

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Contribuição ao estudo da máquina CA eneafásica.

Roberto da Silva Macena

Campina Grande - PB, Dezembro de 2013.

Contribuição ao estudo da máquina CA eneafásica.

Roberto da Silva Macena

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus I, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio em Engenharia Elétrica.

Area de concentração: Processamento da Energia

Cursino Brandão Jacobina, Dr.Ing, UFCG

Orientador

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M141c Macena, Roberto da Silva.
Contribuição ao estudo da máquina CA eneafásica / Roberto da Silva Macena. – Campina Grande, 2014.
56 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

"Orientação: Cursino Brandão Jacobina, Dr. Ing".
Referências.

1. Máquinas. 2. Eneafásica. 3. Decomposição. 4. Vetorial. I. Jacobina, Cursino Brandão. II. Título.

CDU 621.9(043)

"SISTEMA DE CONVERSÃO ESTÁTICA COM MÁQUINA CA DE NOVE FASES"

ROBERTO DA SILVA MACENA

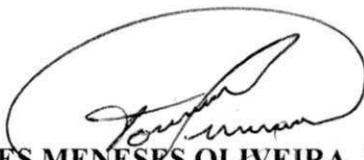
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/12/2013



CURSINO BRANDÃO JACOBINA, Dr.Ing., UFCG
Orientador(a)



EDGAR ROOSEVELT BRAGA FILHO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



TALVANES MENESES OLIVEIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



ISAAC SOARES DE FREITAS, D.Sc., UFPB
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, a meus pais Maria de Lourdes da Silva Macena e Genival Gonçalves Macena, exemplos de superação, honestidade e humildade, além de serem fonte de inspiração para as minhas conquistas. À minha esposa Maria Roseana dos Santos pelo apoio concedido em todas as esferas e incentivo para conclusão desta dissertação. A meus irmãos Dione Macena, Dionete Macena, Roberval Macena e Rogério Macena que me apoiaram de todas as formas.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Cursino Brandão Jacobina pela orientação, amizade e paciência neste período de grande aprendizado. Ao professor Euzeli Cipriano dos Santos Júnior pelos trabalhos iniciais desenvolvidos no mestrado. Ao professor Isaac Soares de Freitas pela ajuda concedida. Ao professor Edgar Roosevelt Braga Filho pela ajuda com os experimentos.

A todos os meus amigos que me apoiaram nos momentos difíceis, sejam pessoais ou mesmo do desenvolvimento dos estudos da dissertação, em especial a Ayslan Caisson Norões Maia, Gregory A. A. Carlos, Nustenil S. M. L. Marinus e Victor F. M. B. Melo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe representados pelas pessoas de Luciano Melo, Carlos Menezes Júnior e Marcos França enquanto diretores do Campus Estância e aos meus colegas professores Alessandro Viana Fontes, André Canuto, Dennis Viana e Fernando Nascimento que colaboraram e me deram apoio para que fosse possível a conclusão deste trabalho.

Resumo

O estudo de máquinas polifásicas é tema de várias pesquisas devido a possibilidade de tornar o processo de conversão de energia elétrica em energia mecânica mais eficiente, já que o mesmo consome, anualmente, mais de 7 TWh de energia elétrica. Neste trabalho faz-se um estudo inicial de uma máquina de indução eneafásica e apresenta-se como resultado duas representações matemáticas simplificadas obtidas por meio dos métodos do triplo trifásico e da decomposição vetorial.

Na sequência do trabalho é feito um estudo comparativo entre a máquina eneafásica e as máquinas trifásica e hexafásica referentes à distorção harmônica das correntes, tensões de fase e de pólo, correntes dq e de fase. Por fim ainda é mostrado alguns resultados experimentais usando uma carga RL e uma máquina eneafásica com ângulo entre os conjuntos trifásicos igual a 0° .

Palavras-chave: Máquinas, Eneafásica, Decomposição, Vetorial.

Abstract

The study of multiphase machines is subject of several researches due to the possibility of making the electrical energy conversion process into mechanical energy more efficient, since it consumes more than 7 TWh per year. In this work, an initial study of a nine-phase induction machine is performed and, as a result, two simplified mathematical representations obtained from double-three-phase and vectorial decomposition methods are presented.

Also a comparative study between the nine-phase, the six-phase and the three-phase machines is realized. This study concerns the currents harmonic distortion, phase voltages and pole voltages, dq currents and phase currents. At last, experimental results using a RL-load and a nine-phase machine with angle between the three-phase groups 0° are presented.

Keywords: Machinery, Nine-phase, Decomposition, Vector.

Sumário

1	Introdução geral	1
1.1	Apresentação do tema	1
1.2	Referências bibliográficas	3
1.3	Contribuição do trabalho	6
1.4	Organização do trabalho	6
2	Modelo matemático da máquina eneafásica	8
2.1	Modelo da máquina eneafásica	8
2.1.1	Transformação com o triplo trifásico	12
2.1.2	Transformação usando o método da decomposição vetorial	18
2.2	Conclusão	23
3	Estudo em malha aberta	25
3.1	Modelo matemático do conversor eneafásico	25
3.1.1	Tensão de referência	28
3.1.2	Tensão do barramento CC	30
3.2	Resultados de simulação	32
3.2.1	Distorção harmônica das correntes	32
3.2.2	Tensões de polo de referência e tensões de fase	34
3.2.3	Correntes dq	37
3.2.4	Correntes por fase	39

3.3	Resultados experimentais	40
3.3.1	Acionamento de uma carga RL	40
3.3.2	Acionamento de uma máquina de indução eneafásica com defasagem entre os conjuntos trifásicos igual a 0°	44
3.4	Conclusão	46
4	Conclusão geral e trabalhos futuros	48
4.1	Conclusão geral	48
4.2	Trabalhos futuros	49

Lista de Figuras

1.1	Consumo de energia elétrica na indústria [3]	2
2.1	Máquina Nonafásica.	9
2.2	Diagrama vetorial Nonafásico e as possíveis transformações de coordenadas para um referencial arbitrário.	13
2.3	Diagrama vetorial Nonafásico e as possíveis transformações de coordenadas para um referencial arbitrário.	19
3.1	Topologia convencional de nove fases.	26
3.2	Tensões aplicadas na máquina Trifásica	29
3.3	Tensões aplicadas na máquina Hexafásica	29
3.4	Tensões aplicadas na máquina Nove Fases	30
3.5	Cálculo das tensões de linha para a máquina trifásica.	30
3.6	Cálculo das tensões de linha para a máquina hexafásica.	31
3.7	Cálculo das tensões de linha para a máquina nove fases.	31
3.8	Distorção harmônica das correntes de fase para a máquina trifásica.	33
3.9	Distorção harmônica das correntes de fase para a máquina hexafásica.	33
3.10	Distorção harmônica das correntes de fase para a máquina nove fases.	34
3.11	Tensões de polo para a máquina Trifásica	35
3.12	Tensões de polo para a máquina Hexafásica	35
3.13	Tensões de polo para a máquina Nove Fases	36

3.14	Tensões de fase para a máquina Trifásica	36
3.15	Tensões de fase para a máquina Hexafásica	37
3.16	Tensões de fase para a máquina Nove Fases	37
3.17	Correntes dq para a máquina Trifásica	38
3.18	Correntes dq para a máquina Hexafásica	38
3.19	Correntes dq para a máquina nove fases	39
3.20	Correntes da máquina Trifásica por fase	39
3.21	Correntes da máquina Hexafásica por fase	40
3.22	Correntes da máquina nove fases por fase	40
3.23	Carga RL usada no laboratório	41
3.24	Cicuito com carga RL nove fases	41
3.25	Tensão na carga RL Nove Fases	42
3.26	Correntes do grupo A na carga RL nove fases	42
3.27	Correntes do grupo B na carga RL nove fases	43
3.28	Correntes do grupo C na carga RL nove fases	43
3.29	Bobinas da máquina usada nos experimentos	44
3.30	Bobinas da máquina usada nos experimentos usando a conexão nove fases	45
3.31	Tensão da máquina nove fases	45
3.32	Correntes na máquina com conexão nove fases	46

Capítulo 1

Introdução geral

1.1 Apresentação do tema

O acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de grande importância econômica. Estima-se que o mercado mundial de motores elétricos de todos os tipos seja da ordem de uma dezena de bilhões de dólares por ano. No campo dos acionamentos industriais, avalia-se que cerca de 70% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias, Figura 1.1, seja transformada em energia mecânica por motores elétricos. Estima-se que exista no mundo mais de 300 milhões de motores, que consomem aproximadamente 7.400 TWh por ano, equivalente a 40% da produção mundial de eletricidade. Além disso o uso de máquinas elétricas rotativas tem papel fundamental na geração de energia elétrica. Fontes de energia primária como a eólica, o biogás, os derivados de petróleo, a nuclear, entre outros, são convertidas em energia elétrica através de plantas que fazem uso dessas máquinas. [1, 2, 3]

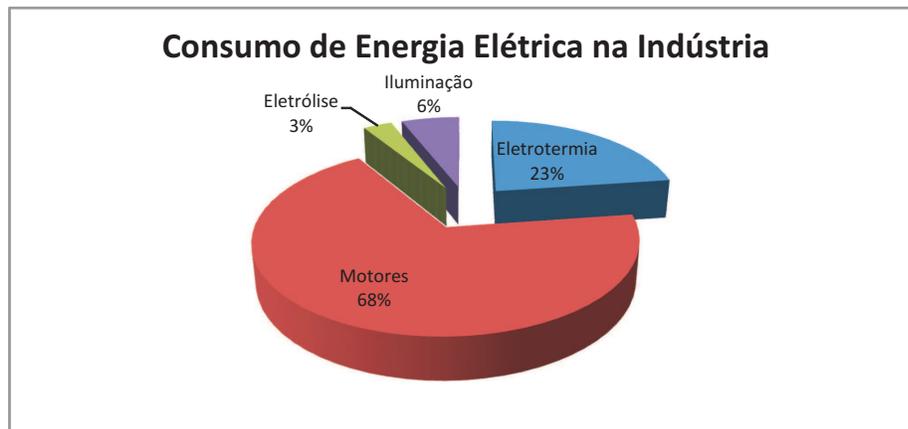


Figura 1.1: Consumo de energia elétrica na indústria [3]

Nas últimas décadas tem-se experimentado um avanço significativo na eficiência de conversão de energia elétrica, principalmente pela evolução na construção das máquinas elétricas, assim como a possibilidade de conexão das mesmas a conversores de potência.

Pelo fato dos sistemas de geração, transmissão, distribuição e fornecimento de energia elétrica serem trifásicos, tornou a aplicação da máquina assíncrona trifásica a solução mais adotada, mesmo quando o acionamento é feito através de um conversor eletrônico. Porém o uso de conversores estáticos possibilitou o desenvolvimento de máquinas com número de fases maior que três e desencadeou novos estudos de conversores e controle aplicados às máquinas ditas multifases. O uso destas máquinas agregam várias vantagens tais como:

- a) Redução da amplitude e elevação da frequência de pulsação do torque; [6]
- b) Redução da corrente por fase sem elevação da tensão por fase; [6]
- c) Elevação do torque útil por valor eficaz de corrente se comparado a uma máquina trifásica com mesmo volume ferromagnético; [6]
- d) Manutenção da operação, mesmo quando uma ou mais fases são completamente abertas, sem a necessidade de ligações adicionais; [6]
- e) Flexibilidade na estimação de parâmetros; [6]
- f) Redução das correntes harmônicas no rotor; [6]
- g) Diminuição das correntes harmônicas no barramento CC; [6]

h) Flexibilidade no acionamento devido ao grau de liberdade adicional oferecido pelas fases extras.[6]

Neste trabalho será desenvolvido um estudo da máquina elétrica eneafásica visando elaborar um modelo matemático para simulação, assim como realizar um estudo comparativo entre as máquinas trifásica, hexafásica e eneafásica acionadas por um conversor convencional de dois níveis com o fim de se estabelecer parâmetros quantitativos do qual são melhorados os parâmetros como distorção harmônica das correntes, tensão de barramento, amplitude das correntes por fase, entre outros.

1.2 Referências bibliográficas

Em [5] é feita uma introdução sobre máquinas elétricas de corrente contínua e máquinas de corrente alternada considerando os aspectos construtivos e as equações características das mesmas juntamente com uma representação física de tais equações. No mesmo documento é introduzido o conceito de transformadas ortogonais e é apresentada a transformação de park, onde se transforma os vetores de tensão, fluxo e corrente em componentes ortogonais d e q e uma componente homopolar. Essa transformação faz com que o modelo da máquina seja simplificado. Ainda neste documento é descrito o funcionamento da topologia convencional do conversor trifásico.

Em [6] é feita uma abordagem sobre as máquinas multifases e quais as vantagens das mesmas em relação à máquina trifásica. No mesmo documento pode-se compreender como é feita a representação em dqxy de uma máquina de cinco fases, assim como estratégias de modulação PWM, sistemas tolerantes a falta e sistemas de acionamentos sem indutância de filtro.

Em [8] é feita uma revisão bibliográfica sobre máquinas polifásicas que remontam as publicações desde o fim da década de 1920, com as publicações de T. F. Barton (1929) e P. L. Alger (1930) que tratam da aplicação de enrolamentos trifásicos duplos em geradores síncro-

nos, passam pelas publicações de (FUDECH; ONG, 1983), que desenvolve todo o formalismo com o objetivo de generalizar a descrição e a análise de uma máquina com M fases no estator e N fases no rotor através de circuitos mutuamente acoplados, e comenta outras publicações que não estão no escopo deste trabalho. Na mesma tese é feita uma classificação das máquinas multifases, é feito um modelo matemático da Máquina Assíncrona Hexafásica usando a representação em Duplo dqo e em decomposição vetorial.

Em [7] é feita uma revisão bibliográfica mais aprofundada do tema das máquinas multifases onde se comenta vários tipos de aplicações em que elas se sobressaem em relação a trifásica, tais como a propulsão de navios, tração ferroviária, entre outras, onde são requeridas altas potências e a necessidade de maior confiabilidade. Também se faz uma análise quanto ao aumento da potência limite das máquinas, da distribuição de fluxo do entreferro, da eliminação de certas harmônicas do fluxo do entreferro, do aumento do conjugado por corrente eficaz. Na mesma tese é feito um modelo da máquina de indução Hexafásica usando a representação com duplo trifásico e por decomposição.

No artigo [9, 14] é descrito o uso da decomposição vetorial para o desenvolvimento de um modelo simplificado de uma máquina síncrona eneafásica, já em [10, 17, 18] é investigado a capacidade de operação em condições de falta de uma máquina síncrona eneafásica a ímã permanente. Em [11, 15] é investigado as vantagens e desvantagens do uso de máquinas multifases em aplicações para veículos elétricos híbridos. No trabalho apresentado em [12] é feito um estudo comparativo entre aplicações como veículos elétricos e elevadores de alta velocidade usando algumas configurações da máquina eneafásica indutiva com 36 ranhuras.

É apresentado em [13] um método de cálculo analítico do torque eletromagnético para a máquina multifases a ímã permanente, assim como são feitas considerações em relação à escolha do número de fases e os méritos e deméritos de máquinas multifases a ímã permanente. Em [16] é apresentada uma abordagem para implementar a modulação por largura de pulso senoidal (SPWM) de um inversor multifase. Já em [19] é apresentado um método de controle baseado no motor DC com escovas (BDCE).

O estado da arte da área de máquinas polifásicas é apresentado em [20, 22], onde são apresentadas vantagens de máquinas de indução polifásicos, modelagem de máquinas de indução polifásicos, controle vetorial básico e controle de PWM de inversores de tensão multifásico. Em [21] é apresentado uma análise da modulação por largura de pulso para um inversor enefásico com base na abordagem de espaço vetorial. Já em [24] é feito um estudo comparativo entre as máquinas de indução trifásica e hexafásica em relação ao torque.

