1 \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \cos\left(\frac{1 \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{1 \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \sin\left(\frac{1 \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \sin\left(\frac{1 \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \\ 1 & \cos\left(\frac{3 \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \cos\left(\frac{3 \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \cos\left(\frac{3 \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{3 \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \sin\left(\frac{3 \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \sin\left(\frac{3 \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \\ 1 & \cos\left(\frac{5 \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \cos\left(\frac{5 \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \cos\left(\frac{5 \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{5 \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \sin\left(\frac{5 \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \sin\left(\frac{5 \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos\left(\frac{(m_s-2) \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \cos\left(\frac{(m_s-2) \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \cos\left(\frac{(m_s-2) \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{(m_s-2) \times 1 \times 2\pi}{m_s}\right) & \sin\left(\frac{(m_s-2) \times 2 \times 2\pi}{m_s}\right) & \dots & \sin\left(\frac{(m_s-2) \times (m_s-1) \times 2\pi}{m_s}\right) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Os vetores de tensão $\mathbf{V}_{dq n}$ são de dimensão $m_s - 1$, pois a componente homopolar v_{sdm_s} é identicamente nula. Portanto, $\mathbf{A}_s^T$ é a mesma matriz de transformação (2.19), porém, uma vez que a componenete homopolar é nula, esta linha da matriz é truncada.

O índice n usado em (3.1) para identificar o vetor ativo e seu padrão de chaveamento será definido como o valor decimal correspondente à palavra binária formada pelo padrão de chaveamento na ordem $q_1 q_2 q_3 \dots q_{m_s}$. Como um exemplo, num sistema de acionamento com cinco fases o vetor de tensão $\mathbf{V}_{dq13}$ é aquele no qual o padrão de chaveamento é $q_1 = 0, q_2 = 1, q_3 = 1, q_4 = 0$ e $q_5 = 1$, ou seja o vetor com o padrão de chaveamento dado por:

$$\mathbf{Q}_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (3.5)$$

Portanto, existem 2^{m_s} vetores de tensão disponíveis no sistema de acionamento, mostrado na Fig. 12, com m_s fases no estator. Os vetores obtidos com todas as chaves superiores no estado de condução

$$q_1 = q_2 = \dots = q_{m_s} = 1$$

e em estado de bloqueio

$$q_1 = q_2 = \dots = q_{m_s} = 0$$

são vetores identicamente nulos. Os outros $2^{m_s} - 2$ vetores são não nulos e todos diferentes uns dos outros, chamados vetores ativos. Portanto, existem 2^{m_s} vetores, dos quais 2 são vetores nulos e $2^{m_s} - 2$ são vetores ativos. O número de vetores ativos para sistemas de acionamento com até 15 fases é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de vetores ativos(NVA) para diferentes números de fases m_s em um sistemas de acionamento polifásicos

m_s	3	5	7	9	11	13	15
NVA	6	30	126	510	2.046	8.190	32.766

Dado um vetor de tensão de referência, o SVPWM consiste na escolha apropriada dos vetores ativos e nulos e na determinação dos intervalos de tempo de aplicação para cada um desses vetores de modo que o vetor de referência seja sintetizado.

O número de vetores de tensão ativos cresce exponencialmente a medida que o número de fases aumenta. Isso torna o SVPWM mais complexo. Por exemplo, o SVPWM para uma máquina de 15 fases apresenta 32.766 vetores de tensão ativos em um espaço de vetores de dimensão 14.

Um dado conjunto de tensões de fase de referência

$$\mathbf{V}_f^{ref} = \begin{bmatrix} v_{s1}^{ref} & v_{s2}^{ref} & v_{s3}^{ref} & \dots & v_{sm_s}^{ref} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

pode ser convertido para o espaço de vetores de referência dq ,

$$\mathbf{V}_{sdq}^{ref} = \begin{bmatrix} v_{sd1}^{ref} & v_{sq1}^{ref} & v_{sd3}^{ref} & v_{sq3}^{ref} & \dots & v_{sd(m_s-2)}^{ref} & v_{sq(m_s-2)}^{ref} \end{bmatrix}^T, \quad (3.7)$$

por

$$\mathbf{V}_{sdq}^{ref} = \mathbf{A}_s^T \mathbf{V}_f^{ref} \quad \text{e} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{V}_f^{ref} = \mathbf{A}_s \mathbf{V}_{sdq}^{ref}. \quad (3.9)$$

3.1 DEFINIÇÃO DOS VETORES ATIVOS QUE COMPÕEM OS SETORES

Já que o espaço de vetores tem dimensão $m_s - 1$, este é o número de vetores linearmente independentes necessários para formar um conjunto gerador para este espaço. Consequentemente, qualquer conjunto contendo $m_s - 1$ vetores ativos linearmente independentes forma um conjunto gerador. Para um vetor de referência em uma certa região do espaço de vetores existirá um conjunto gerador, composto por $m_s - 1$ vetores ativos, para o qual o vetor de referência, escrito como combinação linear deste conjunto gerador, possui todos os coeficientes positivos e, além disso, a soma destes coeficientes é máxima. Este conjunto gerador define uma região do espaço de vetores que será denominada de setor e, enquanto o vetor de tensão referência estiver localizado em um dado setor, aquele conjunto gerador em particular é utilizado para sintetizar o vetor de referência.

Um vetor de tensão de referência cruzará a fronteira entre dois setores quando uma certa tensão de fase de referência tornar-se maior ou menor que outra, ou seja, no cruzamento entre as tensões de fase de referência, conforme descrito em (CASADEI *et al.*, 2009). Consequentemente, este cruzamento entre as tensões de fase de referência pode ser usado para, de maneira imediata, identificar cada setor. Ordenando-se as tensões de fase de referência da maior para a menor tensão, cada uma destas possíveis combinações corresponde a um diferente setor. Este procedimento foi adotado neste trabalho. Por exemplo, em um sistema de acionamento trifásico, se as tensões de referência são tais que

$$v_{s3} \geq v_{s1} \geq v_{s2}, \quad (3.10)$$

o setor no qual o vetor de tensão de referência associado a estas tensões está localizado será identificado pelo número 312. É usada a notação NIS para designar o número de identificação do setor.

Portanto, o número total de setores em um sistema de acionamento com m_s fases será o número de permutações de m_s , ou seja, $m_s!$ (fatorial de m_s) (CASADEI *et al.*, 2009). O número total de vetores ativos e de setores para máquinas com até 15 fases são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Número de vetores ativos(NVA) e número de setores(NS) para diferentes números de fases m_s em um sistemas de acionamento polifásicos

m_s	3	5	7	9	11	13	15
NVA	6	30	126	510	2.046	8.190	32.766
NS	6	120	5.040	362.880	39.916.800	6.227.020.800	1.307.674.368.000

O número de vetores ativos cresce exponencialmente com o número de fases, enquanto o número total de setores cresce com o fatorial do número de fases. Portanto, embora a abordagem gráfica dos vetores ativos e setores para uma análise completa do SVPWM no caso trifásico seja muito simples(JACOBINA *et al.*, 2001; HOLTZ, 1994; HOLMES, 1992), no caso de sistemas polifásicos com

número de fases superior a três, esta visualização gráfica torna-se complexa, especialmente quando existe injeção harmônica no acionamento.

Se o número de fases é maior do que 9, o sistema decimal de numeração não é adequado para esta representação. Por exemplo se $m_s = 11$, o número de identificação do setor tornar-se-á confuso devido aos índices das fases v_{s10} e v_{s11} . Uma solução para este problema é usar um sistema de numeração com maior número de algarismos. Por exemplo, em sistemas de acionamento com número de fases $m_s = 11$, $m_s = 13$ e $m_s = 15$, o sistema hexadecimal pode ser usado para evitar-se confusão na numeração. Para ilustrar, seja uma máquina de onze fases e sejam as tensões de fase de referência em um dado instante dadas por

$$v_{s9} \geq v_{s3} \geq v_{s2} \geq v_{s1} \geq v_{s5} \geq v_{s10} \geq v_{s8} \geq v_{s7} \geq v_{s4} \geq v_{s11} \geq v_{s6}, \quad (3.11)$$

neste caso, o número de identificação do setor NIS usando sistema hexadecimal é dado por 93215A874B6.

Na Tabela 3 são mostrados a Ordenação das Tensões de Fase (OTF), o Número de Identificação do Setor (NIS) e a matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ para todos os seis setores de um sistema de acionamento trifásico e na Fig. 13 são mostradas estas mesmas informações no plano dq . As colunas da matriz Λ são os estados de chaveamento do conversor para cada um dos vetores ativos que definem o setor.

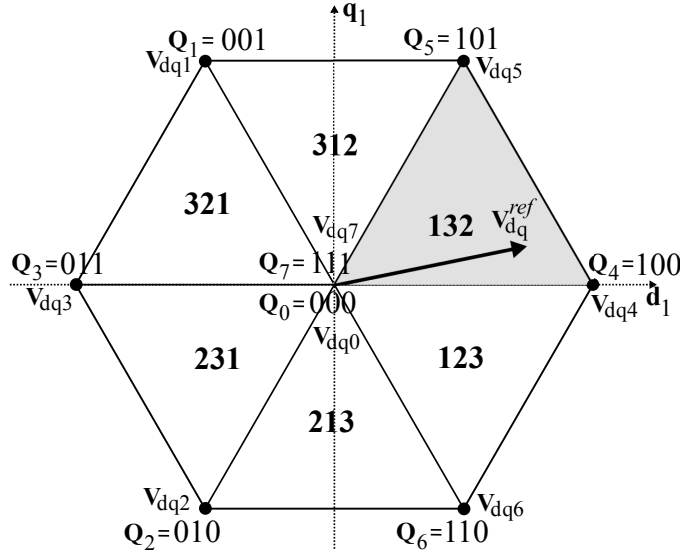
Tabela 3 – OTF, NIS, e as matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos (Λ) para todos os 6 setores em um sistema de acionamento trifásico

OTF	$v_{s2} \geq v_{s3} \geq v_{s1}$	$v_{s3} \geq v_{s2} \geq v_{s1}$	$v_{s3} \geq v_{s1} \geq v_{s2}$
NIS	231	321	312
$\Lambda = [Q^{(1)} Q^{(2)}]$	$\begin{matrix} Q_2^{(1)} & Q_3^{(2)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Q_1^{(1)} & Q_3^{(2)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Q_1^{(1)} & Q_5^{(2)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$
OTF	$v_{s1} \geq v_{s3} \geq v_{s2}$	$v_{s1} \geq v_{s2} \geq v_{s3}$	$v_{s2} \geq v_{s1} \geq v_{s3}$
NIS	132	123	213
$\Lambda = [Q^{(1)} Q^{(2)}]$	$\begin{matrix} Q_4^{(1)} & Q_5^{(2)} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Q_4^{(1)} & Q_6^{(2)} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Q_2^{(1)} & Q_6^{(2)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$

OTF - Ordenação das Tensões de Fase

NIS - Número de identificação do setor baseado na ordenação das tensões de fase

No caso trifásico, uma análise completa do PWM é possível a partir da observação do plano dq mostrado na Fig. 13, conforme discutido em (JACOBINA *et al.*, 2001; HOLTZ, 1994). Porém, esta visualização gráfica nem sempre é possível para sistemas com um número maior de fases, especialmente quando há injeção harmônica. Um sistema trifásico tem apenas seis setores, mas um sistema com 11 fases, por exemplo, tem aproximadamente quarenta milhões de setores e um sistema com 15 fases tem mais de 1,3 trilhões. Esta análise gráfica completa torna-se impossível, exceto para casos particulares, por exemplo, acionamento senoidal, porém, mesmo nestes casos a identificação dos vetores ativos que definem os setores é bastante complexa devido a quantidade de vetores ativos e planos.

Figura 13 – Plano d_1q_1 para sistema trifásico

3.1.1 Identificação dos vetores de tensão ativos que formam cada setor conforme literatura

A identificação dos 2 vetores de tensão ativos mais adequados para sintetizar um dado vetor de tensão de referência em um inversor trifásico é uma tarefa fácil. Uma simples observação da Fig. 13 permite concluir que os dois vetores ativos adjacentes ao vetor de referência é a escolha óbvia. Porém, esta identificação visual não é viável para um maior número de fases. A proximidade entre as projeções nos planos não necessariamente indiquem os vetores mais próximos, exceto para acionamento senoidal em que há apenas projeção do vetor de referência no plano d_1q_1 .

Tomemos por exemplo o acionamento de uma máquina de cinco fases. Na figura 14 são mostradas as projeções de um vetor de referência localizado no setor 15234 e as projeções dos vetores ativos que geram este setor em um sistema de acionamento com máquina pentafásica. Um vetor de referência localizado neste setor teria projeções sobre os planos d_1q_1 e d_3q_3 nas áreas sombreadas da figura. Peas projeções dos vetores ativos nos planos, observe que não é óbvio identificar quais são os 4 vetores ativos mais próximos ao vetor de referência a serem usados. De fato, olhando as projeções nos planos, tanto dos vetores ativos quanto do vetor de referência, aparentemente não revelam qualquer relação de proximidade.

Em (DURAN; LEVI, 2006) é apresentado um procedimento para identificação dos $m_s - 1$ vetores de ativos de tensão que definem cada setor onde o vetor de tensão de referência está localizado. Tal método consiste no produto interno entre o vetor de tensão de referência $\mathbf{V}_{dq}^{ref}$ e cada um dos $(2^{m_s} - 2)$ vetores ativos $\mathbf{V}_{dq n}$ normalizados pelo quadrado dos seus módulos, como mostrado em 3.12,

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\mathbf{V}_{dq}^{ref} \odot \mathbf{V}_{dq n}}{|\mathbf{V}_{dq n}|^2} \\ &= \frac{(\mathbf{V}_{dq}^{ref})^T \mathbf{V}_{dq n}}{|\mathbf{V}_{dq n}|^2}, \text{ para } n = 1, \dots, 2^{m_s} - 2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

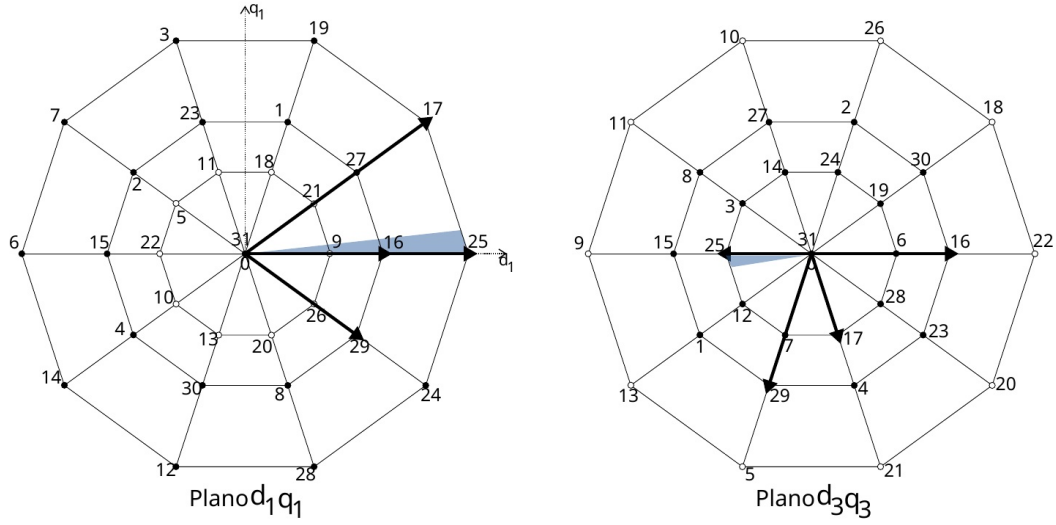


Figura 14 – Vetores criados por um inversor pentafásico quando a componente fundamental e a terceira componente harmônica são aplicadas à máquina

Os $m_s - 1$ vetores de tensão ativos com os maiores valores de σ_n em (3.12) definem um conjunto de $m_s - 1$ vetores linearmente independentes que compõem o setor. Essa identificação pode ser executada em tempo real. Porém, como a quantidade de vetores ativos pode se tornar muito grande dependendo da quantidade de fases, este cálculo precisaria ser efetuado uma enorme quantidade de vezes e isto requer elevado tempo de processamento. Os setores também podem ser identificados previamente e armazenados em tabelas de consulta (lookup table), o que pode ser uma boa opção caso haja grande limitação no processamento, porém esta técnica requer grandes espaços de memória, possivelmente não compatíveis com a maioria dos processadores digitais de sinais (DSP) usados em sistemas de acionamentos.