Em [26] é proposta uma topologia para carregamento de baterias para veículos elétricos (VE), que utiliza uma máquina de propulsão de seis fases assimétrica. Em [27] apresenta-se um sistema de acionamento de máquina reversível hexafásico composto de conversores de ponte monofásica ligados em série na rede e nos terminais da máquina. Já o trabalho referenciado em [28] descreve uma representação do circuito detalhado de uma máquina síncrona de seis fases.

O artigo [31] descreve um controle vetorial de uma máquina de indução hexafásica e no mesmo utiliza-se controladores de lógica fuzzy para resolver o problema da mudança de parâmetros devido ao aquecimento da máquina. Em [32] é feita uma análise do sistema de acionamento do motor de indução de seis fases com destaque para falhas elétricas no inversor.

No artigo referenciado em [33] é apresentada uma abordagem para o controle de velocidade sem sensores da máquina de indução hexafásica utilizando a técnica ANFIS (Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems). Já no artigo [34] é apresentada uma nova técnica de controle sem sensores para a máquina de indução hexafásica.

No trabalho [35] desenvolve-se a sintonia de um controlador fuzzy PI (FPI) usando algoritmos genéticos para o controle de posição do motor de indução hexafásico. Já no trabalho [36] é proposto o controle por lógica fuzzy associado ao método de controle de campo indireto em situações de falha. Em [37] é apresentada uma técnica de PWM modificado que reduz a frequência de comutação, quando comparada a técnica convencional PWM vetorial (SVPWM).

Em [40, 41] são apresentados sistemas de geração de energia eólica utilizando máquinas

hexafásicas, considerando as etapas de desingn das topologias, assim como as etapas de controle incluindo o método de supressão de desequilíbrio causado pelas condições assimétricas no gerador de seis fases.

1.3 Contribuição do trabalho

Neste trabalho será desenvolvido um estudo sobre a Máquina de Indução Eneafásica (MIE) em termos de desenvolvimento de modelo matemático e simplificação do mesmo usando a representação do triplo trifásico e da decomposição vetorial. Também será desenvolvida um programa de simulação que forneça dados para comparação entre as máquinas Trifásica, Hexafásica e Eneafásica, alimentadas por um conversor com topologia clássica - dois níveis com três, seis e nove braços.

1.4 Organização do trabalho

No capítulo 1 foram feitos comentários relativos às máquinas elétricas e suas aplicações na indústria reforçando a importância de estudar e melhorar o desempenho da mesma nas mais diversas aplicações, seja para acionamento ou transformação de energia. Neste capítulo também foi discutido algumas bibliografias que já abordaram o tema das máquinas polifásicas e que foram referência para o desenvolvimento desta dissertação.

No capítulo 2 é apresentado o modelo matemático da máquina eneafásica usando os métodos do triplo trifásico e da decomposição vetorial.

No capítulo 3 é apresentado o modelo matemático para os conversores estáticos de dois níveis utilizados para acionar as máquinas, via simulação, assim como os cálculos referentes às tensões de referência, para que a potência das máquinas sejam ajustadas usando o artifício de que os circuitos equivalentes dq sejam iguais para as três máquinas, e os cálculos relativos às tensões de barramento e o ajuste da mesma para que em todos os casos descritos o conversor

operasse com índice de modulação igual a 0.9. Em seguida são apresentados os resultados de simulação para as três máquinas, assim como os resultados experimentais usando uma carga RL e os resultados experimentais usando uma máquina de indução nove fases com ângulo entre os conjuntos trifásicos igual a zero.

No capítulo 4 são feitas as conclusões finais e apresentados os trabalhos futuros referentes ao estudo das máquinas nove fases.

Capítulo 2

Modelo matemático da máquina eneafásica

Neste capítulo será apresentada a modelagem matemática da máquina enefásica.

2.1 Modelo da máquina enefásica

A máquina de indução enefásica é composta por três conjuntos trifásicos, consistindo no conjunto A, formado pelas fases 1, 4 e 7, no conjunto B, formado pelas fases 2, 5 e 8 e no conjunto C, formado pelas fases 3, 6 e 9. As fases do conjunto A devem estar defasadas de 120° entre si, assim como as fases do conjunto B e C. Os conjuntos A e B estão deslocados de um ângulo denominado α enquanto que os conjuntos A e C estão deslocados de um ângulo denominado $-\alpha$. A Fig. 2.1 ilustra as bobinas do estator $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8$ e s_9 e as bobinas do rotor trifásico r_1, r_2 e r_3 .

O desenvolvimento das equações do modelo primitivo elétrico da máquina é feito considerando as seguintes simplificações:

- Entreferro uniforme.
- As perdas no ferro, rotacionais e saturação do núcleo (máquina linear) são desprezadas.

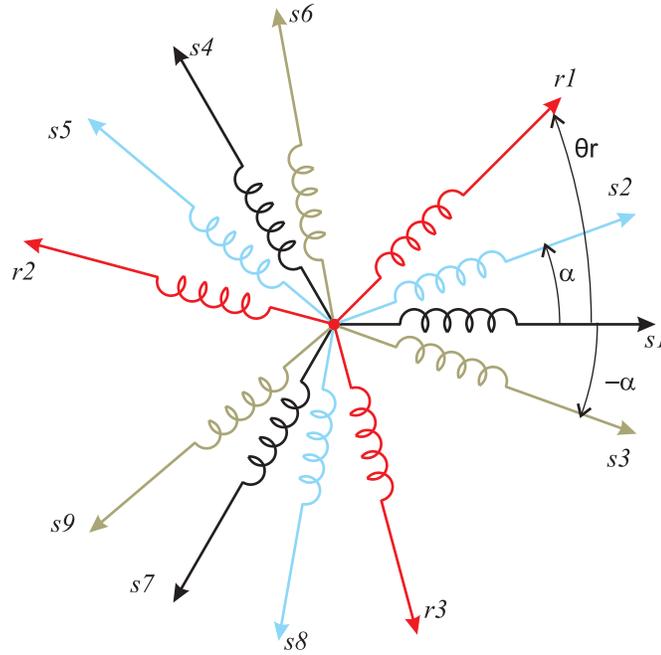


Figura 2.1: Máquina Nonafásica.

- Fluxos do estator e do rotor distribuídos de maneira senoidal ao longo do entreferro.
- Enrolamentos idênticos nos dois grupos de bobinas trifásicos para todas as fases.

As tensões estatóricas são então dadas por:

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_s}{dt} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{d}{dt} (\boldsymbol{\lambda}_{ss} + \boldsymbol{\lambda}_{sr}) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{d}{dt} (\mathbf{L}_{ss} \mathbf{i}_s + \mathbf{L}_{sr} \mathbf{i}_r) \quad (2.3)$$

onde

$$\mathbf{v}_s = \begin{bmatrix} v_{s1} & v_{s4} & v_{s7} & v_{s2} & v_{s5} & v_{s8} & v_{s3} & v_{s6} & v_{s9} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{s1} & i_{s4} & i_{s7} & i_{s2} & i_{s5} & i_{s8} & i_{s3} & i_{s6} & i_{s9} \end{bmatrix}^T$$

$$\text{e } \boldsymbol{\lambda}_s = \begin{bmatrix} \lambda_{s1} & \lambda_{s4} & \lambda_{s7} & \lambda_{s2} & \lambda_{s5} & \lambda_{s8} & \lambda_{s3} & \lambda_{s6} & \lambda_{s9} \end{bmatrix}^T$$

\mathbf{L}_{ss} é a matriz de indutâncias do estator e \mathbf{L}_{sr} é a matriz de indutâncias mútuas entre o rotor e o estator. Elas serão obtidas posteriormente. $\mathbf{R}_s = R_s \mathbf{I}_9$, onde R_s é o valor da resistência do estator e \mathbf{I}_9 é a matriz identidade de ordem 9.

As tensões rotóricas são dadas por:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r}{dt} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r + \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\lambda}_{rr} + \boldsymbol{\lambda}_{sr}) \quad (2.5)$$

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r + \frac{d}{dt}(\mathbf{L}_{rr} \mathbf{i}_r + \mathbf{L}_{rs} \mathbf{i}_s) \quad (2.6)$$

onde

$$\mathbf{v}_r = [v_{r1} \ v_{r2} \ v_{r3}]^T,$$

$$\mathbf{i}_r = [i_{r1} \ i_{r2} \ i_{r3}]^T$$

$$\text{e } \boldsymbol{\lambda}_r = [\lambda_{r1} \ \lambda_{r2} \ \lambda_{r3}]^T$$

\mathbf{L}_{rr} é a matriz de indutâncias do estator e \mathbf{L}_{rs} é a matriz de indutâncias mútuas entre o rotor e o estator. Elas serão obtidas posteriormente. $\mathbf{R}_r = R_r \mathbf{I}_3$, onde R_r é o valor da resistência do rotor e \mathbf{I}_3 é a matriz identidade de ordem 3.

A matriz de indutâncias do estator é obtida levando-se em conta as indutâncias mútuas entre as bobinas do estator. Ou seja, esses valores dependem do ângulo α . Dessa forma:

$$\mathbf{L}_{ss} = L_{ls} \mathbf{I}_9 + L_{ms} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss1} & \mathbf{L}_{ss2} & \mathbf{L}_{ss3} \\ \mathbf{L}_{ss4} & \mathbf{L}_{ss5} & \mathbf{L}_{ss6} \\ \mathbf{L}_{ss7} & \mathbf{L}_{ss8} & \mathbf{L}_{ss9} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{L}_{ss1} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\frac{4\pi}{3}) & 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{L}_{ss2} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{L}_{ss3} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{L}_{ss4} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{L}_{ss5} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\frac{4\pi}{3}) & 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{L}_{ss6} = \begin{bmatrix} \cos(2\alpha) & \cos(2\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\alpha) & \cos(2\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{L}_{ss7} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{L}_{ss8} = \begin{bmatrix} \cos(2\alpha) & \cos(2\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(2\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\alpha) & \cos(2\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{L}_{ss9} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\frac{4\pi}{3}) & 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

onde L_{ls} é a indutância de dispersão do estator e L_{ms} é a indutância de magnetização do estator.

A matriz de indutâncias do rotor é obtida da mesma maneira, porém pelo fato do rotor ser trifásico, seus valores se tornam fixos. Assim:

$$\mathbf{L}_{rr} = L_{lr}\mathbf{I}_3 + L_{mr} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

onde L_{lr} é a indutância de dispersão do rotor e L_{mr} é a indutância de magnetização do rotor.

Sabendo-se que $\mathbf{L}_{rs} = \mathbf{L}_{sr}^T$, a matriz de indutâncias mútuas entre o estator e o rotor depende da posição elétrica θ_r do rotor. Assim:

$$\mathbf{L}_{sr} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \\ \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3} - \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3} - \alpha) \\ \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3} - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3} - \alpha) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3} - \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3} - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha) \\ \cos(\theta_r + \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3} + \alpha) \\ \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3} + \alpha) & \cos(\theta_r + \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + \alpha) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3} + \alpha) & \cos(\theta_r + \alpha) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde M_{sr} é a indutância mútua entre uma bobina do estator e uma bobina do rotor.

2.1.1 Transformação com o triplo trifásico

A abordagem com o triplo trifásico usa os mesmos princípios aplicados a modelagem de uma máquina trifásica. Assim, uma primeira transformação de coordenadas pode ser feita, aplicando as transformações da máquina trifásica em cada conjunto trifásico, visando a obtenção de um modelo simplificado.

Este procedimento resulta na transformação de cada conjunto trifásico para os subespaços

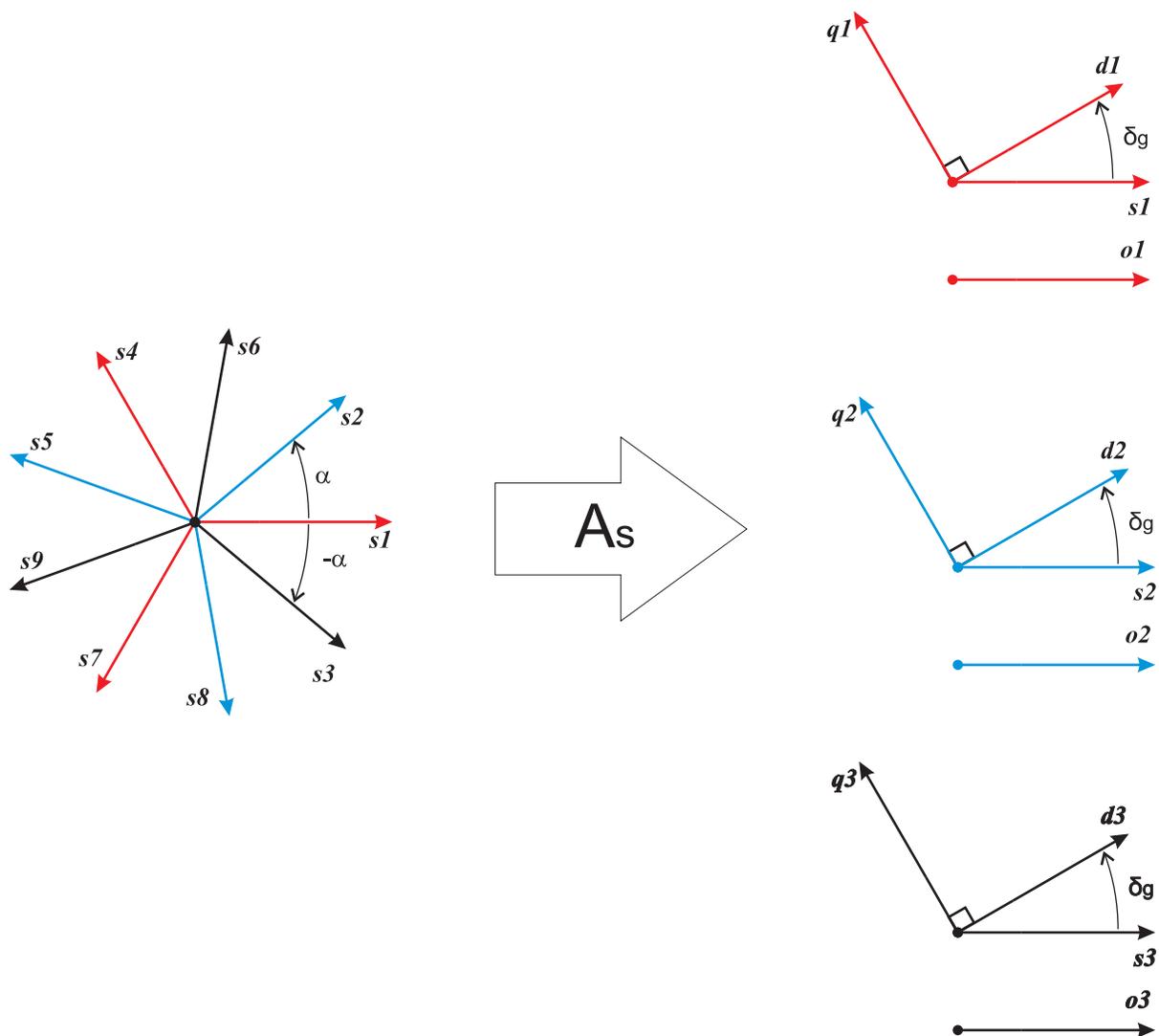


Figura 2.2: Diagrama vetorial Nonafásico e as possíveis transformações de coordenadas para um referencial arbitrário.

$d_1q_1o_1$, $d_2q_2o_2$ e $d_3q_3o_3$, que representam a parte ativa de cada conjunto.

A matriz de transformação de coordenadas \mathbf{A}_s , pode ser formada a partir da transformação de Park, considerando-se o deslocamento entre os grupos trifásicos tal como mostra o diagrama da Figura 2.2. O índice s ou r se refere ao estator ou ao rotor respectivamente. Dessa forma, pode-se escrever para uma variável \mathbf{w} qualquer:

$$\mathbf{w}_{s147258369}^s = \mathbf{A}_s \mathbf{w}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g \quad (2.19)$$

$$\mathbf{w}_{r123}^r = \mathbf{A}_r \mathbf{w}_{rdqo}^g \quad (2.20)$$

com

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{s147258369}^s &= \begin{bmatrix} w_{s1} & w_{s4} & w_{s7} & w_{s2} & w_{s5} & w_{s8} & w_{s3} & w_{s6} & w_{s9} \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{w}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g &= \begin{bmatrix} w_{sd1} & w_{sq1} & w_{o1} & w_{sd2} & w_{sq2} & w_{so2} & w_{sd3} & w_{sq3} & w_{so3} \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{w}_{r123}^r &= [w_{r1} \quad w_{r2} \quad w_{r3}]^T \\ \text{e } \mathbf{w}_{rdqo}^g &= [w_{rd} \quad w_{rq} \quad w_{ro}]^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{s1} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{A}_{s2} & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{A}_{s3} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{A}_{s1} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_g) & -\text{sen}(\delta_g) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{A}_{s2} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_g - \alpha) & -\text{sen}(\delta_g - \alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \frac{2\pi}{3} - \alpha) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{2\pi}{3} - \alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \frac{4\pi}{3} - \alpha) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{4\pi}{3} - \alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{A}_{s3} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_g - 2\alpha) & -\text{sen}(\delta_g - 2\alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \frac{2\pi}{3} - 2\alpha) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{2\pi}{3} - 2\alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \frac{4\pi}{3} - 2\alpha) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{4\pi}{3} - 2\alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{0}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Para as variáveis do rotor, a matriz de transformação usada normalmente para o caso trifásico é dada por

$$\mathbf{A}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\delta_g - \delta_r) & -\text{sen}(\delta_g - \delta_r) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \delta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \delta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \delta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \delta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Aplicando as transformações anteriores em 2.3 e 2.6, as equações de fluxo tornam-se:

$$\boldsymbol{\lambda}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g = \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{ss} \mathbf{A}_s \mathbf{i}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g + \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{sr} \mathbf{A}_r \mathbf{i}_{rdqo}^g \quad (2.27)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{rdqo}^g = \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{L}_{rs} \mathbf{A}_s \mathbf{i}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g + \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{L}_{rr} \mathbf{A}_r \mathbf{i}_{rdqo}^g \quad (2.28)$$

onde

$$\mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{ss} \mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_4 & M_5 & M_6 \\ M_7 & M_8 & M_9 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{1}{2}L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{1}{2}L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 1.5L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1.5L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} 1.5L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{1}{2}L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{1}{2}L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{M}_6 = \begin{bmatrix} 1.5L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\mathbf{M}_7 = \begin{bmatrix} 1.5L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\mathbf{M}_8 = \begin{bmatrix} 1.5L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{M}_9 = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{1}{2}L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{1}{2}L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{sr} \mathbf{A}_r = \mathbf{M}_{sr} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$\mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{rs} \mathbf{A}_r = \mathbf{M}_{sr} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 & \frac{3}{2} & 0 & 0 & \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 & 0 & \frac{3}{2} & 0 & 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$\mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{L}_{rr} \mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{1}{2}L_{mr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{1}{2}L_{mr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

As equações de tensão estáticas em dqo podem ser obtidas como,

$$\mathbf{v}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g = \mathbf{R}_s \dot{\mathbf{i}}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g + \frac{d}{dt} (\boldsymbol{\lambda}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g) +$$

$$+\omega_g \begin{bmatrix} J & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & J & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & J \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{sd1q1o1d2q2o2d3q3o3}^g \quad (2.42)$$

onde $\omega_g = \frac{d\delta_g}{dt}$, e 0_3 é uma matriz nula de ordem 3x3 e

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

de forma análoga, obtém-se as tensões rotóricas

$$\mathbf{v}_{rdqo}^g = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_{rdqo}^g + \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\lambda}_{rdqo}^g) + (\omega_g - \omega_g) J \boldsymbol{\lambda}_{rdqo}^g \quad (2.44)$$

2.1.2 Transformação usando o método da decomposição vetorial

Na abordagem por decomposição vetorial, o sistema original de dimensão nove é transformado nas componentes $dquvxyzwo$. A transformação de coordenadas também tem a propriedade de separar as componentes harmônicas em diferentes grupos e projetá-los nos diferentes subespaços.

A matriz de transformação de coordenadas \mathbf{A}_s , pode ser formada a partir da transformação de Park, considerando-se o deslocamento entre os grupos trifásicos tal como mostra o diagrama da Figura 2.3. O índice s ou r se refere ao estator ou ao rotor respectivamente. Dessa forma, pode-se escrever para uma variável \mathbf{w} qualquer:

$$\mathbf{w}_{s147258369}^s = \mathbf{A}_s \mathbf{w}_{sdquvxyzwo}^g \quad (2.45)$$

$$\mathbf{w}_{r123}^r = \mathbf{A}_r \mathbf{w}_{rdqo}^g \quad (2.46)$$

com

$$\mathbf{w}_{s147258369}^s = \begin{bmatrix} w_{s1} & w_{s4} & w_{s7} & w_{s2} & w_{s5} & w_{s8} & w_{s3} & w_{s6} & w_{s9} \end{bmatrix}^T,$$

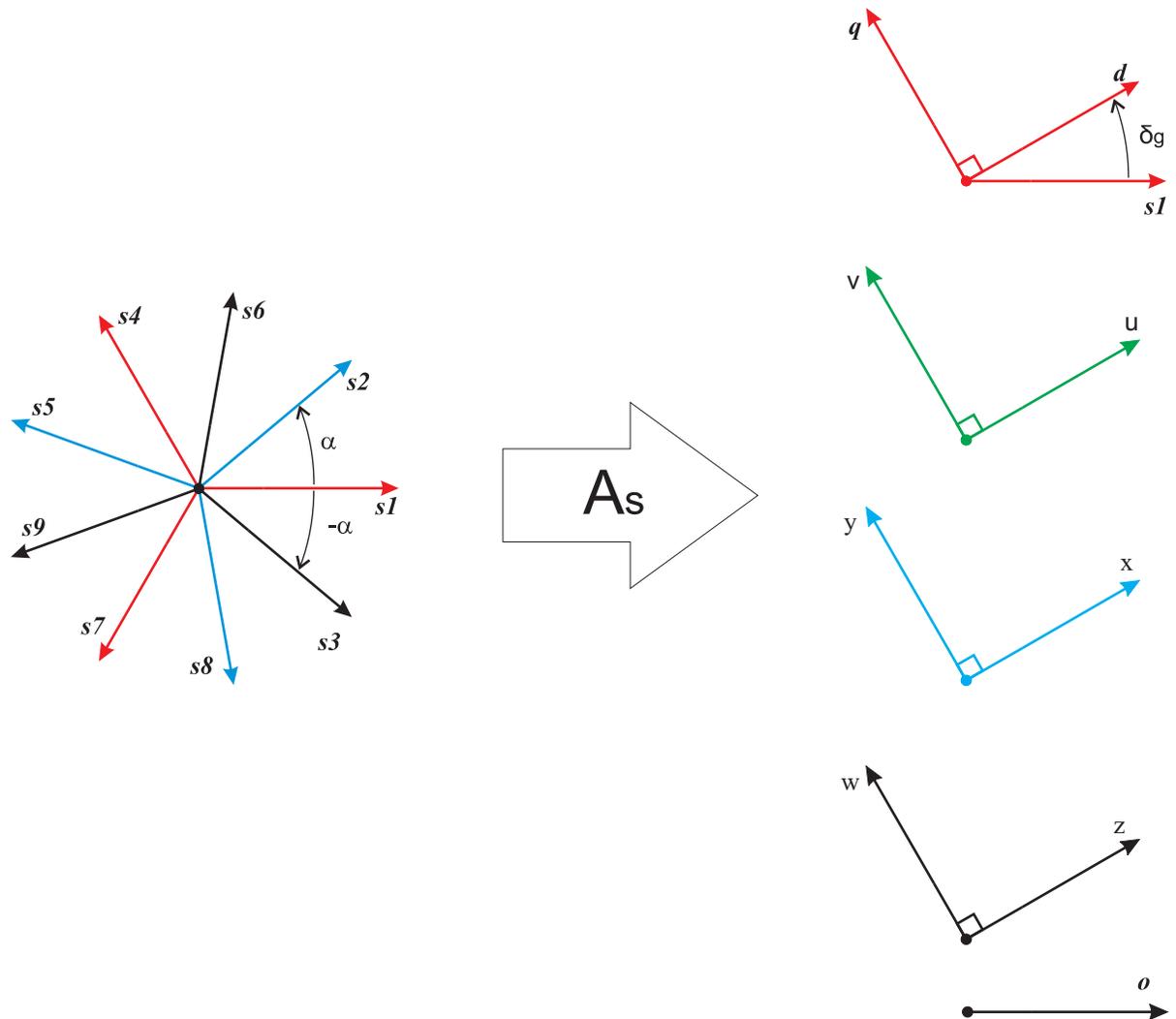


Figura 2.3: Diagrama vetorial Nonafásico e as possíveis transformações de coordenadas para um referencial arbitrário.

$$\mathbf{w}_{\text{sdquvxyzwo}}^{\mathbf{g}} = \begin{bmatrix} w_{sd} & w_{sq} & w_{su} & w_{sv} & w_{sx} & w_{sy} & w_{sz} & w_{sw} & w_{so} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{w}_{\text{r123}}^{\mathbf{r}} = [w_{r1} \quad w_{r2} \quad w_{r3}]^T$$

$$\text{e } \mathbf{w}_{\text{rdqo}}^{\mathbf{g}} = [w_{rd} \quad w_{rq} \quad w_{ro}]^T$$

$$\mathbf{A}_s = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{s1} & \mathbf{A}_{s2} & \mathbf{A}_{s3} \\ \mathbf{A}_{s4} & \mathbf{A}_{s5} & \mathbf{A}_{s6} \\ \mathbf{A}_{s7} & \mathbf{A}_{s8} & \mathbf{A}_{s9} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Onde:

$$\mathbf{A}_{s1} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_g) & -\text{sen}(\delta_g) & \cos(\delta_g) \\ \cos(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$\mathbf{A}_{s2} = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\delta_g) & \cos(\delta_g) & -\text{sen}(\delta_g) \\ -\text{sen}(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$\mathbf{A}_{s3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

$$\mathbf{A}_{s4} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_g - \alpha) & -\text{sen}(\delta_g - \alpha) & \cos(\delta_g + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\delta_g - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\delta_g - \alpha - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha) \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$\mathbf{A}_{s5} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\delta_g + \alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha + \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g + \alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \text{sen}(\delta_g + \alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha) & -\text{sen}(\delta_g + \alpha) \\ \text{sen}(\delta_g + \alpha) & \cos(\delta_g + \alpha + \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\mathbf{A}_{s6} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$\mathbf{A}_{s7} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_g + \alpha) & -\text{sen}(\delta_g + \alpha) & \cos(\delta_g + \alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\delta_g + \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g + \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha) \\ \cos(\delta_g + \alpha - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g + \alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

$$\mathbf{A}_{s8} = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\delta_g + \alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\delta_g + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\delta_g + \alpha) & \cos(\delta_g + \alpha - \frac{4\pi}{3}) & \text{sen}(\delta_g + \alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\delta_g + \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta_g + \alpha) & \text{sen}(\delta_g + \alpha) \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

$$\mathbf{A}_{s9} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Para as variáveis do rotor, a matriz de transformação usada para o caso trifásico é dada por

$$\mathbf{A}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\delta_g - \delta_r) & -\text{sen}(\delta_g - \delta_r) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \delta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \delta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\delta_g - \delta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \delta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Aplicando as transformações anteriores em 2.3 e 2.6, as equações de fluxo tornam-se:

$$\boldsymbol{\lambda}_{sdquvxyzwo}^g = \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{ss} \mathbf{A}_s \mathbf{i}_{sdquvxyzwo}^g + \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{sr} \mathbf{A}_r \mathbf{i}_{rdqo}^g \quad (2.58)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{rdqo}^g = \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{L}_{rs} \mathbf{A}_s \mathbf{i}_{sdquvxyzwo}^g + \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{L}_{rr} \mathbf{A}_r \mathbf{i}_{rdqo}^g \quad (2.59)$$

onde

$$\mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{L}_{rs} \mathbf{A}_r = \mathbf{M}_{sr} \begin{bmatrix} \frac{9}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$\mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{L}_{rr} \mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} L_r + \frac{7}{2} L_{rp} & 0 & 0 \\ 0 & L_r + \frac{7}{2} L_{rp} & 0 \\ 0 & 0 & L_r - L_{rp} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

As equações de tensão estatóricas em dqvxyzwo podem ser obtidas como,

$$\mathbf{v}_{sdquvxyzwo}^g = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{sdquvxyzwo}^g + \frac{d}{dt} (\boldsymbol{\lambda}_{sdquvxyzwo}^g) + \omega_g \begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{sdquvxyzwo}^g \quad (2.67)$$

onde $\omega_g = \frac{d\delta_g}{dt}$, $\mathbf{0}_3$ é uma matriz nula de ordem 3 e

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

de forma análoga, obtém-se as tensões rotóricas

$$\mathbf{v}_{rdqo}^g = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_{rdqo}^g + \frac{d}{dt} (\boldsymbol{\lambda}_{rdqo}^g) + (\omega_g - \omega_r) \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda}_{rdqo}^g \quad (2.69)$$

2.2 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a representação matemática da máquina enefásica, para tal foram utilizados dois métodos de decomposição: o método do triplo trifásico e o método da decomposição vetorial. O modelo do triplo trifásico tem como vantagem a simplificação na obtenção da matriz de transformação, porém usando o método da decomposição vetorial

pode-se obter o total desacoplamento da parte ativa da máquina eneafásica. O modelo apresentado é útil para o estudo via simulação da referida máquina que será desenvolvido no próximo capítulo, assim como os trabalhos futuros com este tipo de máquina.

Capítulo 3

Estudo em malha aberta

Neste capítulo são apresentados os resultados, de simulação e experimentais, do estudo comparativo entre as máquinas trifásica, hexafásica e eneafásica acionadas eletricamente por um conversor estático de dois níveis em malha aberta.

Na seção 3.1 é apresentado o modelo matemático utilizado para o conversor de dois níveis utilizado no acionamento da máquina eneafásica, assim como os cálculos da tensão de referência e do barramento cc aplicadas aos conversores, trifásico, hexafásico e eneafásico para que as condições do acionamento das máquinas trifásica, hexafásica e eneafásica sejam iguais em termos de potência e índice de modulação.

Na seção 3.2 são apresentados os resultados de simulação quanto à distorção harmônica das correntes, tensões de pólo, tensão de fase, correntes dq e correntes por fase.

Na seção 3.3 são apresentados os resultados experimentais do acionamento com um conversor eneafásico usando um carga RL e uma máquina de indução com ângulo entre os conjuntos trifásicos igual a 0° .

3.1 Modelo matemático do conversor eneafásico

A topologia convencional do conversor CC-CA Nonafásico, Figura 3.1, consiste na conexão de um retificador convencional de três braços à maquina Trifásica (MIN na figura)

geradora.

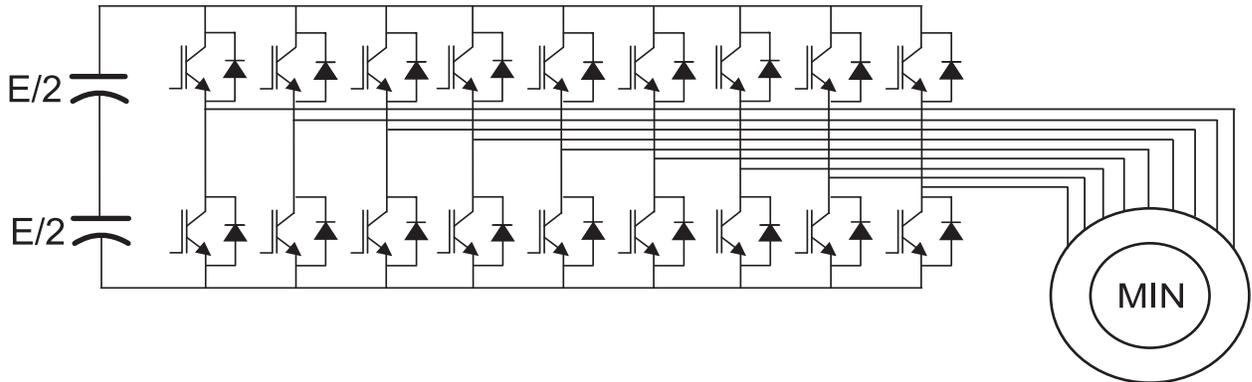


Figura 3.1: Topologia convencional de nove fases.