Os vetores ativos que definem um determinado setor podem ser arranjados como sendo as colunas de uma matriz $\mathbf{S}_e$ de ordem $(m_s - 1) \times (m_s - 1)$. A partir de (3.1) e (3.3), a matriz $\mathbf{S}_e$ para um setor particular é na forma:

$$\mathbf{S}_e = \mathbf{A}_s^T \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{(1)} & \mathbf{Q}^{(2)} & \mathbf{Q}^{(3)} & \dots & \mathbf{Q}^{(m_s-1)} \end{bmatrix} E_{dc}, \quad (3.13)$$

em que cada coluna $\mathbf{Q}^{(k)}$ é o padrão de chaveamento (3.3) de cada um dos vetores ativos do setor.

A ordem em que os vetores ativos ocupam as colunas da matriz $\mathbf{S}_e$ é escolhida neste trabalho da seguinte forma:

- A primeira coluna $\mathbf{Q}^{(1)}$ possui apenas um dos seus elementos igual a 1 sendo os demais $m_s - 1$ elementos iguais a 0;
- Na segunda coluna $\mathbf{Q}^{(2)}$ apenas dois elementos são iguais a 1 e os demais $m_s - 2$ elementos são iguais a 0;
- Na terceira coluna $\mathbf{Q}^{(3)}$ apenas três elementos são iguais a 1 com os demais $m_s - 3$ elementos iguais a 0;
- De uma maneira geral, a k -ésima coluna $\mathbf{Q}^{(k)}$ terá k elementos iguais a 1 e $m_s - k$ elementos iguais a 0;

- Até a última coluna $\mathbf{Q}^{(m_s-1)}$ na qual haverão $m_s - 1$ elementos iguais a 1 e apenas um elemento igual a 0.

Esta ordenação dos vetores ativos na matriz $\mathbf{S}_e$, que vai do vetor ativo do setor com apenas uma chave fechada até aquele com apenas uma chave aberta, é a mesma ordem de aplicação dos vetores ativos para sintetizar o vetor de referência. Isto garante que entre vetores consecutivos haverá a comutação de apenas uma chave.

A matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos que compõem cada setor, na ordem que os vetores são aplicados,

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{(1)} & \mathbf{Q}^{(2)} & \mathbf{Q}^{(3)} & \dots & \mathbf{Q}^{(m_s-1)} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

em (3.13), juntamente com o número de identificação do setor (Seção 3.1) definem completamente cada setor.

Na tabela 3 estão mostradas as matrizes $\mathbf{\Lambda}$ (3.14) o número de identificação do setor e a ordenação das tensões de fase em todos os seis setores de um sistema de acionamento trifásico. Já na tabela 4 estão mostradas as matrizes $\mathbf{\Lambda}$ para 3 dos 120 setores de um sistema de acionamento de cinco fases.

Tabela 4 – OTF, NIS e matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos ($\mathbf{\Lambda}$) em 3 dos 120 setores de um sistema de acionamento de cinco fases

OTF	$v_{s3} \geq v_{s4} \geq v_{s2} \geq v_{s5} \geq v_{s1}$	$v_{s4} \geq v_{s3} \geq v_{s5} \geq v_{s2} \geq v_{s1}$	$v_{s4} \geq v_{s5} \geq v_{s3} \geq v_{s1} \geq v_{s2}$
NIS	34251	43521	45312
$\mathbf{\Lambda} = [\mathbf{Q}^{(1)} \mathbf{Q}^{(2)} \mathbf{Q}^{(3)} \mathbf{Q}^{(4)}]$	$\begin{matrix} Q_4^{(1)} & Q_6^{(2)} & Q_{14}^{(3)} & Q_{15}^{(4)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Q_2^{(1)} & Q_6^{(2)} & Q_7^{(3)} & Q_{15}^{(4)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Q_2^{(1)} & Q_6^{(2)} & Q_7^{(3)} & Q_{23}^{(4)} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$

OTF - Ordenação das Tensões de Fase

NIS - Número de identificação do setor baseado na ordenação das tensões de fase

Na tabela 5 são mostradas todas as 120 matrizes $\mathbf{\Lambda}$ para todos os 120 setores de um sistema de acionamento de cinco fases.

Para aplicações em tempo real, o padrão de chaveamento dos vetores ativos que definem cada um dos setores são armazenados em tabelas de consulta. Durante a operação, uma vez identificado o setor no qual o vetor de referência está localizado, a tabela de consulta é acessada fornecendo a informação a cerca dos vetores ativos que devem ser aplicados. Entretanto, a medida que o número de fases se eleva o número de setores torna-se incrivelmente grande. Por exemplo, a máquina de cinco fases possui 120 setores, já uma máquina de nove fases o número de setores aproxima-se dos quarenta milhões (o número exato é 39.916.800), com quinze fases este número é superior a um trilhão de setores. Portanto, armazenar todas estas informações em uma tabela se torna impraticável para aplicações em tempo real devido à grande quantidade de memória necessária. Neste trabalho é mostrado, a partir de observações, que a matriz contendo o padrão de chaveamento dos vetores ativos que compõem cada setor (3.14) pode ser construída diretamente a partir do número de identificação do setor (Seção 3.1), evitando-se a necessidade de armazenamento dessas tabelas.

Tabela 5 – NIS e matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ em todos os 120 setores de um sistema de acionamento de cinco fases

NIS	54321				54312				54231				54213				54132				54123			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1		
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
NIS	53421				53412				53241				53214				53142				53124			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1		
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
NIS	52431				52413				52341				52314				52143				52134			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1		
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
NIS	51432				51423				51342				51324				51243				51234			
A	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1			
	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
NIS	45321				45312				45231				45213				45132				45123			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1		
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
NIS	43521				43512				43251				43215				43152				43125			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1		
	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
NIS	42531				42513				42351				42315				42153				42135			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1		
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
NIS	41532				41523				41352				41325				41253				41235			
A	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1			
	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
NIS	35421				35412				35241				35214				35142				35124			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1			
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
NIS	34521				34512				34251				34215				34152				34125			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1			
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1			
	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0			

NIS - Número de identificação do setor baseado na ordenação das tensões de fase

Continuação da Tabela 5 - NIS e matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ em todos os 120 setores de um sistema de acionamento de cinco fases

NIS	32541				32514				32451				32415				32154				32145			
A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1		
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1		
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
NIS	31542				31524				31452				31425				31254				31245			
A	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1		
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
NIS	25431				25413				25341				25314				25143				25134			
A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1			
NIS	24531				24513				24351				24315				24153				24135			
A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1			
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
NIS	23541				23514				23451				23415				23154				23145			
A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
NIS	21543				21534				21453				21435				21354				21345			
A	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
NIS	15432				15423				15342				15324				15243				15234			
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1			
NIS	14532				14523				14352				14325				14253				14235			
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1			
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
NIS	13542				13524				13452				13425				13245				13254			
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
NIS	12543				12534				12453				12435				12354				12345			
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1			
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0			
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1			
	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0			

NIS - Número de identificação do setor baseado na ordenação das tensões de fase

3.2 MÉTODO PROPOSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DOS VETORES DE TENSÃO ATIVOS QUE DEFINEM OS SETORES

O método proposto foi desenvolvido a partir da observação das matrizes Λ (3.14), do Número de Identificação do Setor (NIS) e da ordenação das tensões de fase para o caso do sistema de acionamento

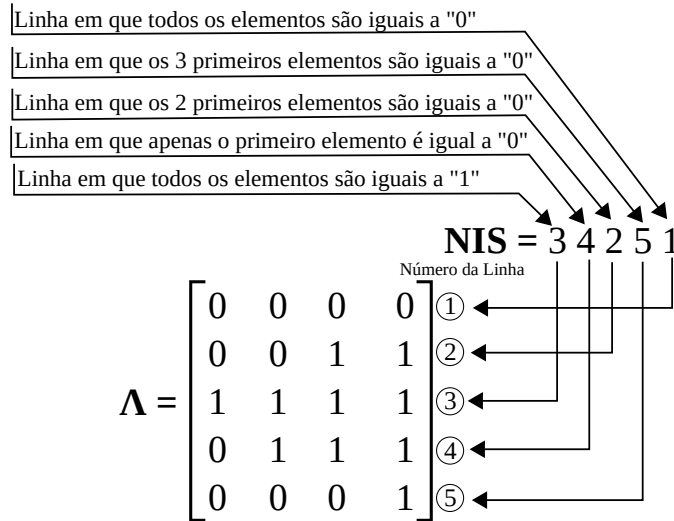


Figura 15 – Identificação da matriz Λ para um sistema de acionamento com máquina de 5 fases para um vetor de tensão de referência localizado no setor identificado por NIS = 34251

trifásico, mostrados na Tabela 3, e para o caso do sistema de acionamento de cinco fases, mostrados na Tabela 5. Observa-se uma relação entre a matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ e o Número de Identificação do Setor (NIS), de forma que a matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos pode ser construída diretamente do NIS. Observe que cada algarismo do NIS e a ordem que eles aparecem definem uma lei de formação para a matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ , lei esta que pode ser definida da seguinte forma:

- O primeiro algarismo do número de identificação do setor identifica o número da linha da matriz Λ na qual todos os $m_s - 1$ elementos são iguais a 1;
- O segundo algarismo identifica a linha de Λ na qual o primeiro elemento é igual a 0 e os $m_s - 2$ demais elementos são iguais a 1;
- O terceiro algarismo identifica a linha de Λ na qual dos dois primeiros elementos são iguais a 0 e os $m_s - 3$ demais elementos são iguais a 1;
- De uma forma geral, seja um número inteiro k , com $1 \leq k \leq m_s$, então o k -ésimo algarismo do número de identificação do setor identifica a linha de Λ na qual os primeiros $k - 1$ elementos são iguais a 0 e os $m_s - k + 1$ demais são iguais a 1;
- Esta metodologia continua até o último algarismo do número de identificação do setor que identifica a linha na qual todos os $m_s - 1$ elementos são iguais a 0.

Na Figura 15 é ilustrado este procedimento para o setor cujo NIS é 34251 para uma máquina de cinco fases, como mostrado na Tabela 5. Portanto, dado o número de identificação do setor, a matriz Λ pode ser obtida diretamente pela lei de formação anterior sem a necessidade de armazenamento destes padrões de chaveamento em tabelas.

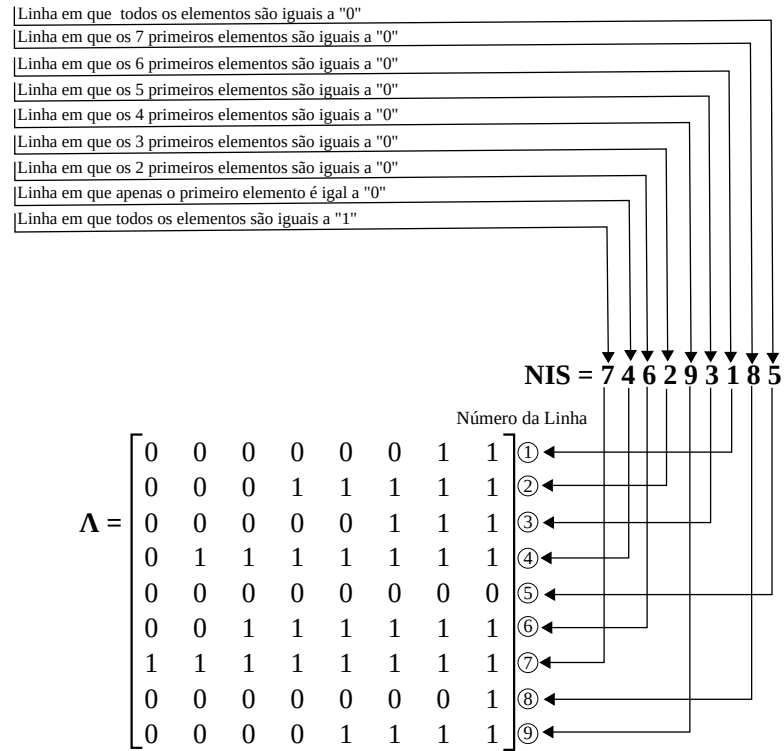


Figura 16 – Identificação da matriz Λ para um sistema de acionamento de 9 fases para um vetor de tensão de referência localizado no setor de NIS = 746293185

Na Figura 16 é ilustrado o procedimento proposto para o setor cujo NIS é 746293185 para uma máquina de nove fases.

Portanto, para uma máquina com qualquer número de fase, a matriz Λ pode ser obtida diretamente pela lei de formação anterior, através do número de identificação do setor, sem a necessidade de armazenamento destes padrões de chaveamento em tabelas.

3.3 CÁLCULO DO TEMPO DE APLICAÇÃO DOS VETORES ATIVOS

Dado um vetor de tensão de referência $\mathbf{V}_{dq}^{ref}$ (3.7) a ser aplicado à máquina, o setor onde este está localizado pode ser determinado obtendo-se as tensões de referência (3.6) até (3.9) e observando o NIS pela ordenação das tensões, como descrito na Seção 3.1. Do NIS, a matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ é identificada como descrito na Seção 3.2. Então, a matriz dos vetores de tensão $\mathbf{S}_e$ é calculada por (3.13). Como $\mathbf{S}_e$ é uma matriz quadrada de posto completo (invertível), o intervalo de tempo de aplicação de cada vetor em $\mathbf{S}_e$ é determinado por:

$$\mathbf{S}_e \mathbf{D}_e = \mathbf{V}_{dq}^{ref} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{D}_e = \mathbf{S}_e^{-1} \mathbf{V}_{dq}^{ref} \quad (3.16)$$

onde,

$$\mathbf{D}_e = \begin{bmatrix} d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{n(m_s-2)} & d_{n(m_s-1)} \end{bmatrix}^T \quad (3.17)$$

e d_{nk} ($k = 1, 2, 3, \dots, m_s - 1$) em (3.17) são as razões cíclicas para cada vetor. O intervalo de tempo de aplicação para cada vetor ativo, em segundos, é dado por

$$\tau_{nk} = d_{nk} T_{sw}, \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, m_s - 1. \quad (3.18)$$

Em (LEGA *et al.*, 2008; CASADEI *et al.*, 2009) é mostrada uma maneira de evitar a inversão de matriz em (3.16). Para isto, faz-se necessária a utilização de vetores recíprocos, que consiste na decomposição de um vetor em componentes ao longo das direções dos vetores tangentes. Pode-se também utilizar uma base composta por vetores normais, chamada de base recíproca, e os vetores que formam esta base são denominados vetores recíprocos. Porém, para a utilização de vetores recíprocos, além de ser necessário encontrá-los, também é necessário armazená-los em tabelas de consulta para operação em tempo real. Então, além de capacidade de processamento, esse método requer espaço de armazenamento.

Neste trabalho uma solução mais simples, que não requer a inversão de matrizes e nem armazenamento de dados em tabelas é apresentada a seguir.

3.4 MÉTODO PROPOSTO PARA CÁLCULO DOS TEMPOS DE APLICAÇÃO DOS VETORES ATIVOS

O método consiste em evitar a necessidade de se realizar a operação de inversão de matriz em tempo real na equação (3.15). Se multiplicarmos ambos os lados desta equação (3.15) por $\mathbf{S}_e^T$, a equação (3.16) torna-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_e \mathbf{D}_e &= \mathbf{V}_{dq}^{ref} \\ \mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e \mathbf{D}_e &= \mathbf{S}_e^T \mathbf{V}_{dq}^{ref} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{D}_e = (\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} \mathbf{S}_e^T \mathbf{V}_{dq}^{ref}. \quad (3.20)$$

Numericamente, a solução da equação (3.20) é a mesma da equação mostrada em (3.16). Entretanto, devido a simetria existente nos setores, a matriz $(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1}$ será a mesma para todos os setores, como é demonstrado a seguir neste trabalho. Consequentemente, a solução (3.20) torna-se muito mais simples já que a inversão de matrizes será evitada.

A partir de (3.13), a matriz $\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e$ é dada por

$$\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{(1)T} \\ \mathbf{Q}^{(2)T} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}^{(m_s-1)T} \end{bmatrix} \mathbf{A}_s \mathbf{A}_s^T \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{(1)} & \mathbf{Q}^{(2)} & \dots & \mathbf{Q}^{(m_s-1)} \end{bmatrix} E_{dc}^2. \quad (3.21)$$

Mas,

$$\mathbf{A}_s \mathbf{A}_s^T = \mathbf{I}_{m_s-1} - \frac{1}{m_s} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{(m_s-1) \times (m_s-1)}, \quad (3.22)$$

onde $\mathbf{I}_{m_s-1}$ é a matriz identidade de ordem $(m_s - 1)$.