As tensões de pólo deste conversor são dadas, em função do estado do braço, por

$$v_{s10} = (2q_{s1} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.1)$$

$$v_{s20} = (2q_{s2} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.2)$$

$$v_{s30} = (2q_{s3} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.3)$$

$$v_{s40} = (2q_{s4} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.4)$$

$$v_{s50} = (2q_{s5} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.5)$$

$$v_{s60} = (2q_{s6} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.6)$$

$$v_{s70} = (2q_{s7} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.7)$$

$$v_{s80} = (2q_{s8} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.8)$$

$$v_{s90} = (2q_{s9} - 1) \frac{E}{2} \quad (3.9)$$

Tem-se que as tensões em cada fase da máquina, em função das tensões de pólo são

$$v_{sa} = v_{sa0} - v_{k0} \quad (3.10)$$

onde $a = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$

A tensão homopolar é igual a:

$$v_{k0} = \frac{v_{s10} + v_{s20} + v_{s30} + v_{s40} + v_{s50} + v_{s60} + v_{s70} + v_{s80} + v_{s90}}{9} \quad (3.11)$$

As tensões de pólo de referência deverão ser obtidas a partir tensões de referência nos terminais da máquina para serem comparadas com as portadoras triangulares de alta frequência, determinando assim os instantes de chaveamento das chaves semicondutoras. Dessa forma, as tensões de pólo de referência são dados por

$$v_{sa0}^* = v_{sa}^* + v_{k0}^* \quad (3.12)$$

De maneira que as tensões de pólo de referência respeitem os limites do barramento tem-se:

$$v_{k0min}^* \leq v_{k0}^* \leq v_{k0max}^* \quad (3.13)$$

$$v_{k0min}^* = -\frac{E}{2} - \min\{v_{s1}^*, v_{s2}^*, v_{s3}^*, v_{s4}^*, v_{s5}^*, v_{s6}^*, v_{s7}^*, v_{s8}^*, v_{s9}^*\} \quad (3.14)$$

$$v_{k0max}^* = \frac{E}{2} - \max\{v_{s1}^*, v_{s2}^*, v_{s3}^*, v_{s4}^*, v_{s5}^*, v_{s6}^*, v_{s7}^*, v_{s8}^*, v_{s9}^*\} \quad (3.15)$$

Assim as tensões homopolares são dadas por

$$v_{k0}^* = \mu_k v_{k0max}^* + (1 - \mu_k) v_{k0min}^* \quad (3.16)$$

onde $0 \leq \mu_k \leq 1$.

3.1.1 Tensão de referência

Para cada máquina foi feito um cálculo da tensão de alimentação com o fim de se obter a mesma potência para as três máquinas e assim ser justo na comparação entre as três.

Para que a tensão aplicada a cada máquina dq seja igual para os três casos calcula-se qual a razão de proporção entre o módulo da tensão de fase e o módulo da tensão dq:

$$V_{sdqTri\text{fásico}} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_{Tri} \quad (3.17)$$

$$V_{sdqHexa\text{fásico}} = \sqrt{3} V_{Hex} \quad (3.18)$$

$$V_{sdqno\text{vefases}} = \frac{3}{\sqrt{2}} V_{Nov} \quad (3.19)$$

De posse dos valores de $V_{sdqTri\text{fásico}}$, $V_{sdqHexa\text{fásico}}$ e $V_{sdqNo\text{vefases}}$, pode-se obter a relação das amplitudes das tensões de fase para cada máquina. Sendo assim temos:

$$V_{Hex} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{Tri} \quad (3.20)$$

$$V_{Nov} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{Tri} \quad (3.21)$$

Então para a simulação a máquina trifásica foi alimentada por uma tensão com amplitude igual a $V_{Tri} = 220\sqrt{2} = 311,13V$, a máquina hexafásica foi alimentada por uma tensão com amplitude igual a $V_{Hex} = 220V$ e a máquina de nove fases foi alimentada por uma tensão com $V_{Nov} = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 179,63V$. Nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 mostra-se as tensões aplicadas na simulação da máquina para um ângulo simétrico entre as bobinas do estator.

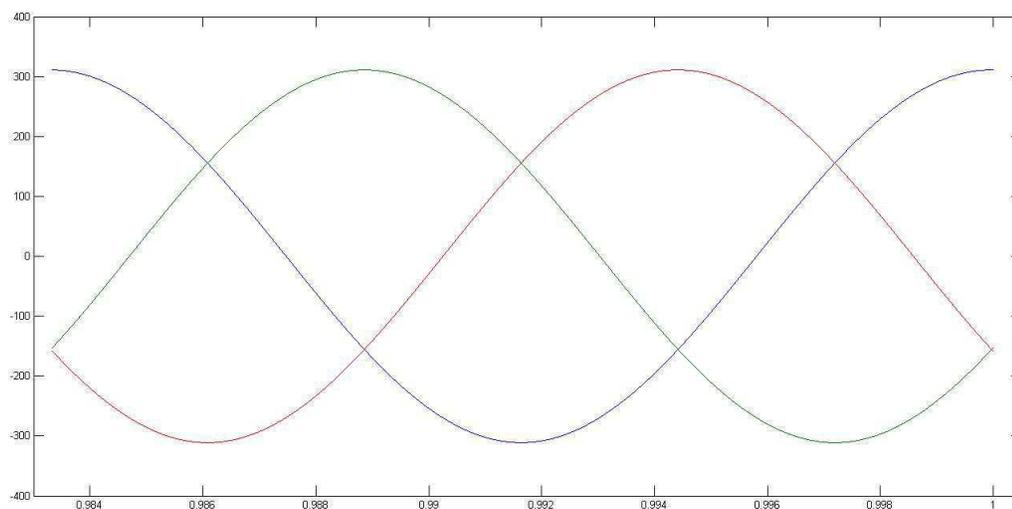


Figura 3.2: Tensões aplicadas na máquina Trifásica

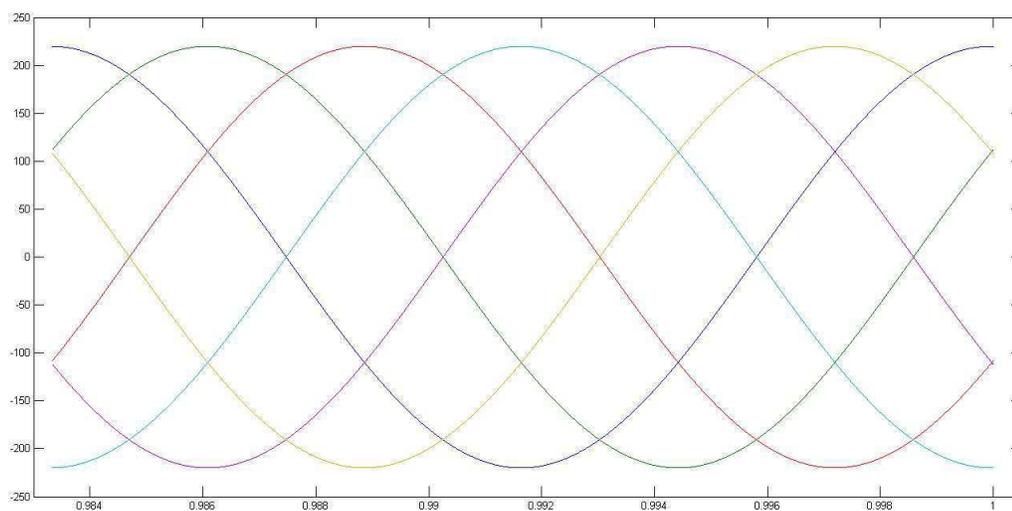


Figura 3.3: Tensões aplicadas na máquina Hexafásica

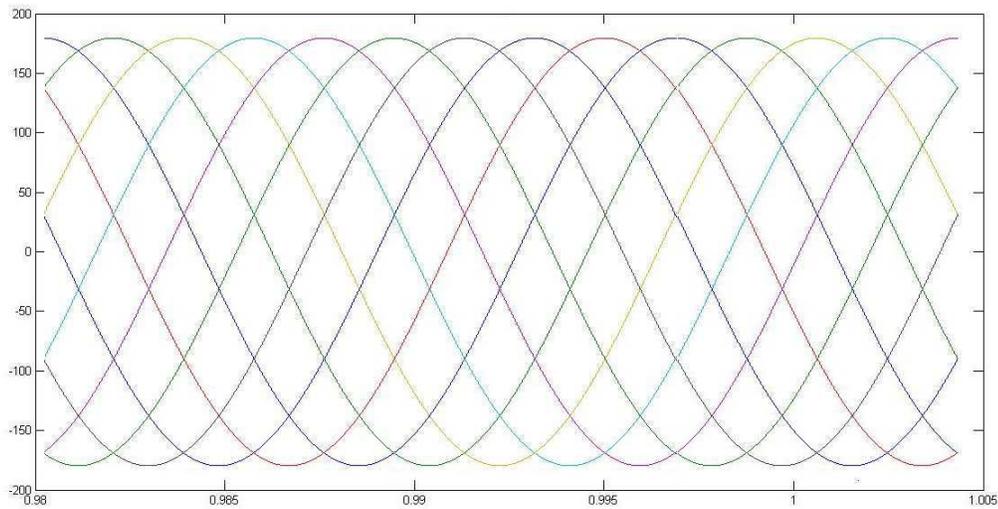


Figura 3.4: Tensões aplicadas na máquina Nove Fases

3.1.2 Tensão do barramento CC

Para que o índice de modulação possa ser calculado é necessário se fazer o cálculo do valor da tensão do barramento CC conectado ao conversor. No caso do conversor convencional ele deve suportar o máximo valor das tensões de linha que serão impostas à cada máquina respectivamente.

As tensões de linha podem ser calculadas a partir das tensões de fase segundo a lei dos cossenos representadas nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7, para as máquinas trifásica, hexafásica e nove fases respectivamente.

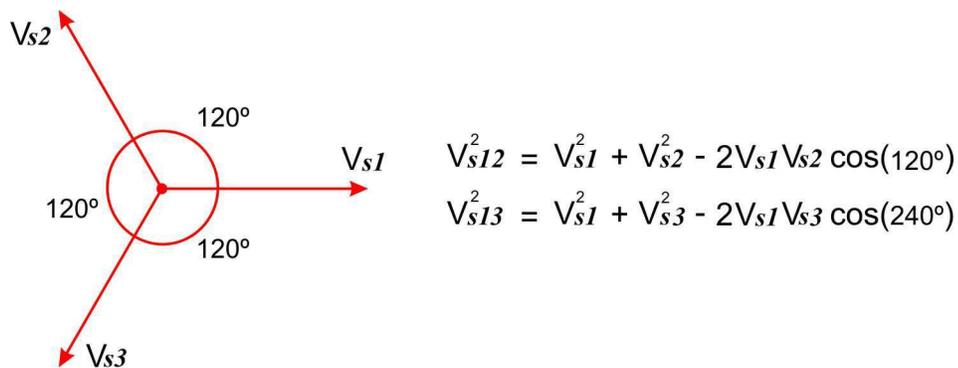


Figura 3.5: Cálculo das tensões de linha para a máquina trifásica.

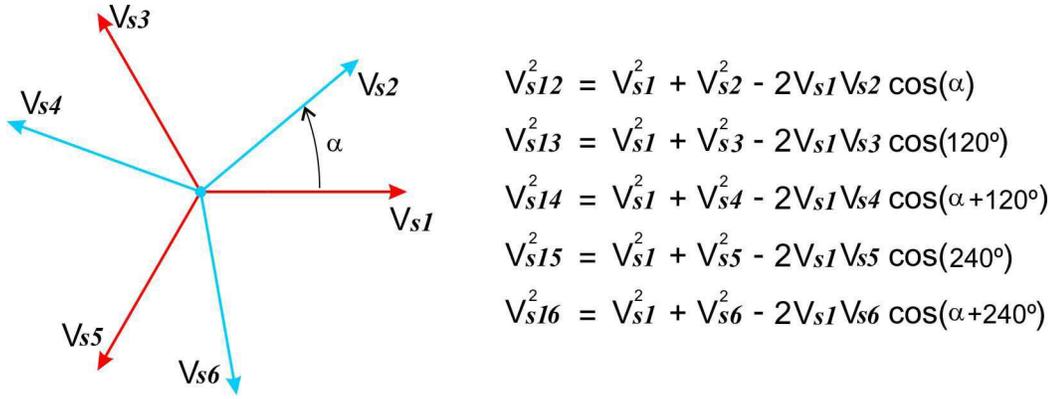


Figura 3.6: Cálculo das tensões de linha para a máquina hexafásica.

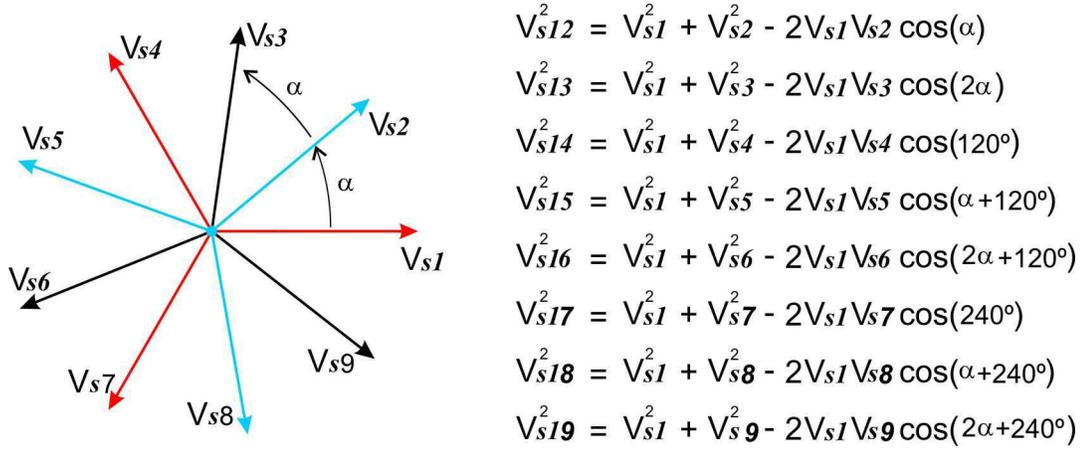


Figura 3.7: Cálculo das tensões de linha para a máquina nove fases.

De posse das máximas tensões de linha pode-se calcular o valor da tensão de barramento a ser utilizada para o índice de modulação desejado. Com o fim de se fazer uma comparação entre as máquinas multifases decidiu-se usar um índice de modulação igual a 0,9 para o conversor convencional conectado às máquinas estudadas. Variando o ângulo entre os conjuntos trifásicos a cada 10° de 0° até o ângulo simétrico, pois após este ângulo a distorção harmônica das correntes possui valores semelhantes aos encontrados, e usando as tensões descritas na seção 4.1.1, tem-se que a tensão de barramento para o caso trifásico é igual a:

$$E_{Tri} = 592,7765V$$

para o caso de seis fases:

$$E_{Hex_0^\circ} = 419,1563V, E_{Hex_{10^\circ}} = 438,653V, E_{Hex_{20^\circ}} = 454,8112V, E_{Hex_{30^\circ}} = 467,5081V, \\ E_{Hex_{40^\circ}} = 476,647V, E_{Hex_{50^\circ}} = 482,1582V, E_{Hex_{60^\circ}} = 484V$$

e para o caso de nove fases:

$$E_{Nov_0^\circ} = 342,2397V, E_{Nov_{10^\circ}} = 358,1586V, E_{Nov_{20^\circ}} = 371,3518V, E_{Nov_{30^\circ}} = 381,7188V, \\ E_{Nov_{40^\circ}} = 389,1806V.$$

3.2 Resultados de simulação

Foram feitas simulações usando o programa MATLAB para as máquinas de três, seis e nove fases conectadas a uma topologia de conversor convencional de dois níveis apresentadas no capítulo três com o fim de se comparar os parâmetros de operação das máquinas e assim verificar se há vantagens no uso da máquina de nove fases.

3.2.1 Distorção harmônica das correntes

Nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, podemos observar os gráficos que relacionam a distorção harmônica ao parâmetro de modulação μ e o ângulo entre os conjuntos trifásicos das máquinas de três, seis e nove fases.

Para o caso da máquina trifásica se vê que a distorção harmônica das correntes, Figura 3.8, varia em torno de 8%, sendo que para $\mu = 0.5$ obtêm-se o melhor valor de distorção harmônica, 7,42%.

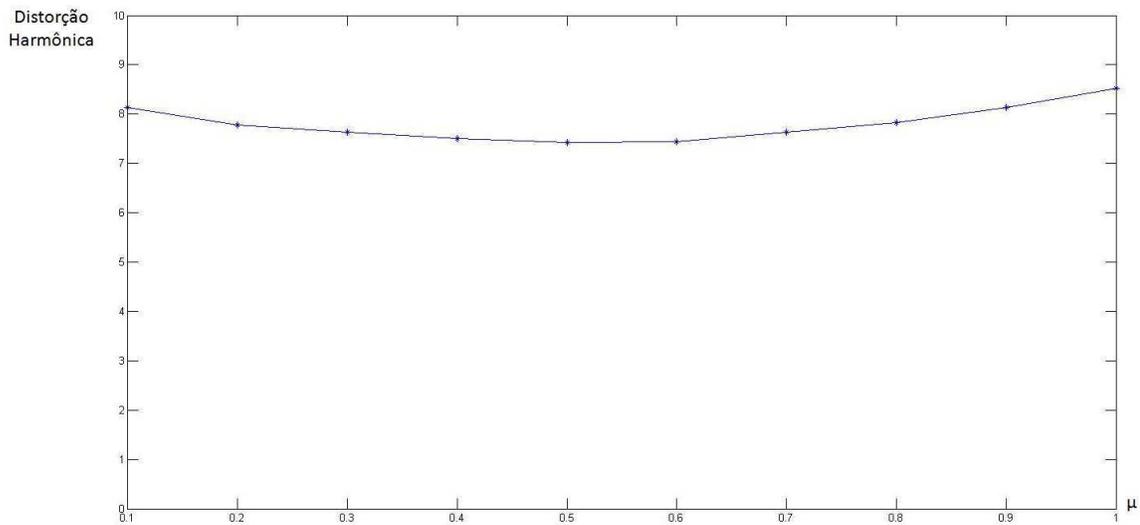


Figura 3.8: Distorção harmônica das correntes de fase para a máquina trifásica.

Já para o caso da máquina hexafásica se vê que a distorção harmônica das correntes, Figura 3.9, diminui para todos os valores de μ com o aumento do valor do ângulo entre os conjuntos trifásicos até o valor do ângulo simétrico, $\alpha = 60^\circ$, sendo que o melhor valor de distorção harmônica, 4,03%, é quando $\alpha = 60^\circ$ e $\mu = 0.5$.

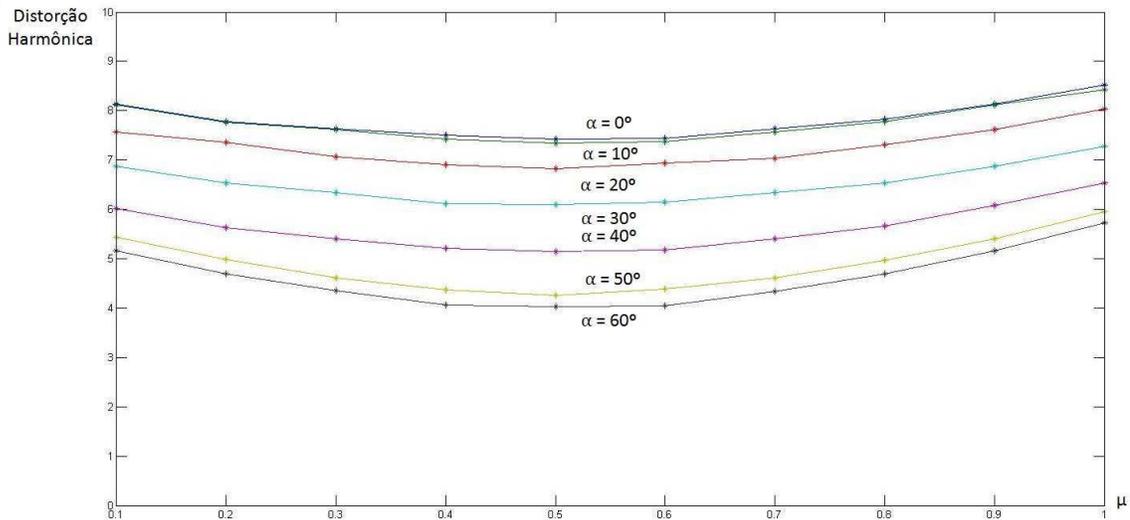


Figura 3.9: Distorção harmônica das correntes de fase para a máquina hexafásica.

Para o caso da máquina nove fases se vê que a distorção harmônica das correntes, Figura 3.10, diminui, assim como na máquina hexafásica, para todos os valores de μ com o aumento

do valor do ângulo entre os conjuntos trifásicos até o valor do ângulo simétrico, $\alpha = 40^\circ$, sendo que o melhor valor de distorção harmônica, 3,62%, é quando $\alpha = 40^\circ$ e $\mu = 0.5$.

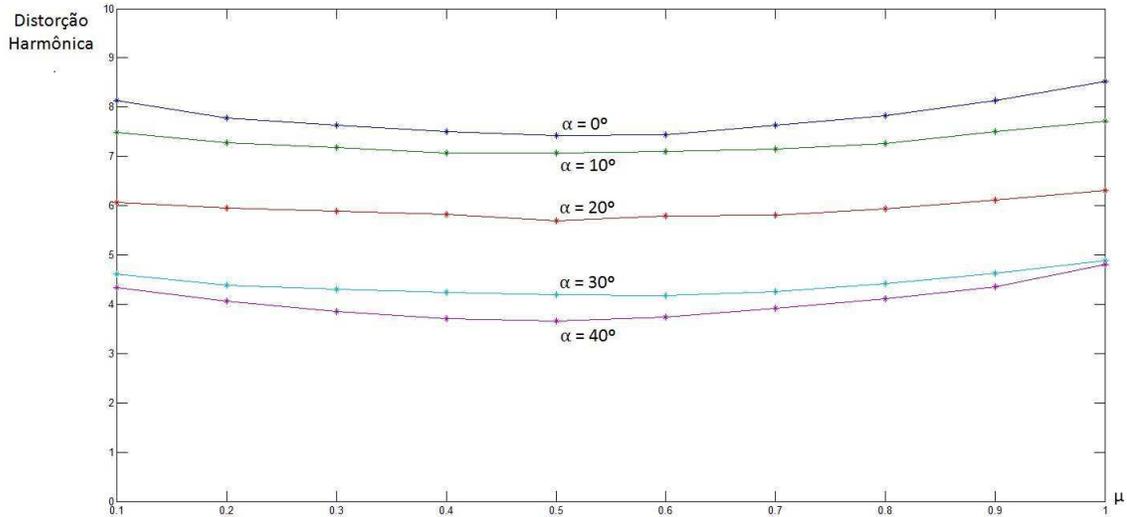


Figura 3.10: Distorção harmônica das correntes de fase para a máquina nove fases.

Nas próximas seções serão mostradas as tensões de polo de referência, tensões de fase, correntes dq e correntes por fase, para as máquinas trifásica, hexafásica simétrica e nove fases simétrica.

3.2.2 Tensões de polo de referência e tensões de fase

As tensões de polo foram calculadas conforme as equações de (174) à (183) para o caso trifásico, de (184) à (196) para o caso Hexafásico e de (197) à (212) para o caso da máquina nove fases. Nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 podemos observar as tensões de polo de referência para cada máquina e as ondas triangulares de comparação para cada uma delas.

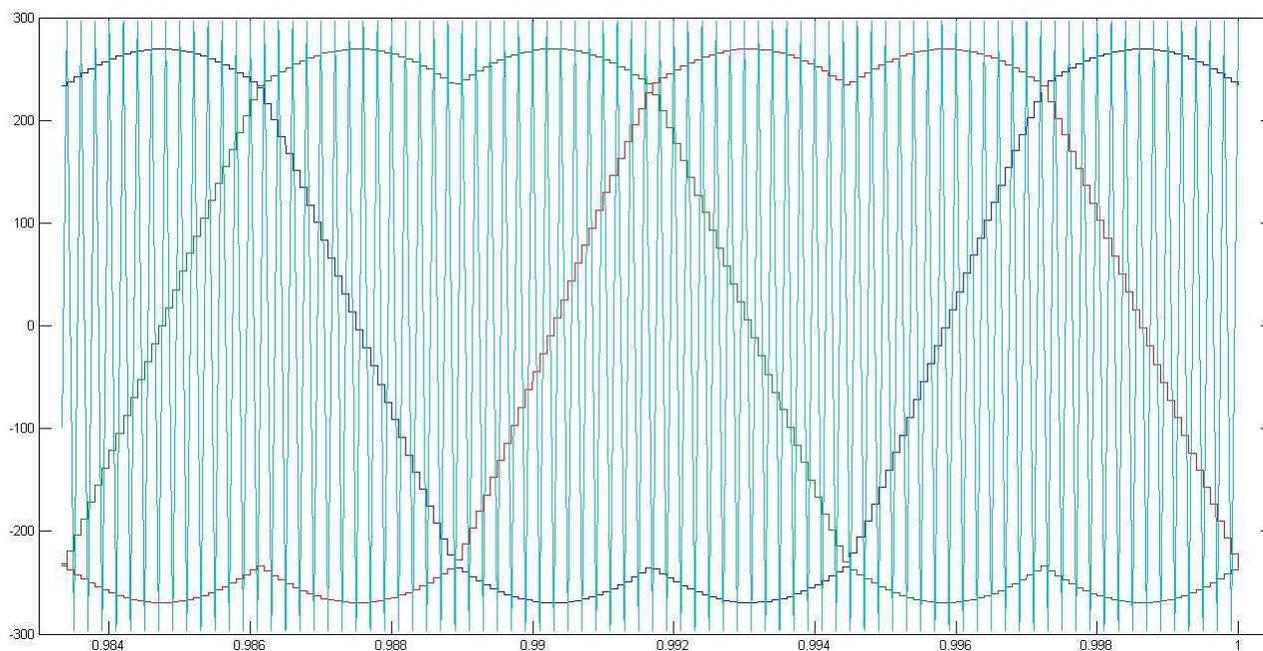


Figura 3.11: Tensões de polo para a máquina Trifásica

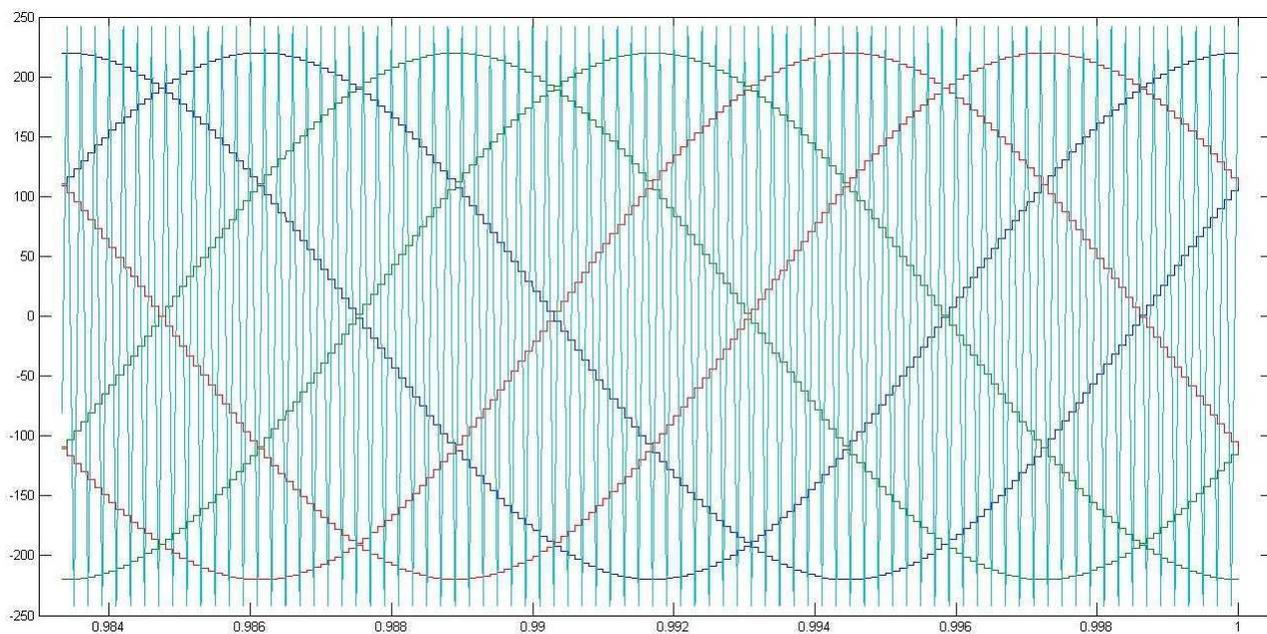


Figura 3.12: Tensões de polo para a máquina Hexafásica

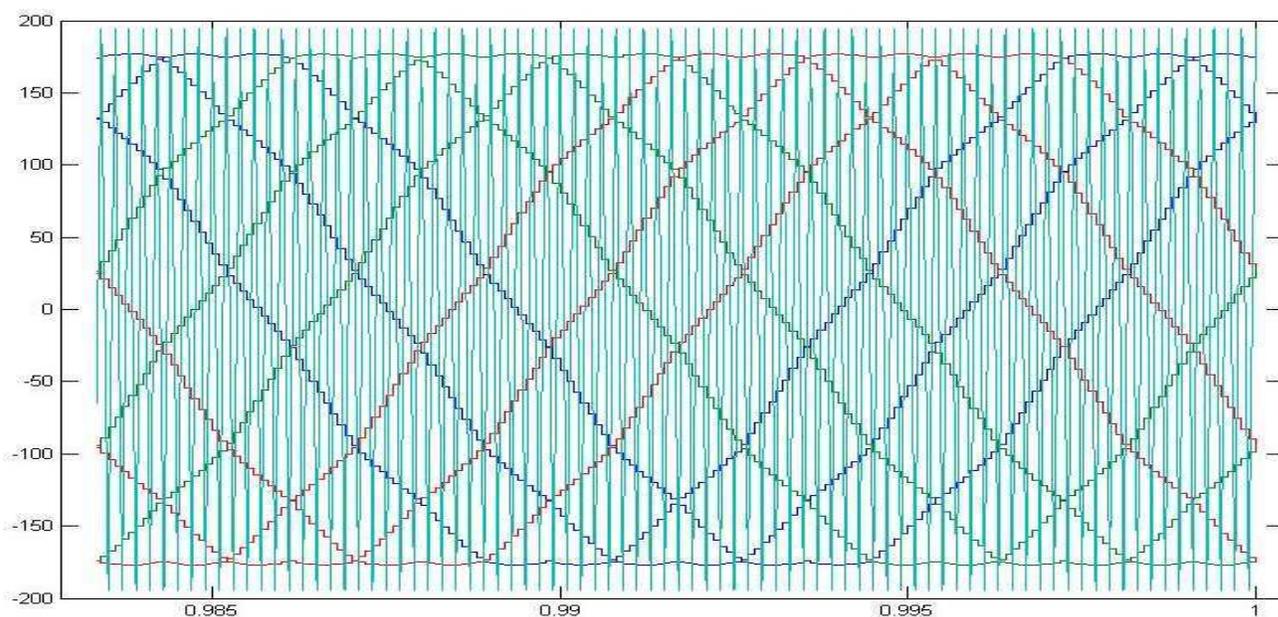


Figura 3.13: Tensões de polo para a máquina Nove Fases

Nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 podemos observar a tensão da fase 1 para cada máquina.