Então, $\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e$ para qualquer setor é dada por (3.23).

$$\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e = \frac{E_{dc}^2}{m_s} \begin{bmatrix} m_s-1 & m_s-2 & m_s-3 & m_s-4 & m_s-5 & m_s-6 & m_s-7 & \cdots & 1 \\ m_s-2 & 2(m_s-2) & 2(m_s-3) & 2(m_s-4) & 2(m_s-5) & 2(m_s-6) & 2(m_s-7) & \cdots & 2 \\ m_s-3 & 2(m_s-3) & 3(m_s-3) & 3(m_s-4) & 3(m_s-5) & 3(m_s-6) & 3(m_s-7) & \cdots & 3 \\ m_s-4 & 2(m_s-4) & 3(m_s-4) & 4(m_s-4) & 4(m_s-5) & 4(m_s-6) & 4(m_s-7) & \cdots & 4 \\ m_s-5 & 2(m_s-5) & 3(m_s-5) & 4(m_s-5) & 5(m_s-5) & 5(m_s-6) & 5(m_s-7) & \cdots & 5 \\ m_s-6 & 2(m_s-6) & 3(m_s-6) & 4(m_s-6) & 5(m_s-6) & 6(m_s-6) & 6(m_s-7) & \cdots & 6 \\ m_s-7 & 2(m_s-7) & 3(m_s-7) & 4(m_s-7) & 5(m_s-7) & 6(m_s-7) & 7(m_s-7) & \cdots & 7 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & \cdots & (m_s-1) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

A matriz inversa de $\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e$ em (3.23) pode ser facilmente encontrada usando o método do escalonamento fazendo a seguinte operação em cada uma das k linhas da matriz

$$\mathbf{l}_k = \frac{1}{m_s} \left(\frac{k+1}{k} \mathbf{l}_k - k \mathbf{l}_{k+1} - \sum_1^{k-1} k \mathbf{l}_k \right), \quad (3.24)$$

onde $\mathbf{l}_k$ é a k -ésima linha da matriz $\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e$ em (3.23).

Ao final do processo de escalonamento, a matriz inversa é encontrada como sendo:

$$(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} = \frac{1}{E_{dc}^2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}_{(m_s-1) \times (m_s-1)}. \quad (3.25)$$

Como a matriz em (3.25) é uma matriz constante o cálculo dos tempos de aplicação dos vetores ativos (3.20) não necessita de inversão de matrizes ou da utilização de vetores recíprocos.

É possível observar que $\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e$ é o produto interno de cada um dos vetores ativos que definem o setor por todos os outros vetores que definem aquele setor, incluindo o produto interno por ele mesmo. O produto interno do vetor por ele mesmo forma a diagonal principal da matriz. O resultado (3.23) sugere que os vetores ativos que formam o setor estão igualmente espaçados entre si. Este fato é facilmente observado no caso trifásico, no qual os setores consistem de dois vetores ativos que delimitam cada setor, possuem mesma amplitude e formam entre si um ângulo de 60° .

Apenas para exemplificar, a partir de (3.23), a matriz $\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e$ para todos os seis setores de um sistema de acionamento trifásico é dada por:

$$\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} E_{dc}^2, \quad (3.26)$$

e sua inversa a partir de (3.25) é dada por:

$$(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2}. \quad (3.27)$$

Ainda como exemplo, a partir de (3.23), a matriz $\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e$ para um sistema de acionamento penta-fásico em todos os 120 setores é dada por:

$$\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 4 & 3 & 2 & 1 \\ 3 & 6 & 4 & 2 \\ 2 & 4 & 6 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} E_{dc}^2, \quad (3.28)$$

e sua matriz inversa, a partir de (3.25) é dada por:

$$(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2}. \quad (3.29)$$

3.5 ALGORITMO PARA O MÉTODO PROPOSTO

O método proposto pode ser aplicado a um sistema com número ímpar qualquer de fases sem a necessidade de prévia construção de tabelas com os vetores ativos e setores ou do cálculo de matrizes inversas para determinação do tempo de aplicação de cada vetor ativo. Na Figura 17 é mostrado um diagrama de blocos contendo cada passo do método SVPWM proposto.

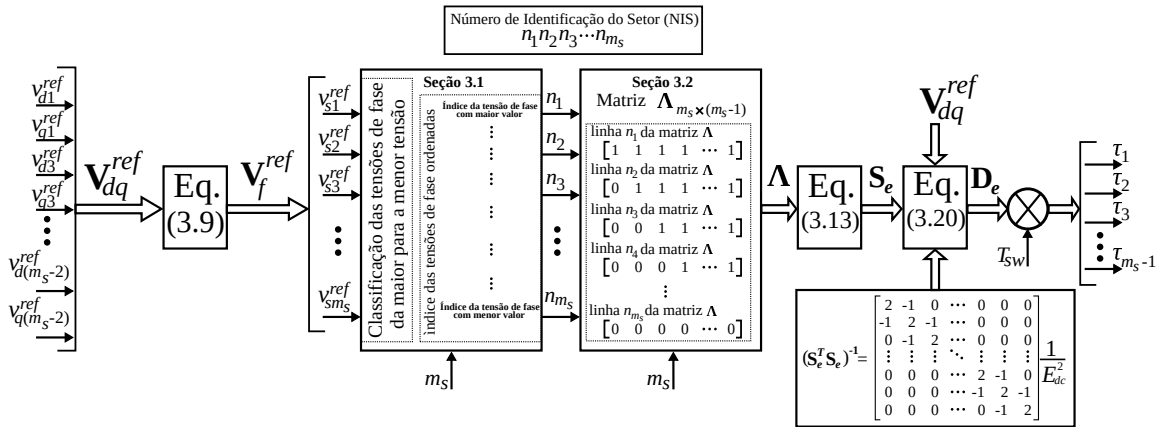


Figura 17 – Diagrama de blocos do método SVPWM polifásico proposto

O diagrama de blocos da Figura 17 consiste em:

- 1) O sistema de controle da máquina (ou em malha aberta), define as componentes do vetor de tensão de referência $\mathbf{V}_{dq}^{ref}$ (3.7).
- 2) As componentes do vetor de tensão de referência são convertidas em tensões de fase de referência (3.6) pela equação (3.9).

3) As tensões de fase de referência são ordenadas da máxima tensão para a mínima, conforme descrito na Seção 3.1. Os índices das tensões de fase formam, nesta mesma ordem, o número de identificação do setor (NIS), que corresponderá a um número com m_s algarismos. Os algarismos mostrados na Fig. 17 são:

- n_1 , que é o índice da fase cuja tensão é máxima entre todas as tensões;
- n_2 é o índice da fase cuja tensão é máxima entre as $m_s - 1$ tensões de fase restantes;
- n_3 é o índice da fase cuja tensão é máxima entre as $m_s - 3$ tensões de fase restantes;
- Até n_{m_s} que é o índice da fase cuja tensão é a mínima entre todas.

O número de identificação é formado como sendo $n_1 n_2 n_3 \cdots n_{m_s}$.

4) A partir do número de identificação do setor (NIS), a matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos $\mathbf{\Lambda}$ pode ser construída como descrito na Seção 3.2. Observe que a matriz $\mathbf{\Lambda}$ contém m_s linhas e $m_s - 1$ colunas:

- A linha de número igual a do primeiro algarismo do NIS (linha n_1) possui todos os seus $m_s - 1$ elementos iguais a 1;
- A linha n_2 terá o elemento da primeira coluna igual a 0 e os demais $m_s - 2$ elementos iguais a 1;
- A linha n_3 terão os elementos da primeira e segunda colunas iguais a 0 e os demais $m_s - 3$ elementos iguais a 1;
- Até a linha de número n_{m_s} que terá todos os seus elementos iguais a 0.

Em outras palavras, para $k = 1, 2, \cdots, m_s$, a linha de número igual a n_k da matriz $\mathbf{\Lambda}$ tem os elementos da primeira coluna até a $(k - 1)$ -ésima coluna iguais a 0 e os elementos da coluna k até a coluna $m_s - 1$ iguais a 1.

- 5) A partir da equação (3.13) as componentes dos vetores ativos que definem o setor (matriz $\mathbf{S}_e$) podem ser determinadas.
- 6) As razões cíclicas ($\mathbf{D}_e$) para cada vetor ativo podem ser determinados (3.20) além dos intervalos de tempo de aplicação $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \cdots, \tau_{m_s-1}$.
- 7) O período de chaveamento é completado aplicando-se vetores nulos. Em geral, o intervalo de aplicação dos vetores nulos é dividido igualmente entre o início e fim do período de chaveamento. Além disso, o vetor nulo aplicado imediatamente antes do primeiro vetor ativo é aquele no qual todas as chaves estão em estado 0 e o vetor nulo aplicado imediatamente após o último vetor ativo do setor é aquele com todos os estados das chaves em 1. Isto garantirá a comutação de apenas uma chave entre vetores consecutivos. Além disso, para manter uma única comutação entre vetores consecutivos, a ordem de aplicação dos vetores ativos é invertida ao final de cada período de chaveamento.

3.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo foi apresentado o algoritmo proposto para análise SVPWM para máquinas de acionamento com número ímpar de fases. Este algoritmo consiste:

- Na identificação dos vetores ativos que sintetizam um vetor de tensão de referência localizado em qualquer setor além dos padrões de chaveamento, se utilizando apenas do número de identificação do setor, sem haver necessidade de armazenamento de dados em tabelas ou grande capacidade de processamento;
- E no cálculo dos períodos de aplicação de cada um dos vetores no processo de chaveamento sem a necessidade da inversão de matrizes ou armazenamento de dados em tabelas.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DO MÉTODO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 ANÁLISE GRÁFICA

Como forma de observar o funcionamento do método proposto, pode-se tomar alguns vetores de referência para alguns casos particulares. Serão observados dois casos particulares para o acionamento de uma máquinas de cinco fases e outra de nove fases. Serão seguidos o passo a passo do algoritmo proposto e mostrado na Fig. 17.

4.1.1 Exemplos para o caso de cinco fases

Exemplo 01

Seja um certo vetor de tensão de referência cujas componentes são dadas por:

$$\begin{aligned} v_{sd1}^{ref} &= 0.65E_{dc} & v_{sd3}^{ref} &= -0.11E_{dc} \\ v_{sq1}^{ref} &= 0.24E_{dc} & v_{sq3}^{ref} &= -0.20E_{dc} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Na Fig. 18 é mostrado cada passo do algoritmo da Fig. 17 até a identificação da matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ , que corresponde aos vetores ativos que devem ser usados para sintetizar o dado vetor de referência. Na Fig. 19 é mostrada a ilustração gráfica das projeções do vetor de tensão de referência nos planos d_1q_1 e d_3q_3 do exemplo 01, além das projeções de todos os vetores ativos no sistema pentafásico com destaque para os vetores que definem o setor.

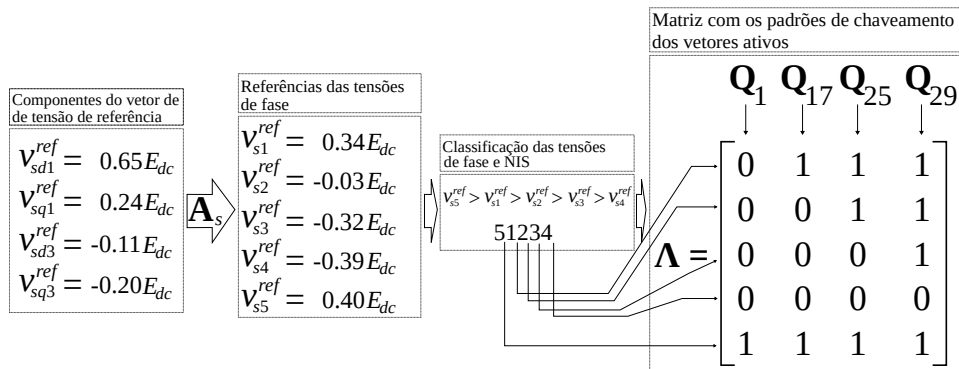


Figura 18 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no Exemplo 01 em um sistema pentafásico

Para o cálculo dos tempos de aplicação dos vetores ativos para o Exemplo 01, temos que

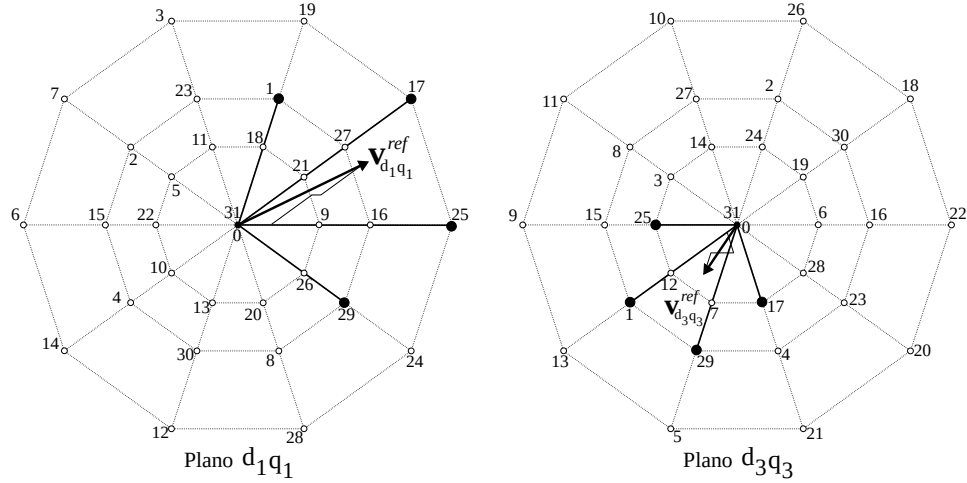


Figura 19 – Visualização gráfica dos vetores de tensão para o Exemplo 01

$$\mathbf{S}_e^T = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.60 & -0.51 & -0.37 \\ 0.83 & 0.60 & 0.12 & -0.37 \\ 1.02 & 0 & -0.39 & 0 \\ 0.51 & -0.37 & -0.2 & -0.60 \end{bmatrix} E_{dc}$$

e

$$(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2}.$$

Assim

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_e &= (\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} \mathbf{S}_e^T \mathbf{V}_{dq}^{ref} \\ &= \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2} \begin{bmatrix} 0.2 & 0.60 & -0.51 & -0.37 \\ 0.83 & 0.60 & 0.12 & -0.37 \\ 1.02 & 0 & -0.39 & 0 \\ 0.51 & -0.37 & -0.2 & -0.60 \end{bmatrix} E_{dc} \begin{bmatrix} 0.65 \\ 0.24 \\ -0.11 \\ -0.20 \end{bmatrix} E_{dc} \\ &= \begin{bmatrix} 0.06 \\ 0.38 \\ 0.29 \\ 0.06 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Na figura 20 estão ilustradas as posições das chaves para aplicação dos vetores ativos e nulos, bem como a ordem de aplicação, a fim de sintetizar o vetor de referência dado no exemplo 01.

Na figura 21 pode-se observar o processo de chaveamento com a ordem de aplicação de cada vetor e o percentual de tempo do período de PWM a fim de sintetizar o vetor de referência dado no exemplo 01.

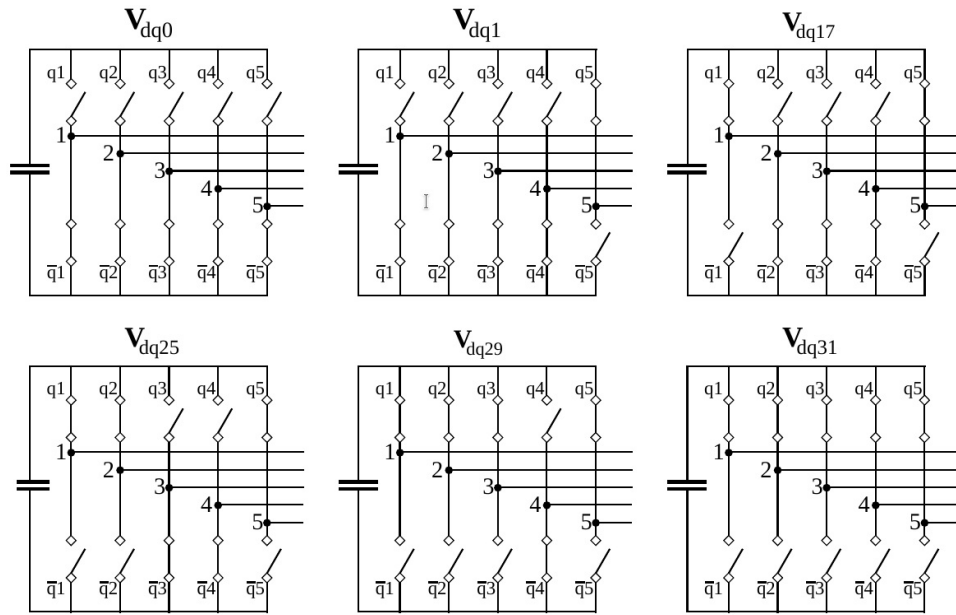


Figura 20 – Posições das chaves para aplicação dos vetores ativos e nulos

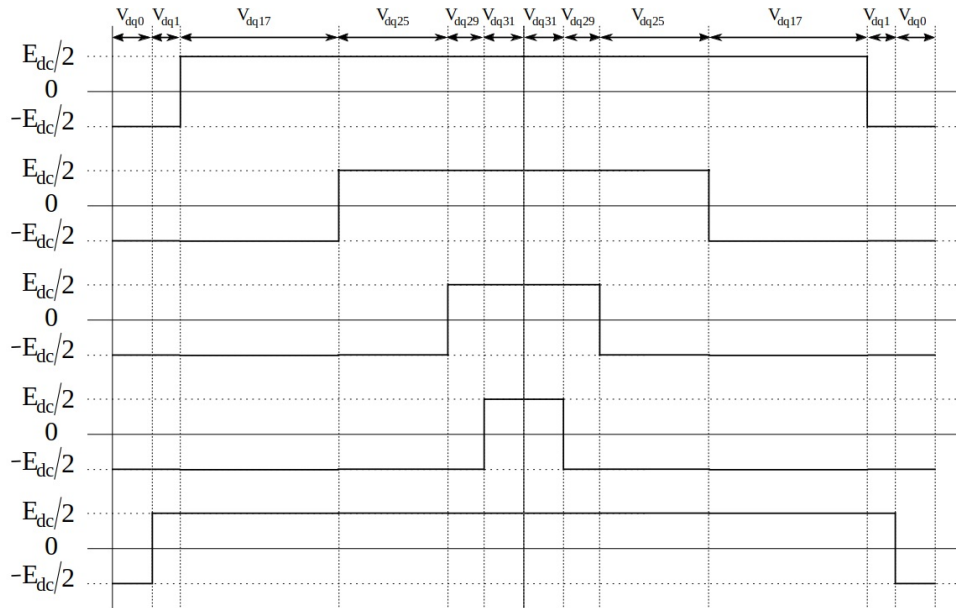


Figura 21 – Processo de chaveamento

Exemplo 02

Considere agora um certo vetor de tensão de referência cujas componentes são dadas por:

$$\begin{aligned} v_{sd1}^{ref} &= 0.65E_{dc} & v_{sd3}^{ref} &= 0 \\ v_{sq1}^{ref} &= 0.24E_{dc} & v_{sq3}^{ref} &= 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Na Fig. 22(a) é mostrado cada passo do algoritmo da Fig. 17 até a identificação da matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ , que corresponde aos vetores ativos que devem ser usados para sintetizar o dado vetor de referência. Na Fig. 22(b) é mostrada a ilustração gráfica das projeções do vetor de tensão de referência nos planos d_1q_1 e d_3q_3 do exemplo 02, além das projeções de todos os

vetores ativos no sistema pentafásico com destaque para os vetores que definem o setor.

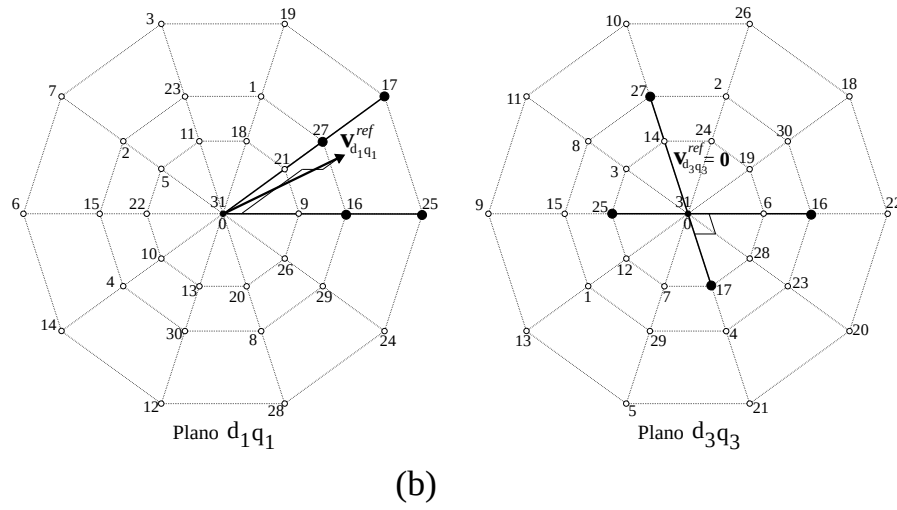
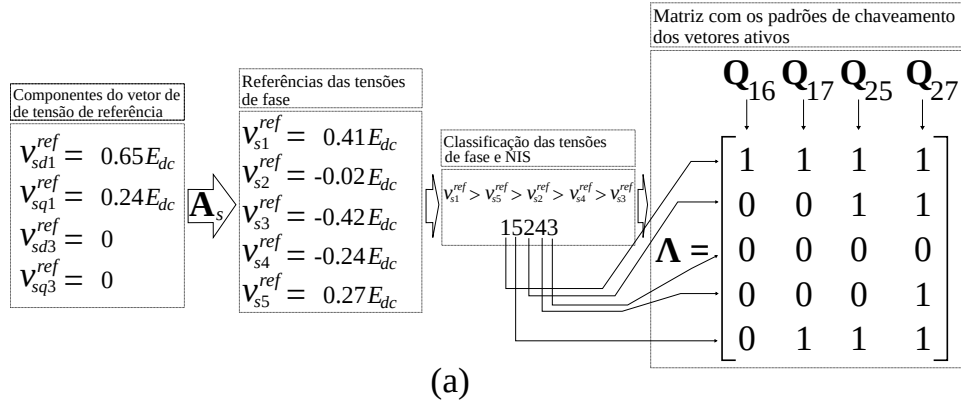


Figura 22 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no exemplo 02 em um sistema pentafásico: (a) Desenvolvimento passo a passo do algoritmo da Fig. 17; e (b) Visualização gráfica dos vetores de tensão.

No caso da Fig. 22, o cálculo dos tempos de aplicação dos vetores ativos é dado por:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}_e &= (\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} \mathbf{S}_e^T \mathbf{V}_{dq}^{ref} \\
 &= \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2} \begin{bmatrix} 0.63 & 0 & 0.63 & 0 \\ 0.83 & 0.60 & 0.12 & -0.37 \\ 1.02 & 0 & -0.39 & 0 \\ 0.51 & 0.37 & -0.2 & 0.60 \end{bmatrix} E_{dc} \begin{bmatrix} 0.65 \\ 0.24 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_{dc} \\
 &= \begin{bmatrix} 0.14 \\ 0.29 \\ 0.23 \\ 0.18 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Exemplo 03 Seja um certo vetor de tensão de referência cujas componentes são dadas por:

$$\begin{aligned} v_{sd1}^{ref} &= 0.65E_{dc} & v_{sd3}^{ref} &= 0.11E_{dc} \\ v_{sq1}^{ref} &= 0.24E_{dc} & v_{sq3}^{ref} &= 0.20E_{dc} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Na Fig. 23(a) é mostrado cada passo do algoritmo da Fig. 17 até a identificação da matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ , que corresponde aos vetores ativos que devem ser usados para sintetizar o dado vetor de referência. Na Fig. 23(b) é mostrada a ilustração gráfica das projeções do vetor de tensão de referência nos planos d_1q_1 e d_3q_3 do exemplo 03, além das projeções de todos os vetores ativos no sistema pentafásico com destaque para os vetores que definem o setor.

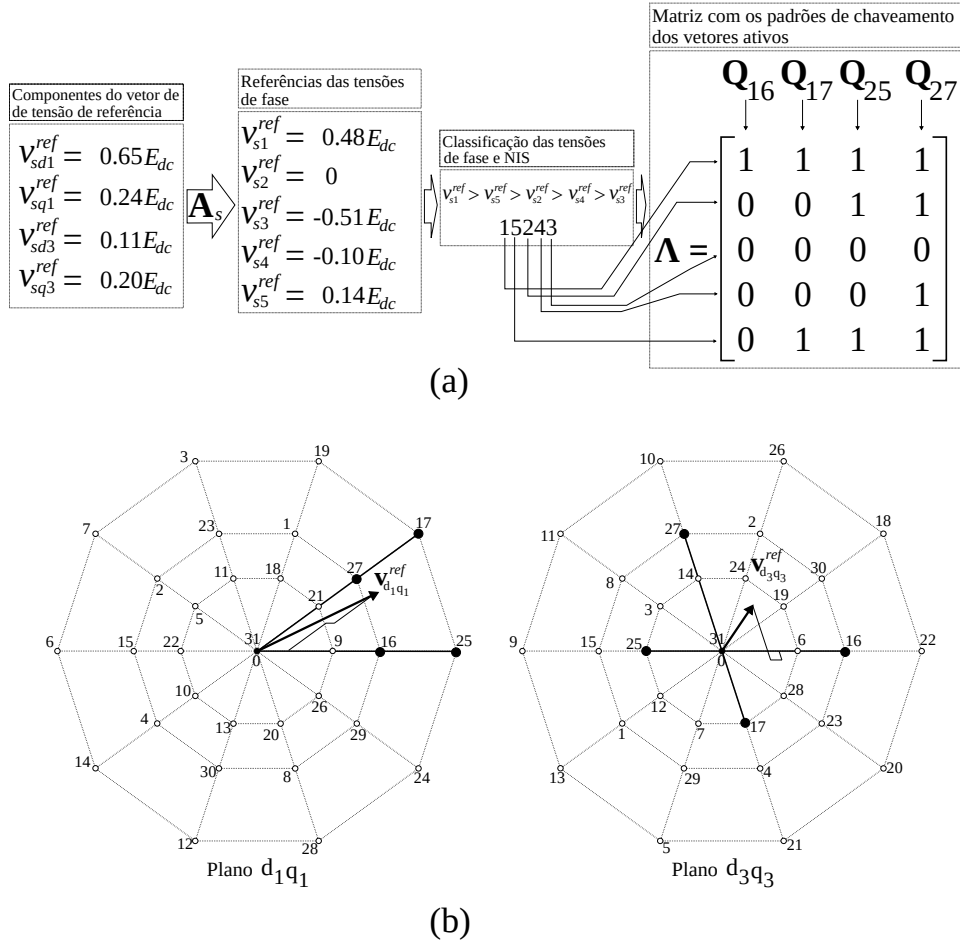


Figura 23 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado em no exemplo 03 em um sistema pentafásico: (a) Desenvolvimento passo a passo do algoritmo da Fig. 17; e (b) Visualização gráfica dos vetores de tensão.

Para o cálculo dos tempos de aplicação dos vetores ativos, temos que

$$\mathbf{S}_e^T = \begin{bmatrix} 0.63 & 0 & 0.63 & 0 \\ 0.83 & 0.60 & 0.12 & -0.37 \\ 1.02 & 0 & -0.39 & 0 \\ 0.51 & 0.37 & -0.19 & 0.60 \end{bmatrix} E_{dc}$$

e

$$(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2}.$$

Assim

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_e &= (\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} \mathbf{S}_e^T \mathbf{V}_{dq}^{ref} \\ &= \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2} \begin{bmatrix} 0.63 & 0 & 0.63 & 0 \\ 0.83 & 0.60 & 0.12 & -0.37 \\ 1.02 & 0 & -0.39 & 0 \\ 0.51 & 0.37 & -0.19 & 0.60 \end{bmatrix} E_{dc} \begin{bmatrix} 0.65 \\ 0.24 \\ 0.11 \\ 0.20 \end{bmatrix} E_{dc} \end{aligned}$$

Isto implica em

$$\mathbf{D}_e = \begin{bmatrix} 0.34 \\ 0.14 \\ 0.10 \\ 0.42 \end{bmatrix}$$

Veja que os vetores de referência mostrados nas Figs. 22 e 23 estão localizados no mesmo setor (**NIS=15243**).

Pode-se observar, nas Figs. 19, 22 e 23, que mesmo no caso do sistema pentafásico, em que existem apenas 30 vetores ativos de tensão, a identificação dos vetores ativos que devem ser usados para seguir uma determinada referência de tensão não é óbvia simplesmente a partir da observação da projeção dos vetores ativos e do vetor de referência sobre os planos, ao contrário do que ocorre no sistema trifásico.

No apêndice A, o algoritmo proposto é utilizado para gerar os setores do acionamento pentafásico que são usados quando de acionamento senoidal, ou seja, referência de tensão apenas no plano d_1q_1 . O acionamento senoidal da máquina pentafásica é bastante explorado na literatura (RANGARI *et al.*, 2017; CHINMAYA; SINGH, 2018; TOMASOV *et al.*, 2020; CHEN; XIE, 2017), no qual não existe projeção do vetor de referência sobre o eixo d_3q_3 , consequentemente, os vetores que definem os setores são aqueles que ladeiam o vetor de referência, ou seja, apenas dez dos 120 setores são usados. Além disso, no apêndice A também é mostrado o caso particular de um tipo de acionamento não senoidal na máquina de cinco fases, ou seja, com injeção de terceiro harmônico. Definindo-se a priori a forma de onda da máquina, observa-se os 30 setores usado neste caso em particular.

4.1.2 Exemplos para o caso de nove fases

O espaço de vetores de um sistema de acionamento de nove fases é de dimensão oito e pode ser visualizado a partir da sua projeção nos quatro planos d_1q_1 , d_3q_3 , d_5q_5 e d_7q_7 . Existem um total de $2^9 - 2 = 510$ vetores ativos de tensão, cujas projeções sobre os planos podem ser vistas na Fig. 25.

Exemplo 04

Considere o caso particular de um vetor de referência no sistema de acionamento de nove fases cujas componentes são dadas por:

$$\begin{aligned} v_{sd1}^{ref} &= 0.70E_{dc} & v_{sd3}^{ref} &= 0 \\ v_{sq1}^{ref} &= 0.12E_{dc} & v_{sq3}^{ref} &= 0 \\ v_{sd5}^{ref} &= 0 & v_{sd7}^{ref} &= 0 \\ v_{sq5}^{ref} &= 0 & v_{sq7}^{ref} &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Na Fig. 24 está mostrado cada passo do algoritmo da Fig. 17 até a identificação da matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ , que contém os vetores ativos que definem o setor no qual o vetor de referência dado no exemplo 04 está localizado. Na Fig. 25 é apresentada uma visualização gráfica das projeções do vetor de referência sobre os quatro planos d_1q_1 , d_3q_3 , d_5q_5 e d_7q_7 além da projeção de todos os vetores ativos do sistema de acionamento enefásico, no qual é destacado os vetores ativos que definem o setor no qual o vetor de referência está localizado.