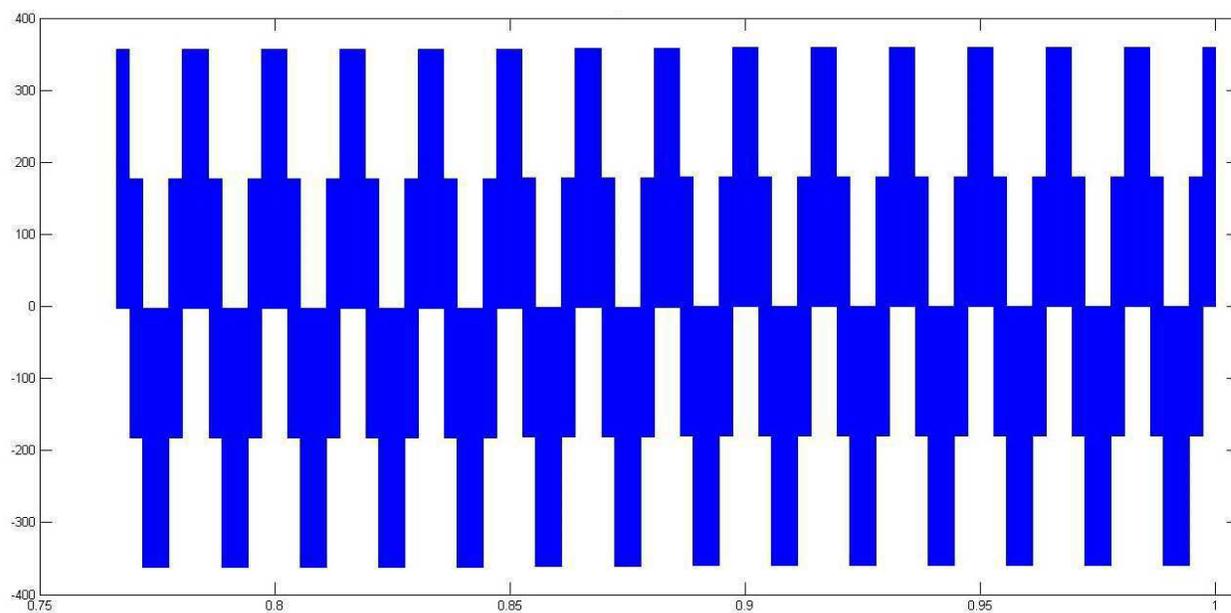


Figura 3.14: Tensões de fase para a máquina Trifásica

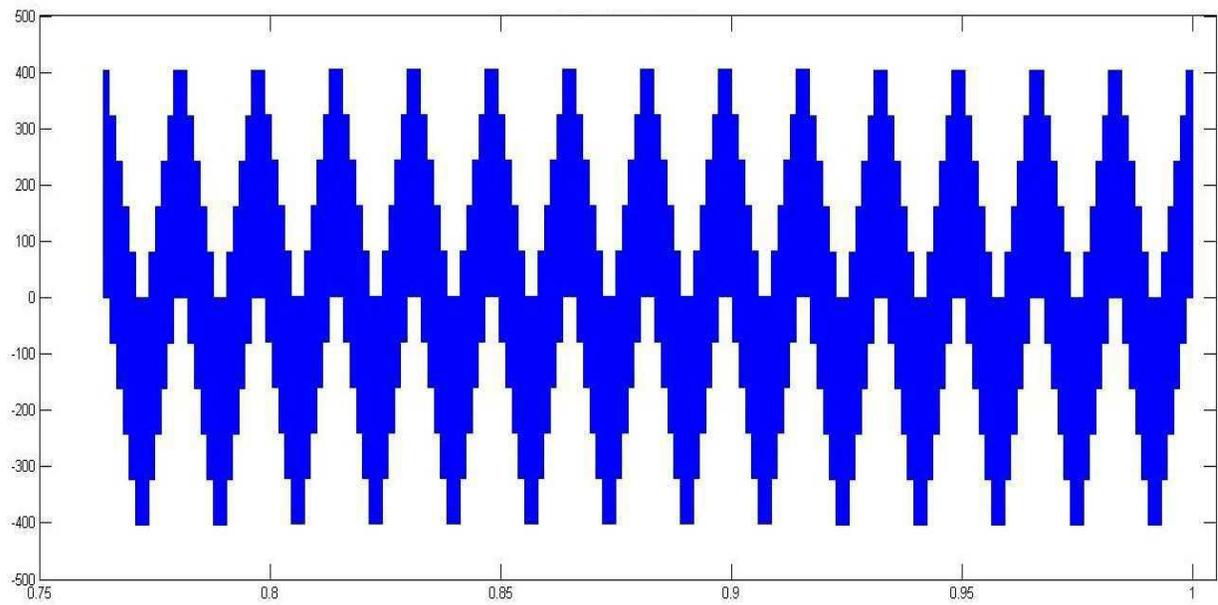


Figura 3.15: Tensões de fase para a máquina Hexafásica

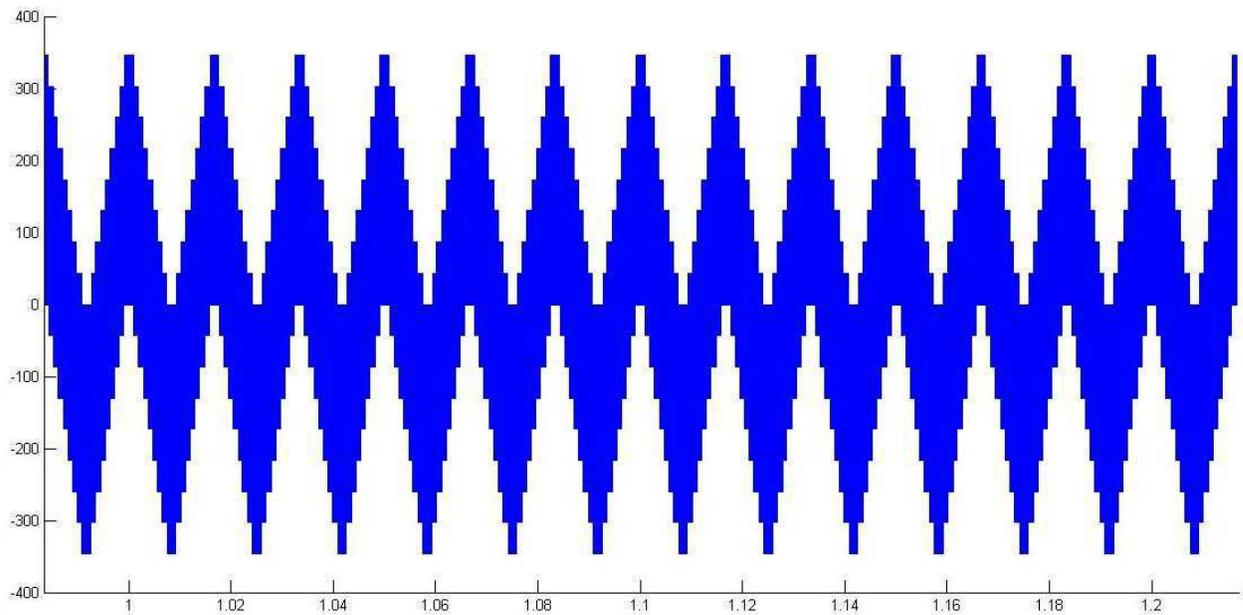


Figura 3.16: Tensões de fase para a máquina Nove Fases

3.2.3 Correntes dq

Nas Figuras 3.17, 3.18 e 3.19 podemos observar as correntes dq para cada máquina.

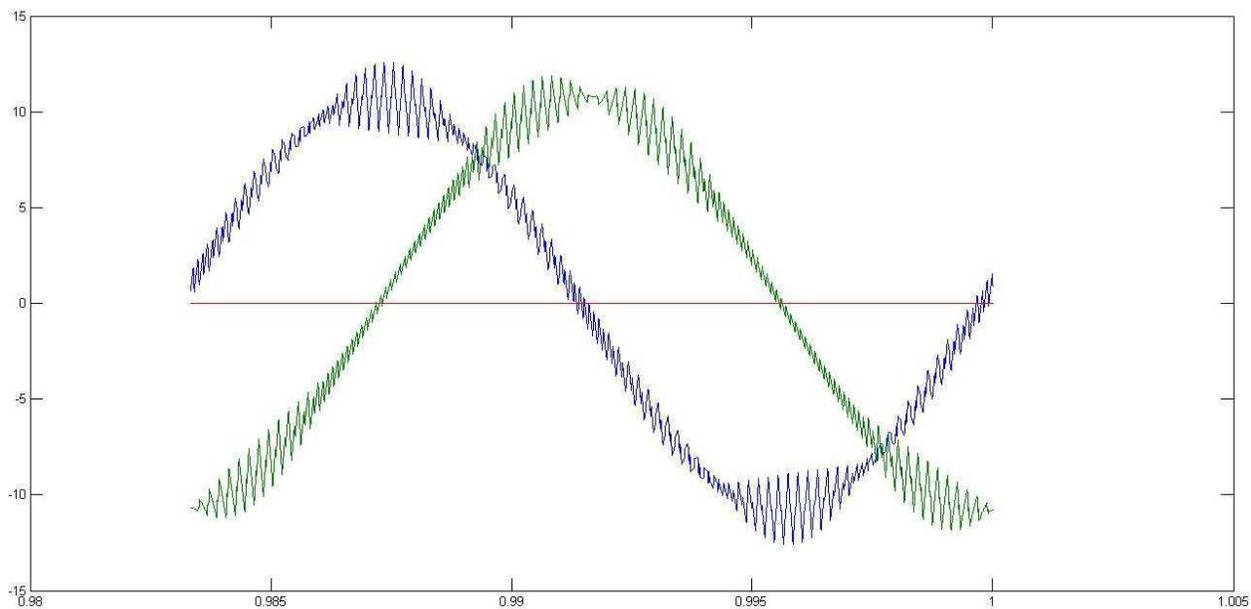


Figura 3.17: Correntes dq para a maquina Trifásica

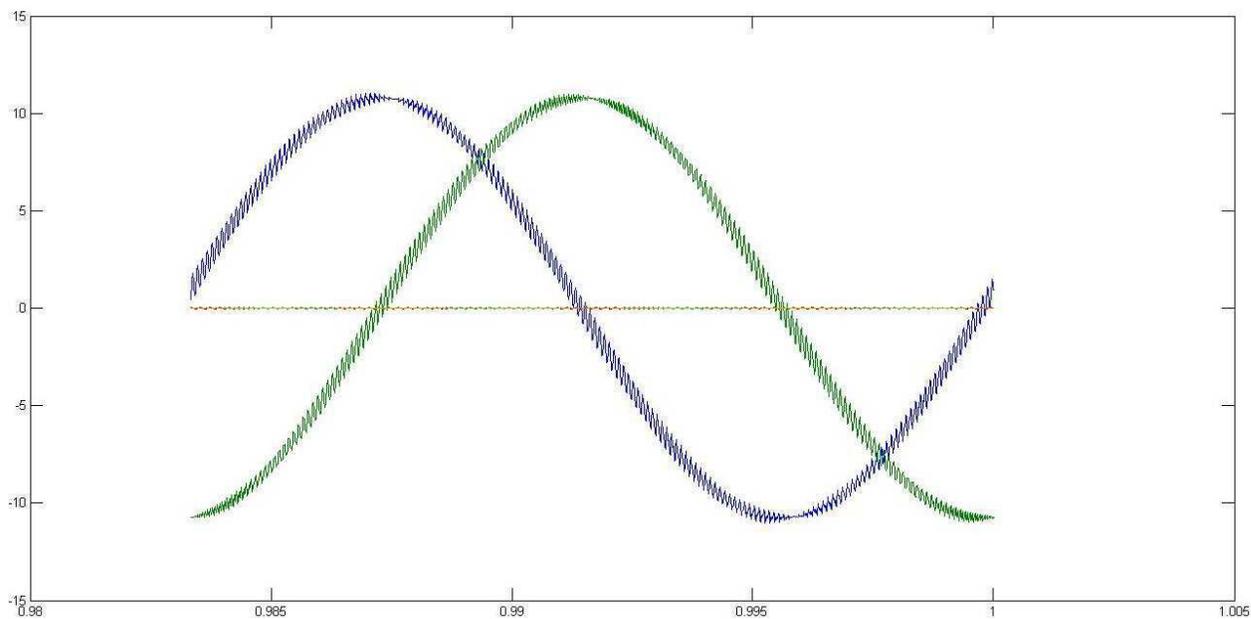


Figura 3.18: Correntes dq para a máquina Hexafásica

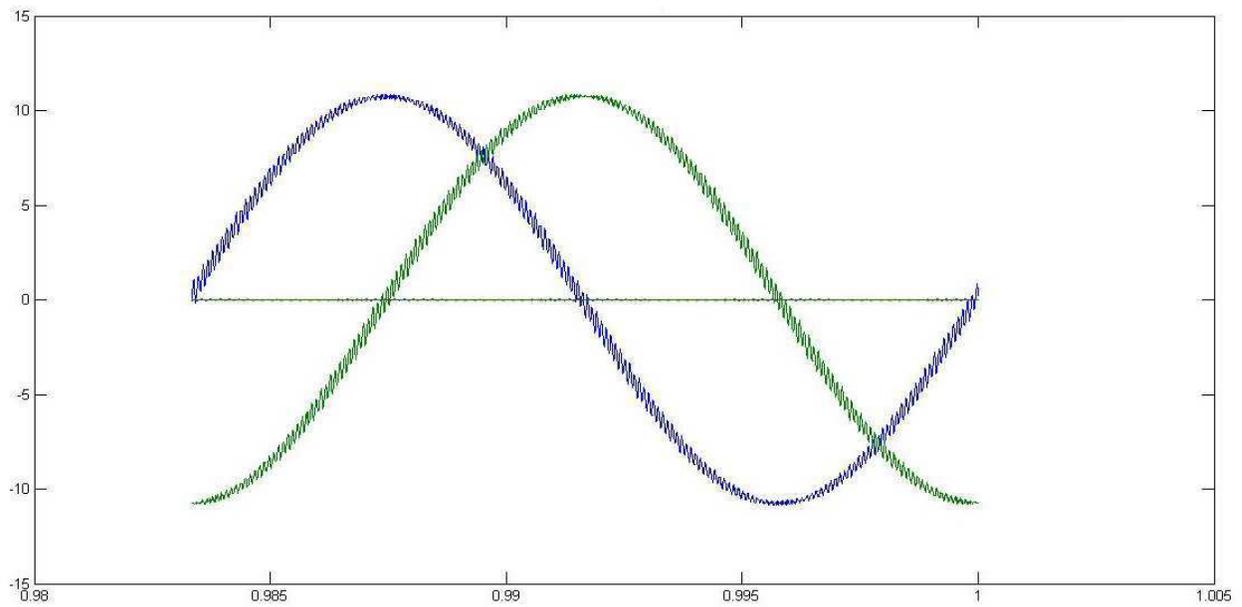


Figura 3.19: Correntes dq para a máquina nove fases

3.2.4 Correntes por fase

Nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 podemos observar a tensão da fase A para cada máquina.