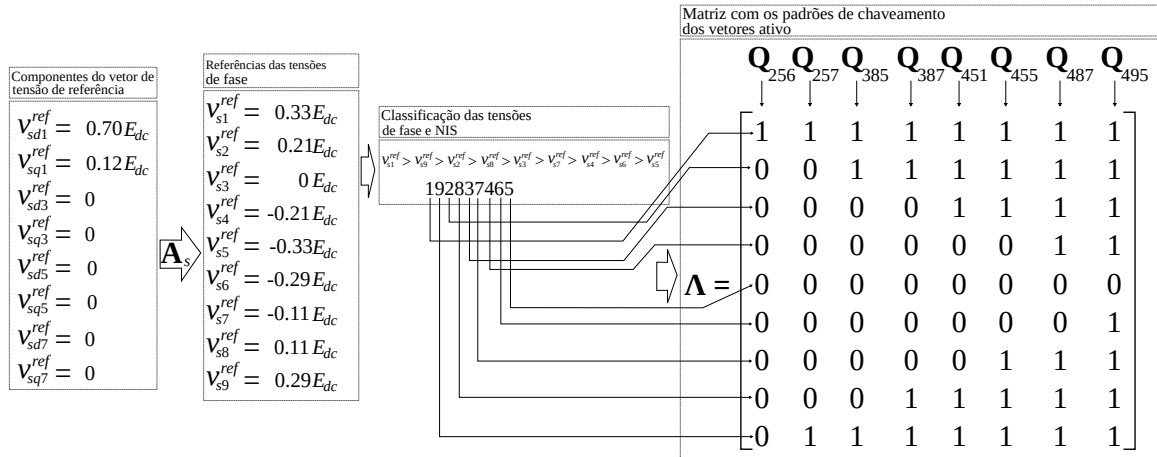


Figura 24 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no exemplo 04 em um sistema enefásico

Já no caso da Fig. 24, o cálculo dos tempos de aplicação dos vetores ativos é dado por:

$$(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} = \frac{1}{E_{dc}^2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

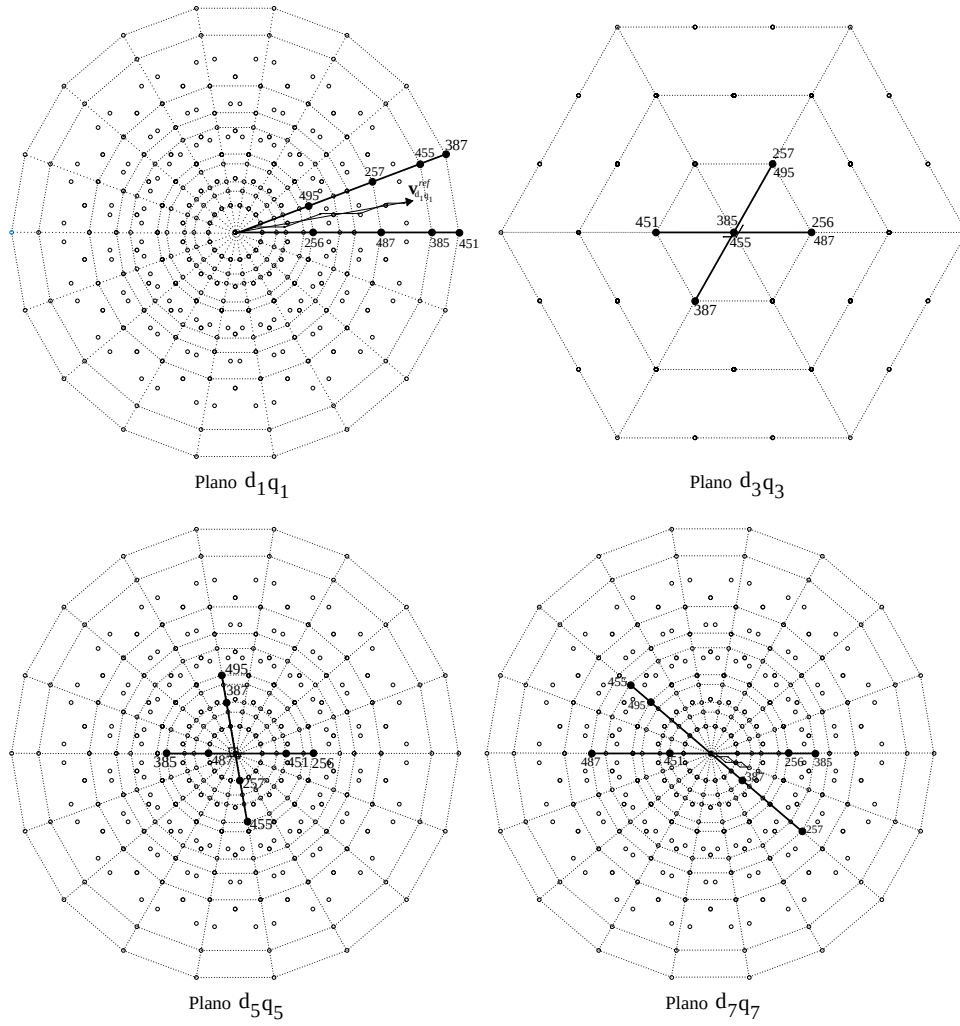


Figura 25 – Visualização gráfica dos vetores de tensão para o exemplo 04

Assim,

$$\mathbf{S}_e^T = \begin{bmatrix} 0.47 & 0 & 0.47 & 0 & 0.47 & 0 & 0.47 & 0 \\ 0.83 & 0.30 & 0.23 & 0.40 & 0.02 & -0.16 & 0.55 & -0.46 \\ 1.19 & 0 & 0 & 0 & -0.41 & 0 & 0.63 & 0 \\ 1.27 & 0.46 & -0.23 & -0.40 & -0.05 & 0.30 & 0.19 & -0.16 \\ 1.35 & 0 & -0.47 & 0 & 0.30 & 0 & -0.25 & 0 \\ 1.12 & 0.40 & 0 & 0 & 0.07 & -0.40 & -0.48 & 0.40 \\ 0.88 & 0 & 0.47 & 0 & -0.16 & 0 & -0.72 & 0 \\ 0.44 & 0.16 & 0.23 & 0.40 & -0.08 & 0.46 & -0.36 & 0.30 \end{bmatrix} E_{dc}.$$

Portanto,

$$\mathbf{D}_e = (\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} \mathbf{S}_e^T \mathbf{V}_{dq}^{ref}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.04 \\ 0.07 \\ 0.10 \\ 0.11 \\ 0.12 \\ 0.10 \\ 0.08 \\ 0.04 \end{bmatrix}$$

Exemplo 05

Na Fig. 26 é repetido mesmo procedimento anterior para o vetor de referência cujas componentes são:

$$\begin{aligned} v_{sd1}^{ref} &= 0.70E_{dc} & v_{sd3}^{ref} &= 0.20E_{dc} \\ v_{sq1}^{ref} &= 0.12E_{dc} & v_{sq3}^{ref} &= 0.12E_{dc} \\ v_{sd5}^{ref} &= 0.09E_{dc} & v_{sd7}^{ref} &= -0.03E_{dc} \\ v_{sq5}^{ref} &= 0.11E_{dc} & v_{sq7}^{ref} &= -0.09E_{dc} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Na Fig. 26 está mostrado cada passo do algoritmo da Fig. 17 até a identificação da matriz com o padrão de chaveamento dos vetores ativos $\mathbf{\Lambda}$, que contém os vetores ativos que definem o setor no qual o vetor de referência dado no exemplo 05 está localizado. Na Fig. 27 é apresentada uma visualização gráfica das projeções do vetor de referência sobre os quatro planos d_1q_1 , d_3q_3 , d_5q_5 e d_7q_7 além da projeção de todos os vetores ativos do sistema de acionamento enefásico, no qual é destacado os vetores ativos que definem o setor no qual o vetor de referência está localizado.

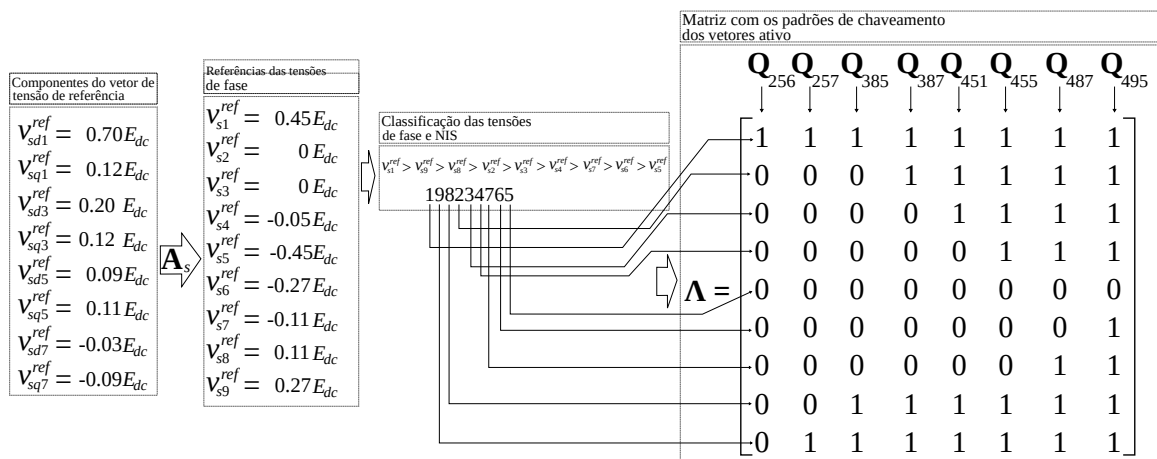


Figura 26 – Passo a passo do algoritmo proposto para o caso particular do vetor de tensão de referência dado no exemplo 05 em um sistema enefásico

No caso do exemplo 05, o cálculo dos tempos de aplicação dos vetores ativos é dado por:

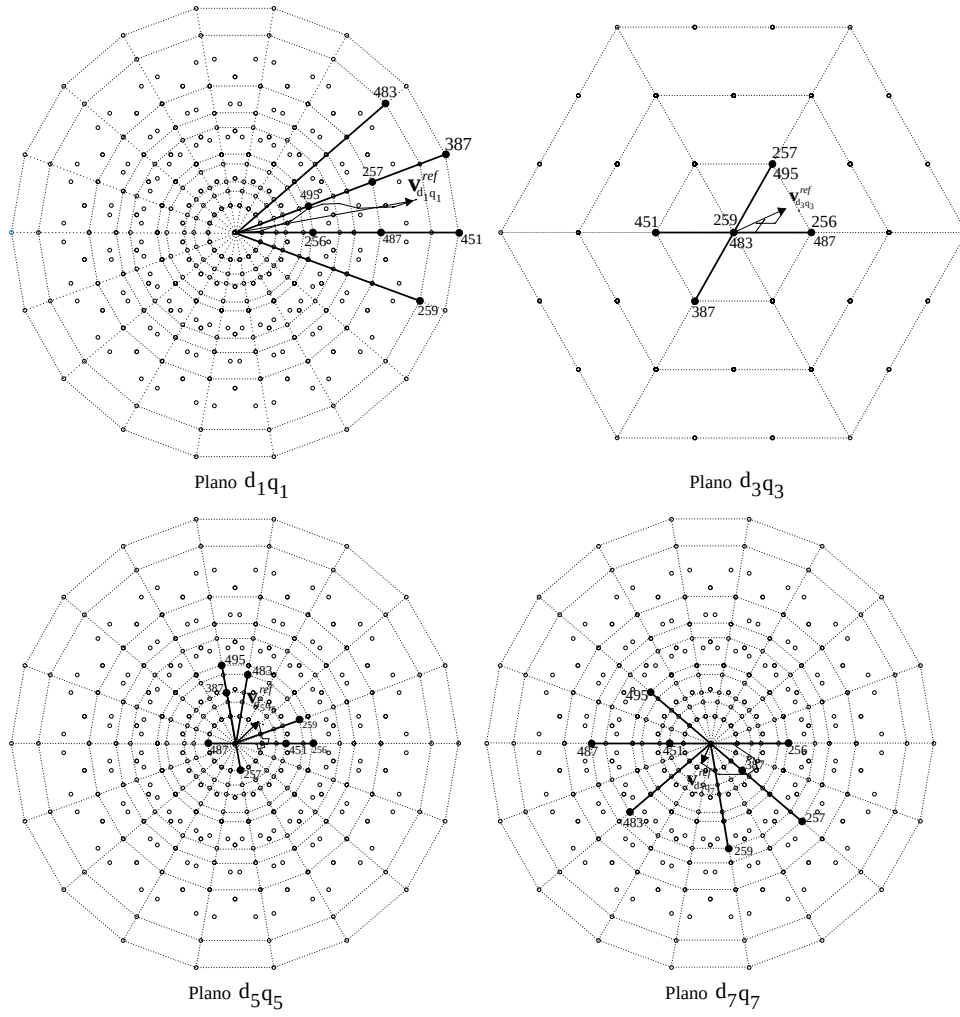


Figura 27 – Visualização gráfica dos vetores de tensão para o exemplo 05

$$(\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{1}{E_{dc}^2}$$

Assim,

$$\mathbf{S}_e^T = \begin{bmatrix} 0.47 & 0 & 0.47 & 0 & 0.47 & 0 & 0.47 & 0 \\ 0.83 & 0.30 & 0.23 & 0.41 & 0.03 & -0.16 & 0.55 & -0.46 \\ 0.91 & 0.77 & 0 & 0 & 0.39 & 0.14 & 0.11 & -0.63 \\ 1.27 & 0.46 & -0.24 & -0.41 & -0.05 & 0.30 & 0.19 & -0.16 \\ 1.36 & 0 & -0.48 & 0 & 0.31 & 0 & -0.25 & 0 \\ 1.12 & -0.41 & 0 & 0 & 0.07 & 0.41 & -0.49 & -0.41 \\ 0.89 & 0 & 0.47 & 0 & -0.16 & 0 & -0.72 & 0 \\ 0.44 & 0.16 & 0.24 & 0.41 & -0.08 & 0.46 & -0.36 & 0.30 \end{bmatrix} E_{dc}$$

Portanto,

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_e &= (\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e)^{-1} \mathbf{S}_e^T \mathbf{V}_{dq}^{ref} \\ &= \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.16 \\ 0.06 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.06 \\ 0.15 \\ 0.18 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Pode-se observar, nas Figs. 25 e 27, que se torna praticamente impossível identificar os vetores ativos que definem o setor apenas pela observação das projeções do vetor de referência e de todos os vetores ativos nos planos. Isto reforça o poder do método proposto.

No apêndice A o algoritmo proposto é usado para mostrar os setores usados no acionamento senoidal de máquinas de sete, nove e onze fases.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O algoritmo proposto foi implementado e testado experimentalmente em um sistema de acionamento com uma máquina de indução de nove fases, mostrado na Fig. 28. A bancada experimental da Fig. 28 consiste de um motor de indução de nove fases movendo uma carga mecânica constituída de uma máquina de corrente contínua funcionando como gerador cc. A máquina de nove fases é alimentada a partir de um inversor de frequência montado a partir de chaves de potência do tipo IGBT's fabricados pela SEMIKRON (SKM50GB12T4) e comandados a partir de um DSP da Texas Instruments (TMS320F28379D). O inversor disponível no laboratório possui um total de dezoito fases. O algoritmo proposto e mostrado na Fig. 17 foi implementado no DSP usando linguagem C para acionamento da máquina de nove fases

em malha aberta. A frequência de chaveamento do conversor foi escolhida em $10kHz$ e a máquina tem tensão de componente fundamental nominal igual a $110V$ RMS. Foram medidas tensões e correntes de fase da máquina usando um osciloscópio da Yokogawa (modelo DL850E) e um analisador de energia da Yokogawa (modelo WT3000E), este último foi usado para ser visualizada uma versão filtrada das tensões de fase, de maneira que seja possível observar se a componente fundamental de tensão está sendo aplicada corretamente à máquina.

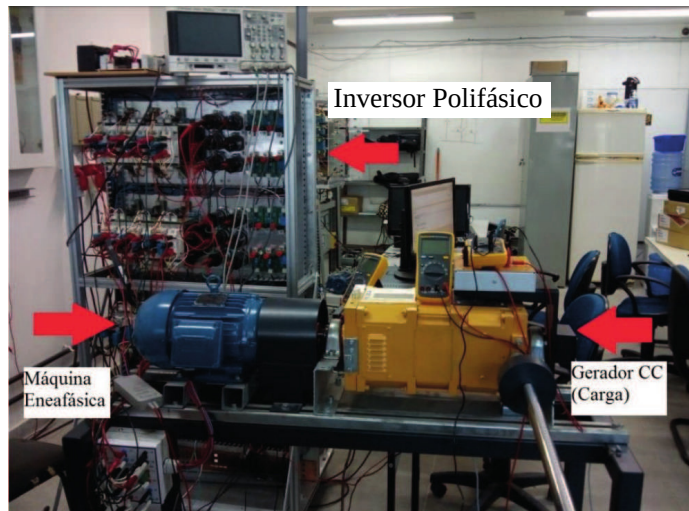


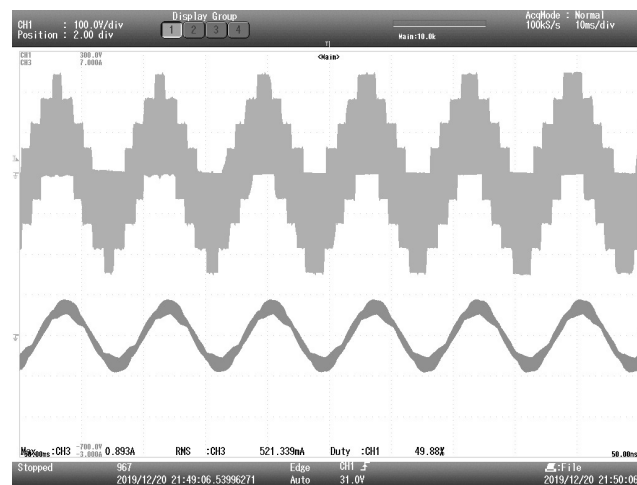
Figura 28 – Bancada Experimental

Na Fig. 29(a) é mostrada a tensão de fase e a corrente de fase da máquina de nove fases usando o algoritmo SVPWM proposto em uma operação de malha aberta com um vetor de tensão de referência com componentes apenas no plano d_1q_1 . Ou seja, máquina com acionamento senoidal. Neste caso as tensões de fase aplicadas a máquina formam um sistema eneafásico balanceado, ou seja, nove tensões de mesma amplitude defasadas entre si por um ângulo de 40° . Na Fig. 29(b) é mostrada uma versão filtrada da tensão de fase mostrada na Fig. 29(a). Observe que a tensão de fase em baixa frequência possui apenas a componente fundamental, como esperado.