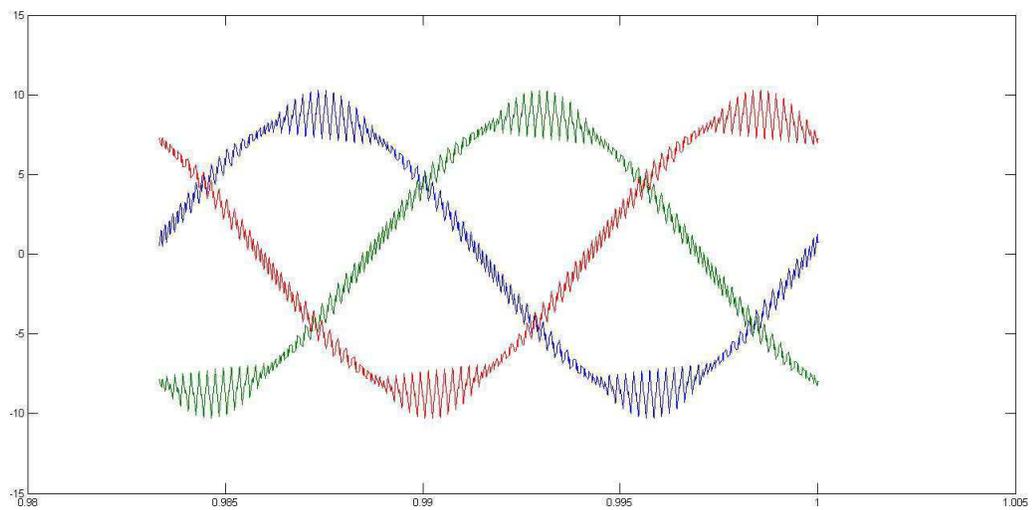


Figura 3.20: Correntes da máquina Trifásica por fase

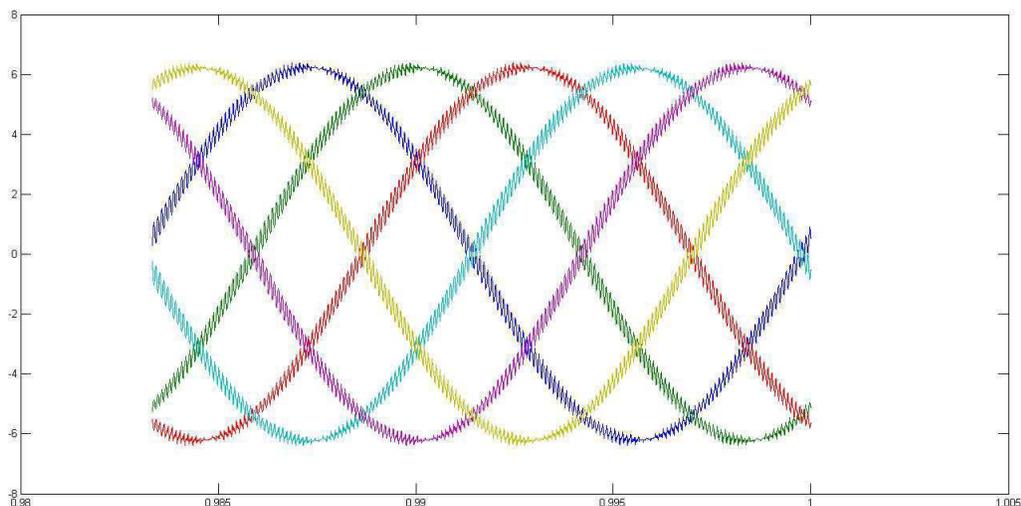


Figura 3.21: Correntes da máquina Hexafásica por fase

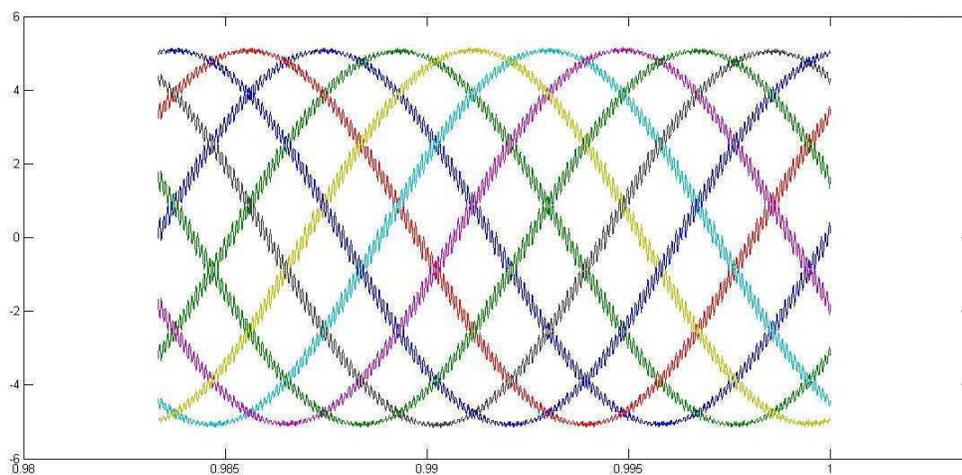


Figura 3.22: Correntes da máquina nove fases por fase

3.3 Resultados experimentais

3.3.1 Acionamento de uma carga RL

Foram realizados experimentos usando uma carga RL, Figura 3.23, com o fim de verificar as tensões e correntes geradas para a máquina nove fases.



Figura 3.23: Carga RL usada no laboratório

Neste experimento foram utilizadas nove cargas RL ligadas como observa-se na Figura 3.24 e as correntes e tensões obtidas foram as das Figuras 3.25, 3.26, 3.27 e 3.28.

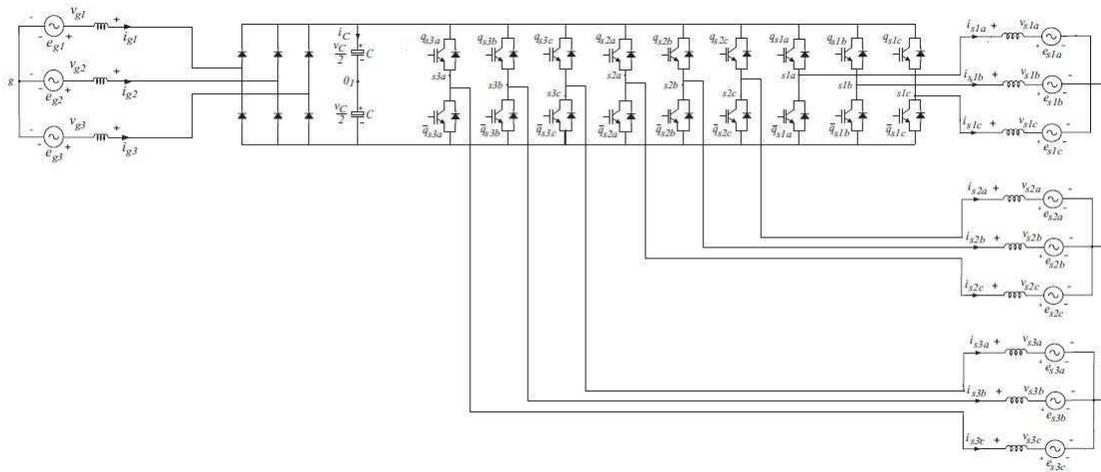


Figura 3.24: Circuito com carga RL nove fases

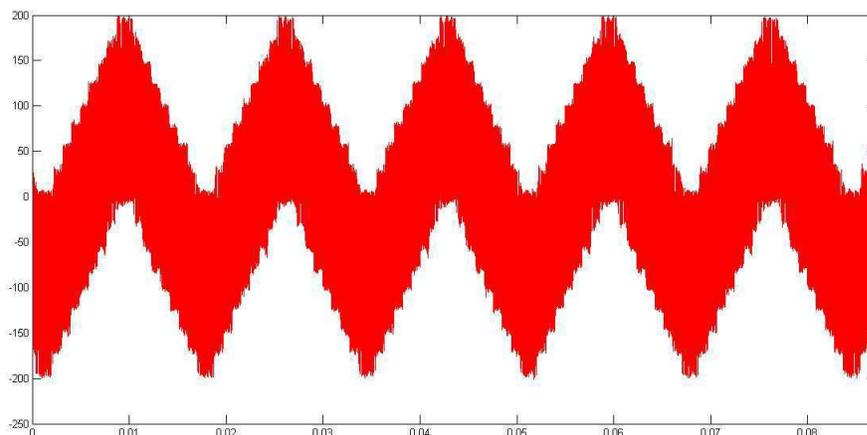


Figura 3.25: Tensão na carga RL Nove Fases

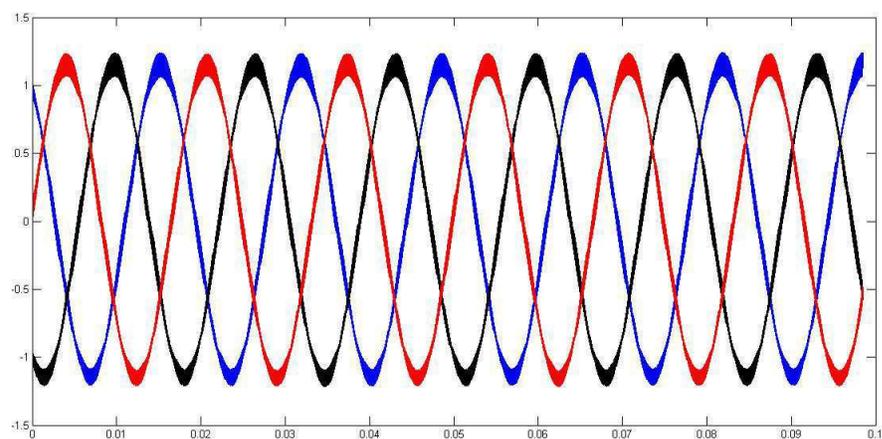


Figura 3.26: Correntes do grupo A na carga RL nove fases

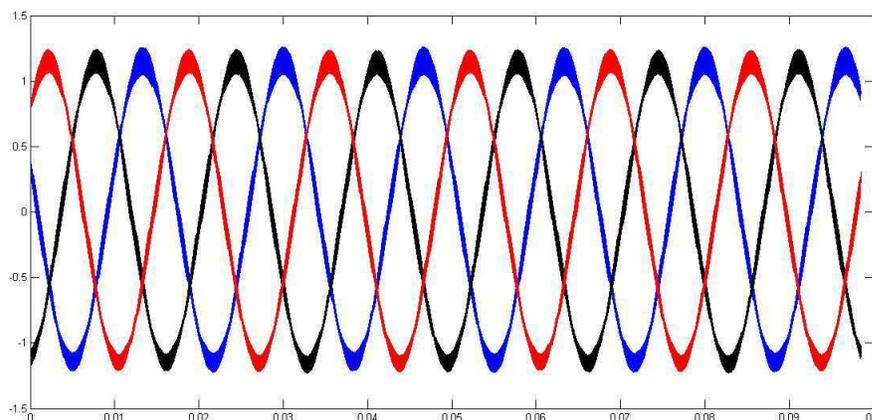


Figura 3.27: Correntes do grupo B na carga RL nove fases

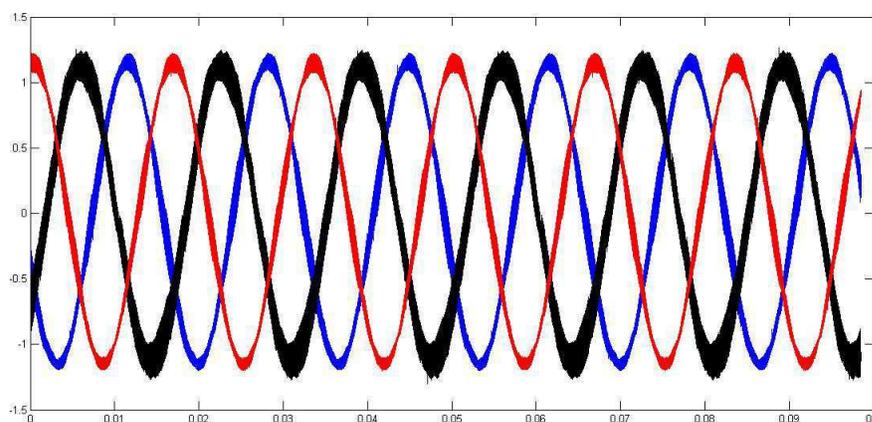


Figura 3.28: Correntes do grupo C na carga RL nove fases

As tensões de fase geradas são semelhantes as da Figura 3.16, isso indica que os resultados experimentais se aproximarão dos resultados obtidos nas simulações, além de podermos prever os valores de tensão, corrente, potência, se os parâmetros da máquina forem estimados e inseridos na simulação.

3.3.2 Acionamento de uma máquina de indução eneafásica com defasagem entre os conjuntos trifásicos igual a 0°

Nesta fase de experimentos foi utilizada uma máquina de indução trifásica com os enrolamentos particionados em três pontos de tal forma que a mesma máquina pode ser utilizada com ligação trifásica ou com ligação de nove fases. Na Figura 3.29 podemos observar como estão dispostos os enrolamentos da máquina.

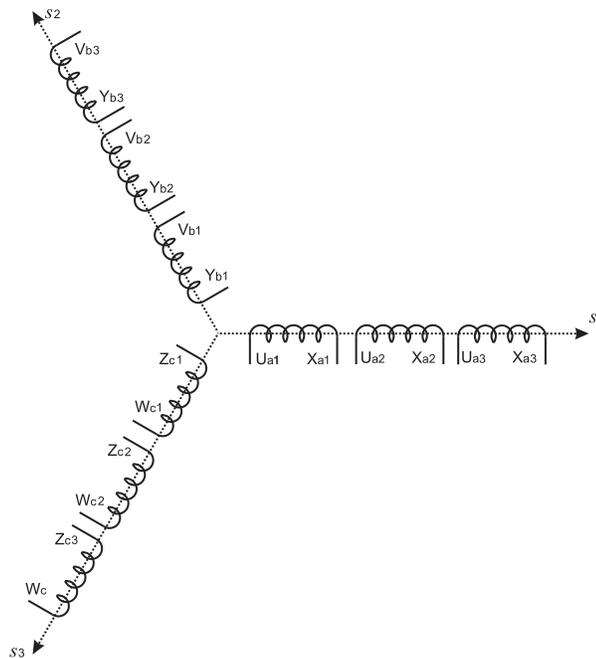


Figura 3.29: Bobinas da máquina usada nos experimentos

Para operar a máquina com ligação de nove fases conectou-se os enrolamentos como na Figura 3.30 e usando uma tensão de referência de 100V por fase obtemos como resultado as tensões chaveadas mostradas na Figura 3.31 e as correntes mostradas na Figura 3.32

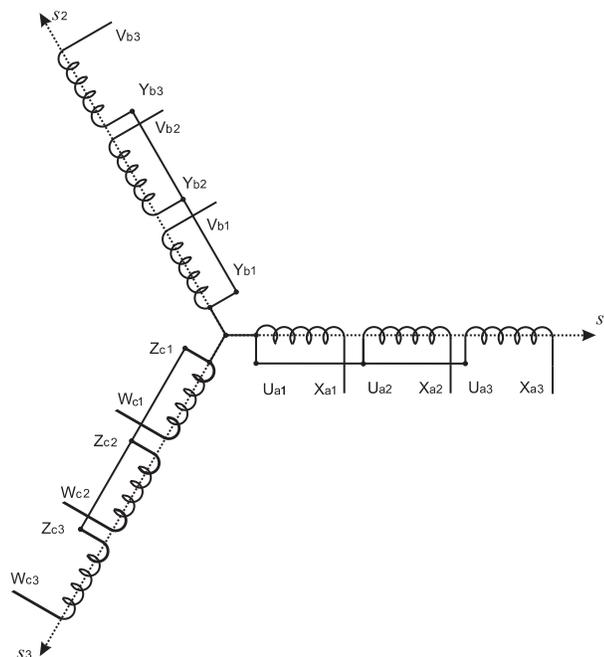


Figura 3.30: Bobinas da máquina usada nos experimentos usando a conexão nove fases

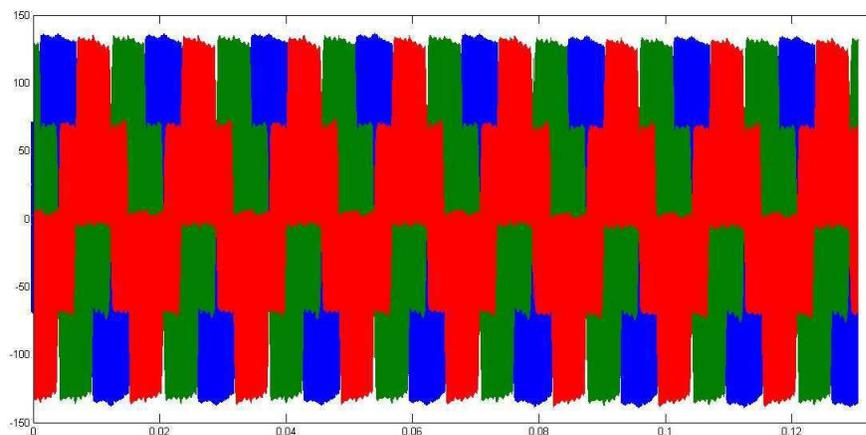


Figura 3.31: Tensão da máquina nove fases

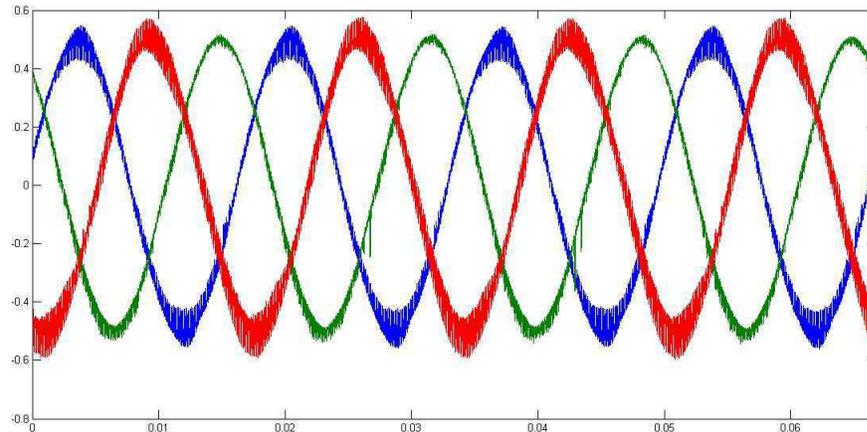


Figura 3.32: Correntes na máquina com conexão nove fases

Apesar de não possuímos uma máquina nove fases simétrica, pudemos verificar o funcionamento de uma máquina com ângulo de deslocamento 0° . Na operação ela funcionou como esperamos, já que as tensões chaveadas possuem 5 níveis e as correntes em cada grupo estão defasados de 120° .

3.4 Conclusão

A partir dos resultados de simulação podemos concluir que a máquina com nove fases possui algumas vantagens em relação às outras máquinas. A tensão no barramento CC do conversor eneafásico, considerando as mesmas potências para as máquinas, é 34,34% menor que o valor do barramento CC do conversor trifásico e 19,60% menor que o valor do barramento CC do conversor hexafásico para os casos simétricos. Para os outros valores de α a relação entre as tensões de barramento também é favorável ao caso eneafásico que necessita de valores bem menores que os conversores trifásico e hexafásico. O número de níveis da tensão de fase para a máquina de nove fases é maior já que para a máquina trifásica $Níveis_{v_{fase}} = 5$, para a máquina hexafásica $Níveis_{v_{fase}} = 11$ e para a máquina nove fases $Níveis_{v_{fase}} = 17$, isso implica em uma distorção harmônica das correntes de fase e dq menor, caso simétrico, na máquina nove fases (3,62%) em comparação às máquinas trifásica (7,42%)

e hexafásica (4,03%). Outra vantagem da máquina nove fases é o nível menor da amplitude da corrente por fase, ela é 44,4% menor que a corrente trifásica e 16,67% menor que a corrente hexafásica para o caso simétrico.

Quanto aos resultados experimentais com uma carga RL pudemos observar a tensão aplicada na carga comprovando que os 17 níveis da tensão obtidos na simulação também podem ser gerados a partir do nosso equipamento experimental. Além disso pudemos acionar uma máquina nove fases com ângulo entre conjuntos trifásicos de 0° , construída a partir de uma máquina trifásica, e verificar que a mesma apresenta operação normal e que de fato as tensões de barramento, de fase e as correntes de fase possuem valores menores para a operação em velocidade nominal.

Capítulo 4

Conclusão geral e trabalhos futuros

Neste capítulo serão feitas as conclusões gerais, assim como a descrição de trabalhos futuros que possam representar mais contribuições para o estudo das máquinas de nove fases.

4.1 Conclusão geral

Este trabalho deixa como legado o início dos estudos para a máquina elétrica eneafásica no que diz respeito a elaboração de um modelo matemático simplificado condizente com outros modelos já estudados em outras publicações. Além disso o estudo comparativo entre as máquinas já demonstra que a máquina nove fases possui muitas vantagens se comparada à máquinas com número de fases menor de fases, tais como: melhor distorção harmônica das correntes, menor tensão de barramento, menores tensão e corrente por fase, entre outras. Além disso por ser uma máquina pouco explorada na literatura há muito o que pesquisar para se estabelecer o nicho de aplicação da mesma. Considerando as aplicações atuais há várias áreas onde se pode explorar o uso das máquinas eneafásicas com destaque para o uso na geração de energia por fontes alternativas e no desenvolvimento de veículos elétricos.

No capítulo 1 foi feita uma apresentação do tema de forma a destacar a impotência das máquinas elétricas na indústria e na geração de energia elétrica. Na seção referente às referências bibliográficas foram apresentadas as publicações relacionadas à máquina elétrica

eneafásica, assim como algumas publicações referentes à máquina multifases. No capítulo 2 foram apresentados duas representações matemáticas para a máquina enefásica, uma obtida a partir da decomposição pelo método do triplo trifásico onde a partir a transformação de Park para o caso trifásico escreve-se a matriz de transformação para o caso enefásico. A outra representação é obtida a partir do método da decomposição vetorial que resulta em uma representação onde se tem o total desacoplamento da parte ativa da máquina. No capítulo 3 foram apresentados resultados, via simulação, do estudo comparativo entre as máquinas trifásica, hexafásica e enefásica no que diz respeito à amplitude das tensões de barramento e de fase aplicadas à máquina e ao conversor de dois níveis, distorção harmônica total das corrente de fase para cada máquina considerando a variação do parâmetro μ e do ângulo entre os conjuntos trifásicos verificando que a máquina enefásica possui vantagens em relação às outras máquinas. Além disso foi abordada a comparação das tensões de fase e de pólo. No mesmo capítulo foram apresentados resultados experimentais para uma carga RL e para uma máquina enefásica com 0° de ângulo entre os conjuntos trifásicos.

4.2 Trabalhos futuros

Há poucas publicações referentes às máquinas elétricas enefásicas se comparada, por exemplo, com outras máquinas multifases. Porém já há algumas publicações que indicam que a mesma é uma boa opção para aplicações em geração de energia eólica e para veículos elétricos. Neste sentido o desenvolvimento de trabalhos para estas duas aplicações se mostra uma boa opção.

Na seção 1.1 foram descritas algumas vantagens das máquinas multifases e o estudo comparativo para análise quantitativa e qualitativa da mesma em relação a outras configurações é um tema relevante com o fim de justificar o uso da mesma nas mais diversas aplicações. Na área da eletrônica de potência há várias topologias e técnicas de modulação que podem ser desenvolvidas para a máquina enefásica contribuindo para melhorar na qualidade da energia,

assim como para aumentar as possibilidades de aplicação da mesma. Na área de controle para a máquina enefásica pode-se desenvolver vários estudos se considerados os controladores com realimentação, PI modificado por exemplo, e as possibilidades que não utilizam sensores, por exemplo o controlador por logica fuzzy, no controle das variáveis elétricas e mecânicas.

Por fim pode-se realizar trabalhos referentes ao estado da arte em cada uma das áreas citadas com o fim de diversificar as pesquisas futuras e direcionar a produção científica em áreas promissoras.

Referências Bibliográficas

- [1] Franchi, C. M. “Acionamentos elétricos”, Editora Érica, 4^a Edição, São Paulo, 2008.
- [2] T. Sawa and T. Kume, “Motor drive technology - history and visions for the future,” in in Proc. of PESC, pp. 2-9, Junho, 2004.
- [3] Cartilha WEG: Uso eficiente de energia elétrica, 2005.
- [4] LIPO, T. A. A d-q model for six phase induction machine. In: Rec. Int. Conf. Eletric Machine, Greece. 1980. p. 860–867.Z. Chen, J. M. Guerrero, F.
- [5] C. B. Jacobina, “Sistema de acionamento estático de máquina elétrica”, Apostila de Acionamentos Elétricos, UFCG, 2005.
- [6] Isaac Soares de Freitas, “Sistemas de Acionamento Estático Usado Máquinas de Indução Polifásicas”, Dissertação de mestrado, UFCG, Março, 2005.
- [7] Reginaldo Sousa Miranda, “Sistemas de Acionamentos CA Multifases com Estratégias de Controle Tolerante à Faltas e Redução da Tensão de Modo Comum”, Tese de Doutorado, UFCG, Julho, 2007.
- [8] Clayton Ricarte da Silva, “Contribuição ao Estudo dos Sistemas de Acionamentos de Máquinas Assíncronas Hexafásicas”, Tese de Doutorado, UFCG, Fevereiro, 2007.

- [9] Rockhill, A.A. Lipo, T.A. “A simplified model of a nine phase synchronous machine using vector space decomposition”, *Power Electronics and Machines in Wind Applications*, 2009. PEMWA 2009. IEEE, Junho, 2009.
- [10] Ruba, M. Fodorean, D. “Analysis of Fault-Tolerant Multiphase Power Converter for a Nine-Phase Permanent Magnet Synchronous Machine”, *Industry Applications*, IEEE Transactions on, outubro, 2012.
- [11] Al-Adsani, A.S. Schofield, N. “Comparison of three- and nine-phase hybrid permanent magnet generators”, *Industrial Electronics*, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, Novembro, 2009.
- [12] Gautam, A. Ramezani, M. Momoh, O. “Computation of equivalent circuit parameters of nine-phase induction motor in different operating modes”, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, setembro 2012.
- [13] Jin Wang. Libing Zhou. Ronghai Qu. “Harmonic current effect on torque density of a multiphase permanent magnet machine”, *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011 International Conference on, Agosto 2011.
- [14] Gautam, A. Karugaba, S. Ojo, J. “Modeling of Nine-Phase Interior Permanent Magnet Machines (IPM) Including Harmonic Effects”, *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011 IEEE International, Maio, 2011.
- [15] Subotic, I. Levi, E. Jones, M. Graovac, D. “On-board integrated battery chargers for electric vehicles using nine-phase machines”, *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013 IEEE International, Maio 2013.
- [16] Dong Liu. Jia-Q Yang. Jin Huang. Hai-bo Jiang. “Realization of a SPWM inverter for multi-phase induction motor drives”, *Electrical Machines and Systems*, 2008. ICEMS 2008. International Conference on. Outubro 2008.

- [17] Szabo, L. Ruba, M. Fodorean, D. “Simple converter structure for fault tolerant motors”, Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008. IEEE International Conference on, Maio, 2008.
- [18] Szabo, L. Ruba, M. Fodorean, D. “Study on a simplified converter topology for fault tolerant motor drives”, Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on. Maio, 2008.
- [19] Gule, N. Kamper, M.J. “The BDCE equivalent control method for multiphase induction machine”, Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on. fevereiro 2013.
- [20] Levi, E. Bojoi, R. Profumo, F. Toliyat, H.A. “Multiphase induction motor drives - a technology status review”, Electric Power Applications, IET (Volume:1 , Issue: 4), Julho, 2007.
- [21] Dujic, D. Jones, M. Levi, E. “Space Vector PWM for Nine-Phase VSI with Sinusoidal Output Voltage Generation: Analysis and Implementation”, Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, Novembro, 2007.
- [22] Levi, E. “Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on (Volume:55 , Issue: 5), Maio, 2008.
- [23] Abbas, Mohamed A. Christen, Rolan. Jahns, T. M. “Six-Phase Voltage Source Inverter Driven Induction Motor ”, Industry Applications, IEEE Transactions on (Volume:IA-20 , Issue: 5), Setembro, 1984.
- [24] Yongle Ai. Yumei Wang. Kamper, M. J. “Torque performance comparison from three-phase with six-phase induction machine”, Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on. Agosto, 2009.

- [25] Schreier, L. Bendl, J. Chomat, M. “Influence of space harmonics on properties of six-phase induction machine - Part I. analysis”, *Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on. Setembro, 2010.
- [26] Subotic, I. ; Levi, E. ; Jones, M. ; Graovac, D. “An integrated battery charger for EVs based on an asymmetrical six-phase machine”, *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*. Novembro, 2013.
- [27] Melo, V.F.M.B. ; Jacobina, C.B. ; Rocha, N. “AC-DC-AC six-phase machine drive system based on single-phase bridge converters”, *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*. Novembro, 2013.
- [28] Schiferl, R.F. ; Ong, C.M. “Six-Phase Synchronous Machine with ac and dc Stator Connections, Part I: Equivalent Circuit Representation and Steady-State Analysis ”, *Power Engineering Review, IEEE (Volume:PER-3 , Issue: 8)*. Agosto, 1983.
- [29] dos Santos, E.C. ; Jacobina, C.B. ; da Silva, O.I. “Six-phase machine drive system with nine-switch converter”, *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Novembro, 2011.
- [30] Ai Bao ; Ai Yong-le ; Niu Lian-bo “Research on Electromagnetism Torque of the Six-Phase Induction Machine with Special Phase Current Waveform ”. *Information Technology and Applications, 2009. IFITA '09. International Forum on (Volume:3)*. Maio, 2009.
- [31] Bahi, T. ; Soufi, Y. ; Lekhchine, S. ; Merabet, H. “Fuzzy logic control for vector control six phase induction machines”. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2013 Fourth International Conference on. Maio, 2013.

- [32] Miranda, R.S. ; Jacobina, C.B. ; Lima, A.M.N. “Modeling and analysis of six-phase induction machine under fault condition”. Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian. Setembro, 2009.
- [33] Moghadasian, M. ; Kiani, R. ; Betin, F. ; Lanfranchi, V. “Intelligent sensorless speed control of six-phase induction machine”. IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Novembro, 2011.
- [34] Nategh, S. ; Moghaddasian, M. ; Kianinezhad, R. ; Seifossadat, S.G. “A new sensorless field-oriented control for Six-Phase Induction Machines ”. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on. Junho, 2008.
- [35] Moghadasian, M. ; Kianinezhad, R. ; Betin, F. ; Yazidi, A. “Position control of faulted six-phase induction machine using genetic algorithms ”, Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on. Setembro, 2011.
- [36] Fnaiech, M.A. ; Betin, F. ; Nahid, B. ; Capolino, G.A. “Fuzzy logic control for high precision positioning of a Six Phase Induction Machine in faulted mode”. Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. Novembro, 2008.
- [37] Prieto, J. ; Barrero, F. ; Jones, M. ; Levi, E. “A modified continuous PWM technique for asymmetrical six-phase induction machines”. Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on. Março, 2010.
- [38] Matyas, A. ; Aroquiadassou, G. ; Martis, C. ; Mpanda-Mabwe, A. “Design of six-phase synchronous and induction machines for EPS”. Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on. Setembro 2010.

- [39] Nanoty, A.S. ; Chudasama, A.R. “Design of multiphase induction motor for electric ship propulsion”. Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2011 IEEE. Abril, 2011.
- [40] Che, H.S. ; Hew, W.P. ; Rahim, N.A. ; Levi, E. “A six-phase wind energy induction generator system with series-connected DC-links”. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE International Symposium on. Junho, 2012.
- [41] Che, H.S. ; Hew, W.P. ; Rahim, N.A. ; Levi, E. “Current Control of a Six-Phase Induction Generator for Wind Energy Plants”. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International. Setembro, 2012.