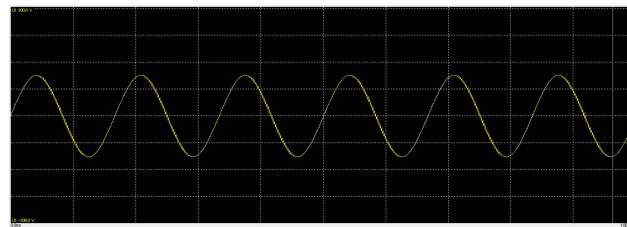
Na Fig. 30(a) é mostrada a tensão de fase e a corrente de fase na máquina de nove fases usando o algoritmo SVPWM proposto em uma operação de malha aberta com injeção de um terceiro harmônico, ou seja, o vetor de tensão de referência tem componentes d_1q_1 e d_3q_3 . Na Fig. 30(b) é mostrado a versão filtrada da tensão de fase mostrada na Fig. 30(a). Observe que a tensão de fase em baixa frequência possui além da componente fundamental, um terceiro harmônico de tensão, conforme esperado.

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 4

Neste capítulo foi ilustrado o funcionamento do método proposto para alguns casos particulares usando máquinas de cinco e de nove fases. O método é geral e vale para qualquer máquina simétrica com número ímpar de fases. Além disso, foram apresentados alguns resultados experimentais implementados utilizando-o.

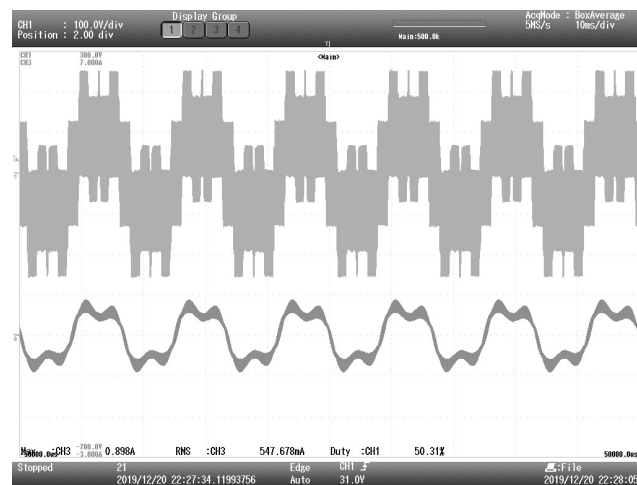


(a)

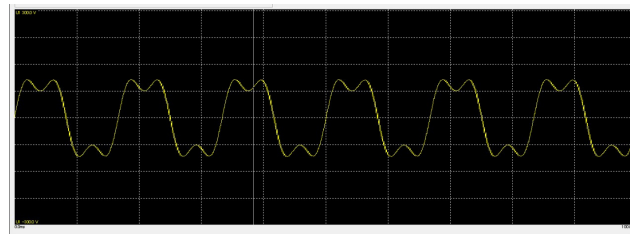


(b)

Figura 29 – Resultados experimentais usando o algoritmo proposto (Fig. 17) com um vetor de tensão de referência apenas com os componentes d_1q_1 , ou seja, acionamento senoidal: (a) Tensão de fase medida (superior) e corrente de fase medida(inferior); (b) Tensão de fase filtrada



(a)



(b)

Figura 30 – Resultados experimentais usando o algoritmo proposto (Fig. 17) com um vetor de tensão de referência com as componentes d_1q_1 e d_3q_3 , ou seja, injeção do terceiro harmônico: (a) Tensão de fase medida (superior) e corrente de fase medida (inferior); (b) Tensão de fase filtrada

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi proposto um algoritmo SVPWM multidimensional para máquinas com distribuição de fases simétricas com qualquer número de fases ímpar. São duas as principais contribuições apresentadas: identificação dos setores; e cálculo do tempo de aplicação dos vetores. Diferentemente do caso trifásico, no qual os vetores estão localizados em um plano, no caso polifásico os vetores se encontram num espaço multidimensional. Em geral, estes vetores são "visualizados" através das suas projeções em dois ou mais planos, a depender do número de fases do sistema. Observar quais vetores ativos definem os setores apenas visualmente torna-se tarefa árdua em sistemas polifásicos, mesmo para acionamento senoidal e torna-se praticamente impossível para acionamento com injeção harmônica. O algoritmo proposto identifica os vetores ativos que definem o setor no qual está localizado um dado vetor de referência apenas pelo número de identificação do setor (NIS) que é definido pela ordenação das tensões de fase. Tal procedimento além de simples dispensa a necessidade de se guardar a informação dos setores em tabelas para operação em tempo real, consequentemente, necessita de pouco espaço de memória além de baixa capacidade de processamento. O algoritmo pode ser uma poderosa ferramenta para estudo e propostas de novas estratégias SVPWM para atender objetivos específicos, por exemplo, redução de tensões de modo comum.

A segunda contribuição deste trabalho consiste no método de cálculo do tempo de aplicação dos vetores ativos que não requer inversão de matriz. Devido a simetria existente entre os vetores ativos que definem os setores. De fato, pode-se mostrar que independentemente do número de fases e do setor, os vetores ativos que definem os setores estão igualmente espaçados entre si no espaço vetorial de dimensão $m_s - 1$. Portanto, arranjando as componentes dos vetores que definem os setores em uma mesma ordem, pôde-se mostrar que não é necessário o cálculo da matriz inversa. a matriz inversa necessária ao cálculo dos tempos de aplicações dos vetores ativos fica sendo determinada a partir de uma matriz constante, consequência da simetria existente entre os vetores ativos que definem o setor e uma matriz com as componentes dos vetores ativos que definem o setor.

O método proposto simplifica o SVPWM para máquinas multifásicas, especialmente quando é considerada a injeção de harmônica. Além disso, o algoritmo proposto não é útil apenas para operação em tempo real, como também pode ser usado para identificar de uma maneira muito simples os setores do vetor de tensão para o estudo, análise e proposição de novas metodologias ou novas estratégias de PWM.

Resumidamente, são duas as contribuições principais deste trabalho:

- 1) Método de identificação dos vetores ativos que definem os setores para modulação SVPWM de máquinas polifásicas simétricas com qualquer número ímpar de fases;
- 2) Simplificação do cálculo do tempo de aplicação dos vetores ativos na modulação SVPWM de máquinas polifásicas simétricas com qualquer número ímpar de fases.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- 1) Generalização do método proposto também para máquinas com número par de fases;
- 2) Utilização do método de identificação dos setores para proposição de estratégias SVPWM com redução de tensão de modo comum em máquinas simétricas com número ímpar de fases;
- 3) Proposição de métodos SVPWM com injeção harmônica que permitam redução da frequência de chaveamento pela não comutação de determinadas chaves do conversor, levando inclusive à configurações alternativas de conversores para baixa frequência de chaveamento;
- 4) Comparação entre o método proposto e os existentes na literatura com relação a tempo de processamento e utilização de memória.

REFERÊNCIAS

- ABDELKHALIK, A.; MASOUD, M.; BARRY, W. Eleven-phase induction machine: steady-state analysis and performance evaluation with harmonic injection. *IET Electric Power Applications*, v. 4, n. 8, p. 670–685, Sept 2010. ISSN 1751-8660. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- BALIGA, B. J.; ADLER, M. S.; LOVE, R. P.; GRAY, P. V.; ZOMMER, N. D. The insulated gate transistor: A new three-terminal mos-controlled bipolar power device. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 31, n. 6, p. 821–828, 1984. Citado na página 2.
- BLASKO, V. Analysis of a hybrid pwm based on modified space-vector and triangle-comparison methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 3, p. 756–764, May 1997. ISSN 0093-9994. Citado na página 5.
- BOYS, J. T.; HANDLEY, P. G. Harmonic analysis of space vector modulated pwm waveforms. *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, v. 137, n. 4, p. 197–204, July 1990. ISSN 0143-7038. Citado na página 5.
- BU, F.; PU, T.; LIU, Q.; MA, B.; DEGANI, M.; GERADA, C. Four-degree-of-freedom overmodulation strategy for five-phase space vector pulse width modulation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, p. 1–1, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 9.
- CASADEI, D.; MENGONI, M.; SERRA, G.; TANI, A.; ZARRI, L. An algorithmic approach to space vector modulation for multiphase inverters. In: *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1824–1830. ISSN 1048-2334. Citado 3 vezes nas páginas 10, 19 e 28.
- CERVONE, A.; SLUNJSKI, M.; LEVI, E.; BRANDO, G. Optimal third-harmonic current injection for asymmetrical multiphase permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 68, n. 4, p. 2772–2783, 2021. Citado na página 5.
- CHEN, K.; XIE, Y. Reducing harmonics distortion in five-phase vsi using space-vector-based optimal hybrid pwm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 32, n. 3, p. 2098–2113, 2017. Citado na página 38.
- CHINMAYA, K. A.; SINGH, G. K. Modeling and comparison of space vector pwm schemes for a five-phase induction motor drive. In: *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 559–564. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 38.
- DURAN, M.; TORAL, S.; BARRERO, F.; LEVI, E. Real-time implementation of multi-dimensional five-phase space vector pulse-width modulation. *Electronics Letters*, v. 43, n. 17, p. 949–950, August 2007. ISSN 0013-5194. Citado na página 9.
- DURAN, M.; TORAL, S.; BARRERO, F.; LEVI, E. Real-time implementation of multi-dimensional five-phase space vector pwm using look-up table techniques. In: *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1518–1523. ISSN 1553-572X. Citado na página 10.
- DURAN, M. J.; LEVI, E. Multi-dimensional approach to multi-phase space vector pulse width modulation. In: *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 2103–2108. ISSN 1553-572X. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 21.

- FUDEH, H. R.; ONG, C. M. Modeling and analysis of induction machines containing space harmonics part i: Modeling and transformation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, n. 8, p. 2608–2615, Aug 1983. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 15.
- FUDEH, H. R.; ONG, C. M. Modeling and analysis of induction machines containing space harmonics part ii: Analysis of asynchronous and synchronous actions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, n. 8, p. 2616–2620, Aug 1983. ISSN 0018-9510. Citado na página 3.
- FUDEH, H. R.; ONG, C. M. Modeling and analysis of induction machines containing space harmonics part iii: Three-phase cage rotor induction machines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, n. 8, p. 2621–2628, Aug 1983. ISSN 0018-9510. Citado na página 3.
- HARI, V. S. S. P. K.; NARAYANAN, G. Space-vector-based hybrid pwm technique to reduce peak-to-peak torque ripple in induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 52, n. 2, p. 1489–1499, March 2016. ISSN 0093-9994. Citado na página 5.
- HOLMES, D. G. The general relationship between regular-sampled pulse-width-modulation and space vector modulation for hard switched converters. In: *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 1992. p. 1002–1009 vol.1. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 19.
- HOLMES, D. G.; LIPO, T. A. *Pulse Width Modulation for Power Converters Principles and Practices*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 9780470546284. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- HOLTZ, J. Pulsewidth modulation for electronic power conversion. *Proceedings of the IEEE*, v. 82, n. 8, p. 1194–1214, Aug 1994. ISSN 0018-9219. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- JACOBINA, C. B.; NOGUEIRA LIMA, A. M.; DA SILVA, E. R. C.; ALVES, R. N. C.; SEIXAS, P. F. Digital scalar pulse-width modulation: a simple approach to introduce nonsinusoidal modulating waveforms. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 16, n. 3, p. 351–359, May 2001. ISSN 0885-8993. Citado 3 vezes nas páginas 5, 19 e 20.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994. ISBN 007035958X. Citado na página 7.
- LEGA, A.; MENGONI, M.; SERRA, G.; TANI, A.; ZARRI, L. General theory of space vector modulation for five-phase inverters. In: *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 237–244. ISSN 2163-5137. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 28.
- LEVI, E.; BOJOI, R.; PROFUMO, F.; TOLİYAT, H. A.; WILLIAMSON, S. Multiphase induction motor drives - a technology status review. *IET Electric Power Applications*, v. 1, n. 4, p. 489–516, July 2007. ISSN 1751-8660. Citado na página 3.
- LIPO, T. A. "The mmf and field distribution of an ac winding", in *Introduction to AC Machine Design*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2017. ISBN 9781119352181. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781119352181>>. Citado na página 12.
- LIU, Z.; LI, Y.; ZHENG, Z. A review of drive techniques for multiphase machines. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, v. 2, n. 2, p. 243–251, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.
- LYRA, R. O. C.; LIPO, T. A. Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 38, n. 5, p. 1351–1360, Sep 2002. ISSN 0093-9994. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 5.
- MATSUO, T.; LIPO, T. A. A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-21, n. 3, p. 624–632, 1985. Citado na página 2.

- MENGONI, M.; ZARRI, L.; TANI, A.; PARSA, L.; SERRA, G.; CASADEI, D. High-torque-density control of multiphase induction motor drives operating over a wide speed range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 2, p. 814–825, Feb 2015. ISSN 0278-0046. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- MURATA, T.; TSUCHIYA, T.; TAKEDA, I. Vector control for induction machine on the application of optimal control theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 37, n. 4, p. 283–290, 1990. Citado na página 2.
- NARAYANAN, G.; ZHAO, D.; KRISHNAMURTHY, H. K.; AYYANAR, R.; RANGANATHAN, V. T. Space vector based hybrid pwm techniques for reduced current ripple. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 4, p. 1614–1627, April 2008. ISSN 0278-0046. Citado na página 5.
- OGASAWARA, S.; AKAGI, H.; NABAE, A. The generalized theory of indirect vector control for ac machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 24, n. 3, p. 470–478, 1988. Citado na página 2.
- PEREIRA, L. A.; SCHARLAU, C. C.; PEREIRA, L. F. A.; HAFFNER, J. F. General model of a five-phase induction machine allowing for harmonics in the air gap field. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 4, p. 891–899, Dec 2006. ISSN 0885-8969. Citado na página 5.
- RANGARI, S. C.; SURYAWANSHI, H. M.; SHAH, B. Implimentation of large and medium vectors for svpwm technique in five phase voltage source inverter. In: *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 751–756. Citado na página 38.
- RAY, A.; BELKHODE, S.; KARAMPURI, R.; JAIN, S. Optimized pwm techniques with 3rd harmonic injection for five phase concentrated winding induction motor with open-end stator. In: *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 4.
- SALEM, A.; NARIMANI, M. A review on multiphase drives for automotive traction applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, v. 5, n. 4, p. 1329–1348, 2019. Citado na página 3.
- TOLIYAT, H. A.; LIPO, T. A.; WHITE, J. C. Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. i. motor analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 6, n. 4, p. 679–683, Dec 1991. ISSN 0885-8969. Citado na página 3.
- TOLIYAT, H. A.; LIPO, T. A.; WHITE, J. C. Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. ii. motor design and performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 6, n. 4, p. 684–692, Dec 1991. ISSN 0885-8969. Citado na página 3.
- TOMASOV, V.; USOLTSEV, A.; VERTEGEL, D.; SZCZEPANKOWSKI, P.; STRZELECKI, R.; POLIAKOV, N. Optimized space-vector modulation schemes for five-phase precision low-speed drives with minimizing the stator current ripple. In: *2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 1, p. 279–284. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 38.
- TRZYNADLOWSKI, A. M.; BECH, M. M.; BLAABJERG, F.; PEDERSEN, J. K.; KIRLIN, R. L.; ZIGLIOTTO, M. Optimization of switching frequencies in the limited-pool random space vector pwm strategy for inverter-fed drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 16, n. 6, p. 852–857, Nov 2001. ISSN 0885-8993. Citado na página 5.
- TRZYNADLOWSKI, A. M.; KIRLIN, R. L.; LEGOWSKI, S. F. Space vector pwm technique with minimum switching losses and a variable pulse rate [for vsi]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 44, n. 2, p. 173–181, April 1997. ISSN 0278-0046. Citado na página 5.

TZOU, I.-Y.; HSU, H.-J. Fpga realization of space-vector pwm control ic for three-phase pwm inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 12, n. 6, p. 953–963, Nov 1997. ISSN 0885-8993. Citado na página 5.

WANG, Y.; YANG, J.; YANG, G.; LI, S.; DENG, R. Harmonic currents injection strategy with optimal air gap flux distribution for multiphase induction machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 36, n. 1, p. 1054–1064, 2021. Citado na página 5.

XU, D.; WANG, B.; ZHANG, G.; WANG, G.; YU, Y. A review of sensorless control methods for ac motor drives. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, v. 2, n. 1, p. 104–115, 2018. Citado na página 1.

YONG, C.; QIU-LIANG, H. Four-dimensional space vector pwm strategy for five-phase voltage source inverter. *IEEE Access*, v. 7, p. 59013–59021, 2019. Citado na página 5.

Apêndices

APÊNDICE I – EXEMPLOS DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO

A seguir, são apresentados alguns resultados obtidos a partir do método proposto para acionamento com referência senoidal, ou seja, apenas referência não nula no plano d_1q_1 e com injeção harmônica, ou seja, com a presença de componentes dos vetores de tensão de referência nos demais planos além do plano fundamental.

A.1 ACIONAMENTO PENTAFÁSICO SENOIDAL

Se o sistema de acionamento é senoidal, o vetor de referência possui apenas as componentes sobre o plano d_1q_1 e componentes nulas sobre o plano d_3q_3 . Tomando-se um ciclo completo de um certo vetor de referência no plano d_1q_1 e observando-se através dos cruzamentos das tensões de fase quais os setores que o vetor percorre, pode-se observar que o vetor de referência percorre apenas 10 setores distintos e utiliza apenas 20 vetores ativos. Na Tabela 6 são mostradas as matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos, as componentes dos vetores e seus números de identificação nestes 10 setores.

Tabela 6 – Número de identificação do setor NIS, matrizes de setor normalizadas $\bar{S}_e$ e matrizes com o padrão de chaveamento dos vetores ativos Λ para o acionamento pentafásico senoidal

VC	NIS																			
	34251				43521				45312				54132				51423			
$\bar{S}_e$	-1	$\frac{c_4}{2c_2}$	$-\frac{1}{2c_2}$	c_4	-1	$\frac{c_4}{2c_2}$	$-\frac{1}{2c_2}$	c_4	-c ₂	$\frac{c_4}{2c_2}$	$-\frac{1}{2}$	c_4	-c ₂	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	c_2	-c ₄	$\frac{1}{2}$	$-\frac{c_4}{2c_2}$	c_2
	0	-s ₂	0	-s ₄	0	-s ₂	0	-s ₄	-s ₂	-s ₂	$\frac{s_7}{2c_2}$	-s ₄	-s ₂	$\frac{s_7}{2c_2}$	$\frac{s_7}{2c_2}$	-s ₂	-s ₄	$\frac{s_7}{2c_2}$	-s ₂	-s ₂
	-1	-2c ₂ ²	2c ₂	c ₂	-1	-2c ₂ ²	2c ₂	c ₂	-c ₄	-2c ₂ ²	$-\frac{1}{2}$	c ₂	-c ₄	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	c ₄	-c ₂	$\frac{1}{2}$	2c ₂ ²	c ₄
	0	s ₄	0	-s ₂	0	s ₄	0	-s ₂	s ₄	s ₄	-2c ₂ c ₃	-s ₂	s ₄	-2c ₂ s ₄	-2c ₂ s ₄	s ₄	-s ₂	-2c ₂ s ₄	s ₄	s ₄
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0
Λ	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
VC	Número de Identificação do setor																			
	15243				12534				21354				23145				32415			
$\bar{S}_e$	-c ₄	$\frac{1}{2c_2}$	$-\frac{c_4}{2c_2}$	1	-c ₄	$\frac{1}{2c_2}$	$-\frac{c_4}{2c_2}$	1	-c ₄	$\frac{1}{2}$	$-\frac{c_4}{2c_2}$	c ₂	-c ₂	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	c ₂	-c ₂	$\frac{c_4}{2c_2}$	$-\frac{1}{2}$	c ₄
	-s ₄	0	-s ₂	0	s ₄	0	s ₂	0	s ₄	$-\frac{s_7}{2c_2}$	s ₂	s ₂	s ₂	$-\frac{s_7}{2c_2}$	$-\frac{s_7}{2c_2}$	s ₂	s ₂	s ₂	$-\frac{s_7}{2c_2}$	s ₄
	-c ₂	-2c ₂	2c ₂ ²	1	-c ₂	-2c ₂	2c ₂ ²	1	-c ₂	$\frac{1}{2}$	2c ₂ ²	c ₄	-c ₄	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	c ₄	-c ₄	-2c ₂ ²	$-\frac{1}{2}$	c ₂
	-s ₂	0	s ₄	0	s ₂	0	-s ₄	0	s ₂	2c ₂ s ₄	-s ₄	-s ₄	-s ₄	2c ₂ s ₄	2c ₂ s ₄	-s ₄	-s ₄	s ₄	2c ₂ s ₄	s ₂
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
Λ	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

VC - Componentes vetoriais e padrão de chaveamento

$$c_k = \cos \frac{k\pi}{5} \text{ e } s_k = -\sin \frac{k\pi}{5}$$

$$\bar{S}_e = \frac{\mathbf{S}_e}{\sqrt{\frac{2}{5}} E_{dc}}$$

Uma visualização gráfica do espaço de vetores de cinco fases é mostrada na Figura 31, onde o espaço de vetores de dimensão quatro é mostrado em termos de projeções dos subespaços d_1q_1 e d_3q_3 .

Nesta figura são mostradas todas as projeções do vetor nos subespaços, cujos 20 usados são mostrados com destaque. Além de todos os 10 setores mostrados, os vetores usados em cada setor estão também em destaque. Na Figura 31, ao invés de identificar cada vetor pelo seu número binário de sequência de chaveamento, foi utilizado o número decimal associado a cada combinação binária particular para simplificar a apresentação. As tensões de referência em d_1q_1 localizadas em cada setor está representada na figura pela região cinza.

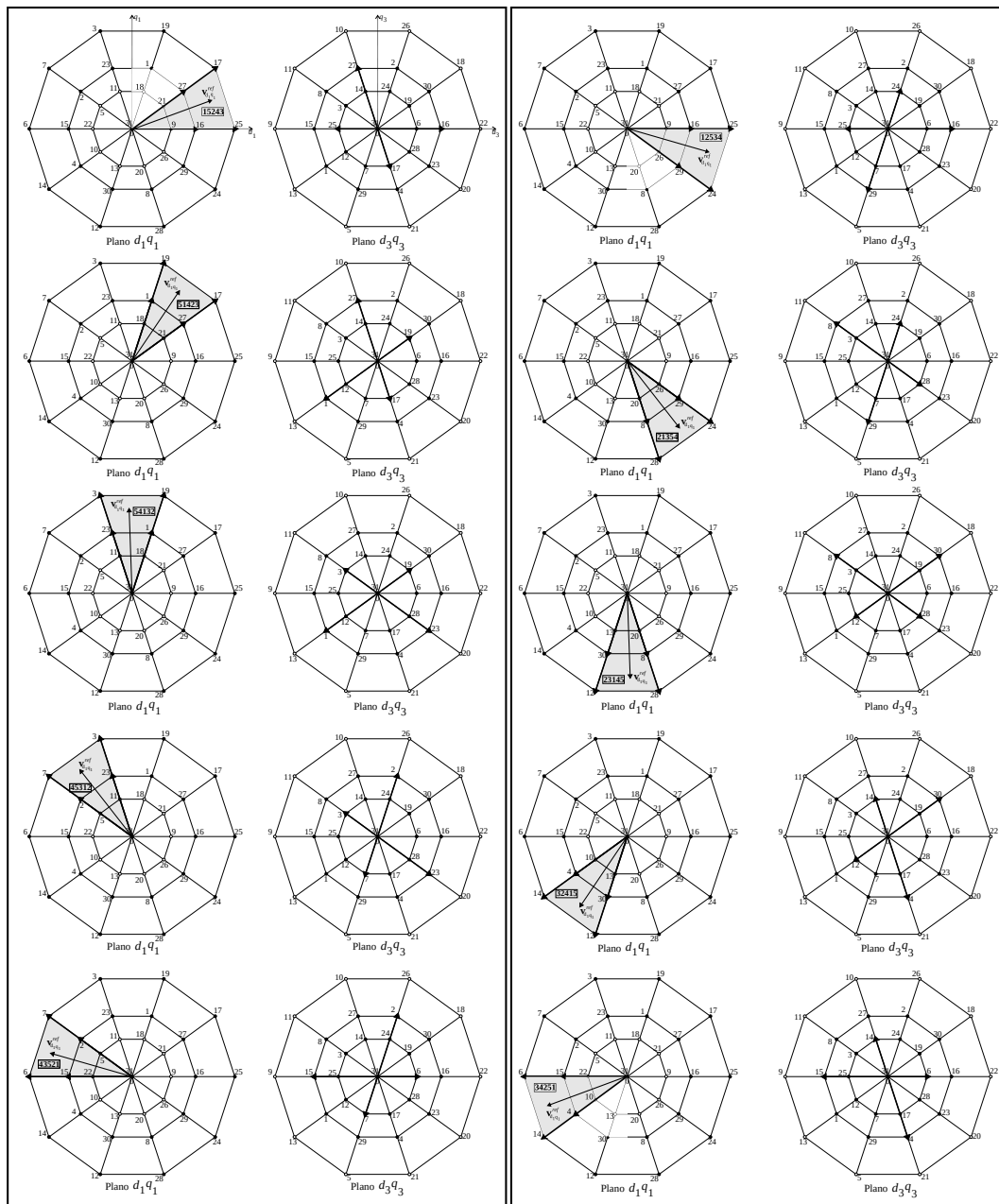


Figura 31 – Espaço de vetores de cinco fases e todos os 10 setores utilizados quando apenas a componente fundamental é aplicada a máquina com tensão de referência nula em d_3q_3

A.2 ACIONAMENTO PENTAFÁSICO NÃO SENOIDAL: INJEÇÃO HARMÔNICA

O inversor de cinco fases com injeção da terceira componente harmônica resultará em um projeção não nula do vetor de tensão de referência no plano d_3q_3 . Isto significa que, além da componente fundamental do vetor de tensão de referência no plano d_1q_1 existe também uma componente para o vetor de tensão de referência no plano d_3q_3 . Quando a terceira componente harmônica é injetada, seu ângulo de fase com a componente fundamental é escolhido previamente, ou seja, a forma de onda em estado estacionário é escolhida.

Nos sistemas de cinco fases, a forma de onda normalmente usada na literatura quando a terceira componente harmônica é injetada é tal que a tensão de fase são os dois primeiros harmônicos de uma onda quadrada.

Isso significa, por exemplo, para um vetor de tensão de referência no plano d_1q_1 escrito na forma complexa como

$$\mathbf{v}_{d_1q_1}^{ref} = v_{d_1}^{ref} + jv_{q_1}^{ref} = V_1 e^{j\theta_1}, \quad (\text{A.1})$$

o vetor de referência de tensão d_3q_3 é necessariamente dado por

$$\mathbf{v}_{d_3q_3}^{ref} = v_{d_3}^{ref} + jv_{q_3}^{ref} = V_3 e^{j3(\theta_1 + \pi)}, \quad (\text{A.2})$$

como mostrado na Figura 32.

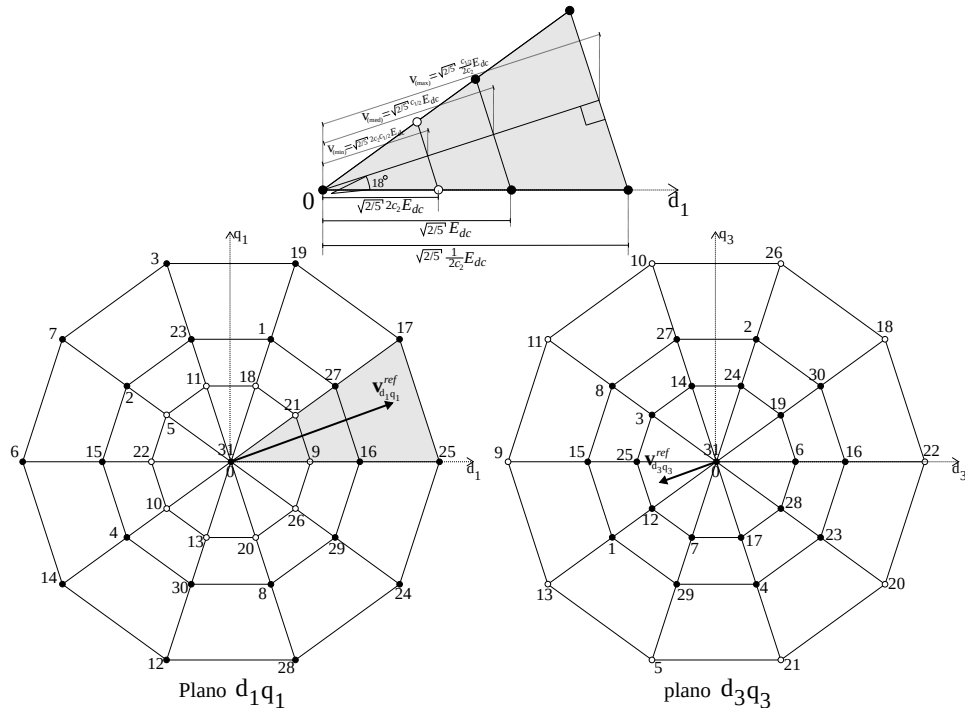


Figura 32 – Vetor de referência localizado no setor 51234 e suas projeções quando a componente fundamental e a terceira harmônica são injetadas

Na Figura 32 pode ser observado que a maior projeção da tensão de referência no plano d_1q_1 deve se restringir a

$$V_{(max)} = \sqrt{\frac{2}{5}} \frac{c_{1/2}}{2c_2} E_{dc}, \quad (A.3)$$

para $c_k = \cos \frac{k\pi}{5}$. Para manter d_3q_3 dentro da menor área do plano, ele deve ter uma magnitude

$$\begin{aligned} V_3 &\leq \left(\frac{3}{2} - \frac{\sqrt{5}}{2} \right) V_1 \\ V_3 &\leq 0.38V_1 \end{aligned} \quad (A.4)$$

Portanto, se o módulo da referência de tensão de d_3q_3 satisfizer (A.4) os vetores ativos, cujas projeções no plano de referência d_1q_1 são pequenas, não são usados, como no caso para apenas a componente fundamental. Embora os mesmos 20 vetores ativos usados apenas com a componente fundamental sejam os mesmos usados nesta injeção particular de terceiro harmônico, os setores são ligeiramente diferentes. Na verdade 30 setores diferentes dos 10 resultantes do acionamento senoidal são usados nesse caso. A condição (A.4) é maior que a condição para onda quadrada na tensão de fase que é

$$V_3 = \frac{1}{3} V_1. \quad (A.5)$$

A terceira componente harmônica com magnitude maior que a da condição (A.4) não é prática, porque resultaria em uma terceira grande corrente harmônica. Portanto, esse caso, que certamente os pequenos vetores começariam a ser utilizados, uma vez que não é prático, não é apresentado aqui.

Na Tabela 7 são mostrados os trinta setores utilizados nesse caso enumerados com base no ordenamento da tensão de fase do máximo para o mínimo e as sequências de chaveamento de cada um deles.

Tabela 7 – Os trinta setores no espaço de vetores de um sistema pentafásico, juntamente com o NIS e o padrão de chaveamento em cada um deles quando componente fundamental e a terceira harmônica são injetadas

		NIS					
VC		12543	15234	51234	51243	15423	34521
Λ	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	0	1	1	0
	0	0	0	0	1	0	0
	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	1	1	0
		15432	51432	54123	45123	45132	43251
Λ	1	1	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	1	0	0
	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	1	1	1
	1	1	1	0	1	1	1
		54312	54321	45321	43512	34512	43215
Λ	1	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	1	1	1
	1	1	1	0	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	0
		34215	32451	23451	23415	32145	32154
Λ	1	0	0	0	1	0	0
	1	1	0	0	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0
		23154	21345	12345	12354	21534	21543
Λ	1	1	0	0	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	1	1	0

VC - Padrão de chaveamento

Na Figura 33 é mostrada uma visualização dos primeiros quinze setores.

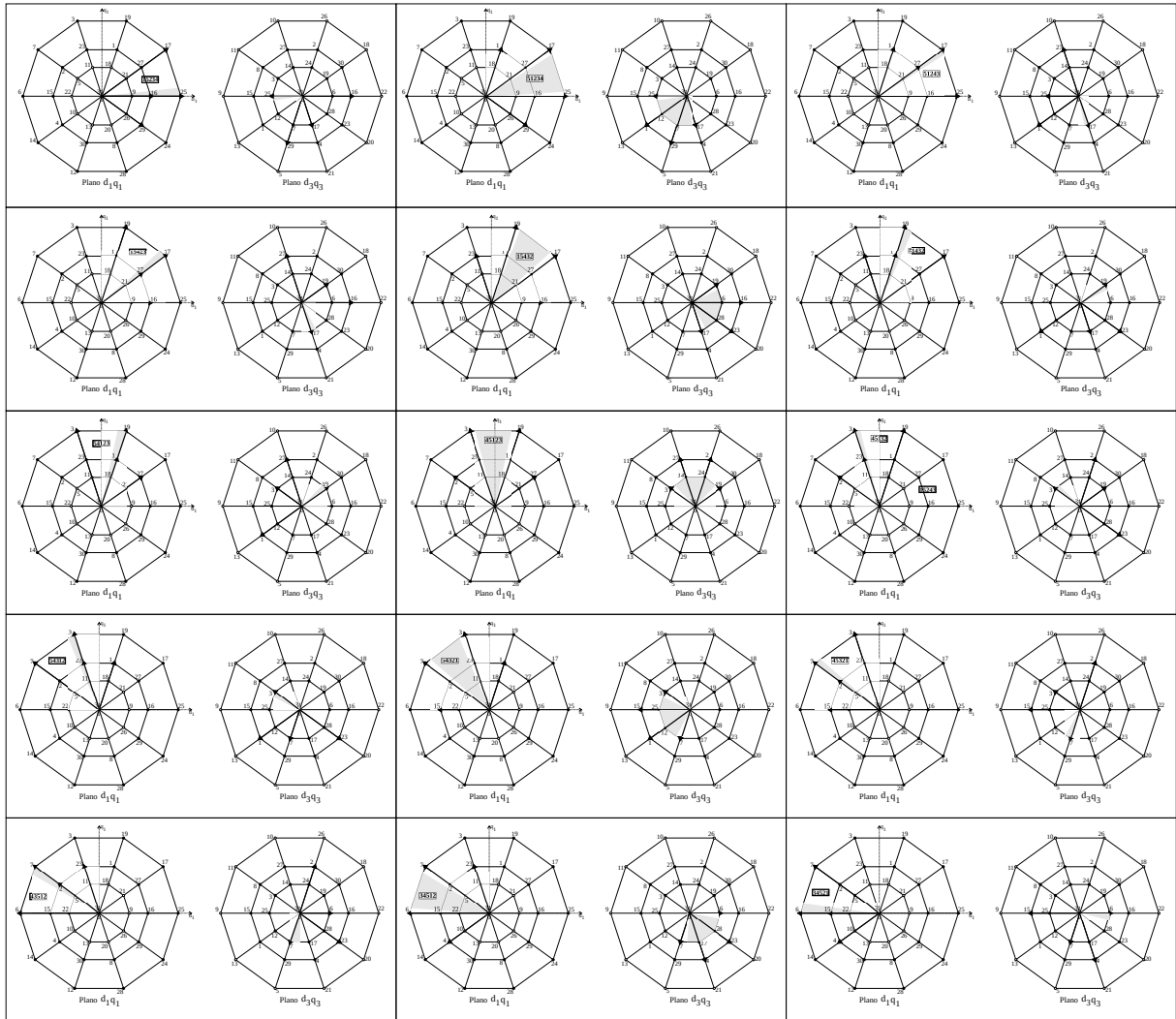


Figura 33 – Espaço de vetores de cinco fases e 15 dos setores usados quando a componente fundamental e a terceira componente harmônica são aplicadas à máquina

Quando apenas a componente fundamental é utilizada (Figura 31), como o vetor não tem projeção no plano d_3q_3 , cada setor é facilmente visualizado no plano d_1q_1 , compreendendo uma região de 36° neste plano. No entanto, com a injeção da terceira componente harmônica, como a projeção do vetor sobre o plano d_3q_3 deixa de ser zero, não existe fácil visualização dos setores como para o caso senoidal. É possível observar que as projeções de cada setor nos planos é dividida em três regiões (por isso trinta setores) onde duas delas são menores. Essas duas regiões menores ocorrem uma logo após e outra antes do cruzamento da projeção vetorial fundamental com a projeção de vetores ativos. Portanto a visualização gráfica não é tão simples.

A.3 ACIONAMENTO SENOIDAL DA MÁQUINA DE SETE FASES

Para o inversor de sete fases, o espaço de vetores tem dimensão seis, e pode ser visualizado através de três planos: no plano d_1q_1 é modelada a primeira componente harmônica espacial de fluxo, no

plano d_3q_3 a terceira componente e no plano d_5q_5 a quinta componente harmônica espacial de fluxo é modelada.

O inversor de sete fases apresenta um total 128 vetores ativos (e dois vetores nulos) e 5040 setores possíveis. Se apenas o modelo harmônico de espaço fundamental for alimentado, ou seja, somente a tensão de referência no plano d_1q_1 for diferente de zero, aplicando o algoritmo anterior, observa-se que são usados apenas 14 setores. Na Tabela 8 são mostrados os componentes de vetores em cada setor, além de combinações nos padrões de chaveamento e seus números de identificação de setor.

Tabela 8 – Os catorze setores no espaço de vetores para um sistema de acionamento de sete fases, juntamente com o NIS e o padrão de chaveamento em cada um deles quando apenas a componente fundamental é alimentada

		NIS				
VC		1273645	1726354	7162534	7615243	6751423
Λ	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0
VC		6574132	5647312	5463721	4536271	4352617
Λ	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	0
	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	0	0
VC		3425167	3241576	2314756	2137465	
Λ	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0

VC - Padrão de chaveamento

Uma visualização gráfica do espaço de vetores de sete fases é mostrada na Figura 34, onde o espaço de vetores de seis dimensões, são mostrados em termos das projeções nos subespaços d_1q_1 , d_3q_3 e d_5q_5 .

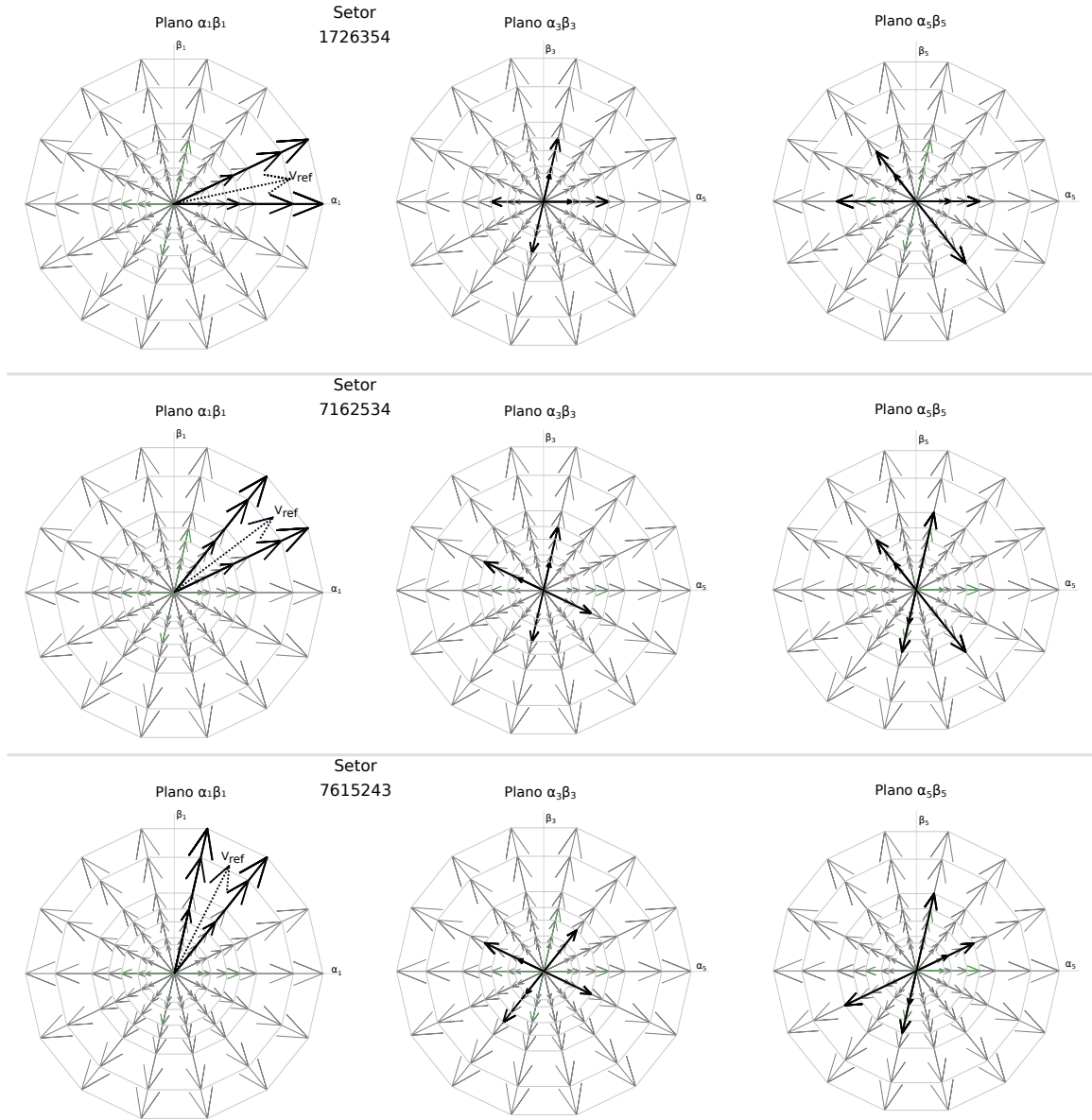


Figura 34 – Espaço de vetores para um sistema de acionamento de sete fases e 3 dos setores usados quando apenas a componente fundamental é aplicada à máquina e tensão de referência é nula em d_3q_3 e d_5q_5

A.4 ACIONAMENTO SENOIDAL DA MÁQUINA DE NOVE FASES

Para o inversor de nove fases, o espaço de vetores tem dimensão oito, e pode ser visualizado através de quatro planos: no plano d_1q_1 é modelada a primeira componente harmônica espacial de fluxo, no plano d_3q_3 a terceira componente, no plano d_5q_5 a quinta componente e no plano d_7q_7 a sétima componente harmônica espacial de fluxo é modelada.

O inversor de nove fases apresenta um total 512 vetores ativos (e dois vetores nulos) e 362.880 setores possíveis. Se apenas o modelo harmônico de espaço fundamental for alimentado, ou seja, somente a tensão de referência no plano d_1q_1 for diferente de zero, aplicando o algoritmo anterior, observa-se que são usados apenas 18 setores. Na Tabela 9 são mostrados os componentes de vetores em cada setor, além

de combinações nos padrões de chaveamento e seus números de identificação de setor.

Tabela 9 – Os dezoito setores no espaço de vetores para um sistema de acionamento de nove fases, juntamente com o NIS e o padrão de chaveamento em cada um deles quando apenas a componente fundamental é alimentada

NIS	129384756	192837465	918273645	981726354
A	1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 1 1 1 1 1 1 1
	0 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 1 1 1 1 1 1 1	0 0 0 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 1
	0 0 0 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 1 1 1
	0 0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 1 1 1	0 0 0 0 0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 1
	0 0 0 0 0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
NIS	897162534	879615243	786951423	768594132
A	0 0 0 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 1 1 1
	0 0 0 0 0 0 1 1 1	0 0 0 0 0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
NIS	675849312	657483921	564738291	546372819
A	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
NIS	453627189	435261798	342516978	324159687
A	0 0 0 0 0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 1	0 0 0 1 1 1 1 1 1
	0 0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 1	0 0 1 1 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1 1 1 1
	0 0 1 1 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1
	1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 1 1 1 1 1 1 1
	0 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 1 1 1 1 1 1 1	0 0 0 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 1
	0 0 0 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 1 1 1	0 0 0 0 0 0 0 1 1
	0 0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0
NIS	231495867	213948576		
A	0 0 1 1 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1 1 1 1		
	1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1		
	0 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 1 1 1 1 1 1 1		
	0 0 0 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 1 1 1 1 1		
	0 0 0 0 0 1 1 1 1	0 0 0 0 0 0 1 1 1		
	0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0		
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0		
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0		
	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0		

Uma visualização gráfica do espaço de vetores de nove fases é mostrada na Figura 35, onde o espaço de vetores de oito dimensões é mostrado em termos das projeções nos subespaços d_1q_1 , d_3q_3 , d_5q_5 e d_7q_7 .

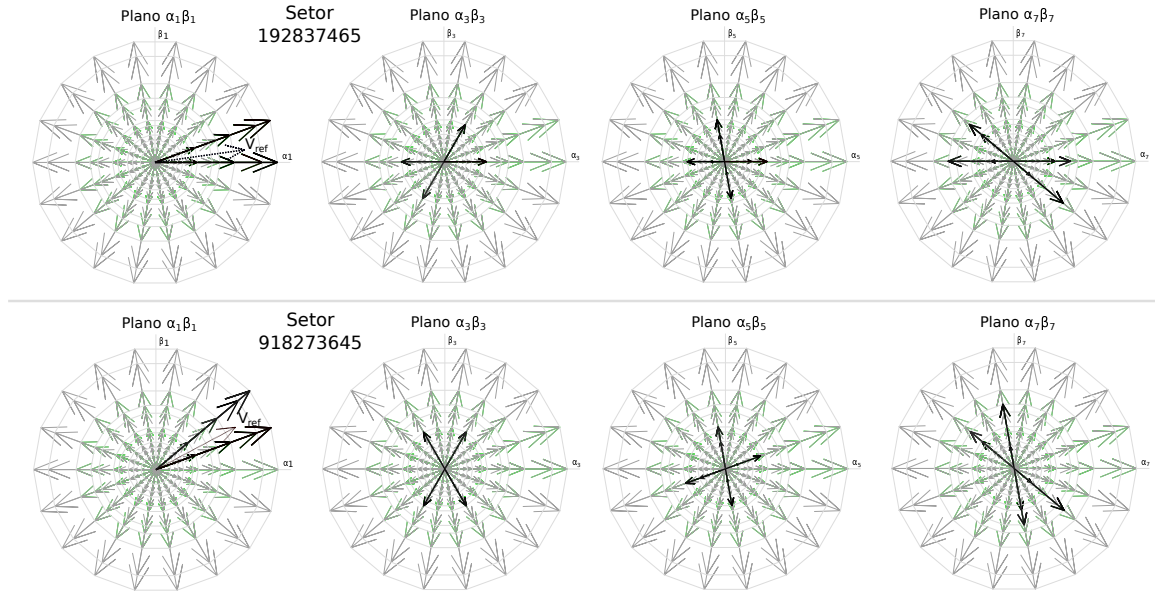


Figura 35 – Espaço de vetores para um sistema de acionamento de nove fases e 2 dos setores usados quando apenas a componente fundamental é aplicada à máquina e tensão de referência é nula em d_3q_3 , d_5q_5 e d_7q_7

A.5 ACIONAMENTO SENOIDAL DA MÁQUINA DE ONZE FASES

Para o inversor de onze fases, o espaço de vetores tem dimensão dez, e pode ser visualizado através de cinco planos: no plano d_1q_1 é modelada a primeira componente harmônica espacial de fluxo, no plano d_3q_3 a terceira componente, no plano d_5q_5 a quinta componente, no plano d_7q_7 a sétima componente harmônica espacial de fluxo é modelada e no plano d_9q_9 a nona componente harmônica espacial de fluxo é modelada.

O inversor de onze fases apresenta um total $2^{11} - 2 = 2046$ vetores ativos (e dois vetores nulos) e 39.916.800 setores possíveis. Se apenas o modelo harmônico de espaço fundamental for alimentado, ou seja, somente a tensão de referência no plano d_1q_1 for diferente de zero, aplicando o algoritmo anterior, observa-se que são usados apenas 22 setores. Na Tabela 10 são mostrados os componentes de vetores em cada setor, além de combinações nos padrões de chaveamento e seus números de identificação de setor.

