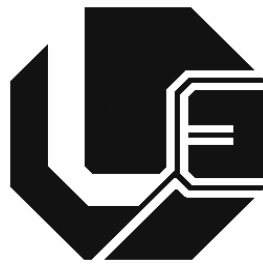


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



UMA CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DE
COMPLEXOS EÓLICOS CONTENDO
GERADORES ESPECIAIS PARA ATENUAÇÃO
DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

Paulo Henrique Barbosa Naves

Uberlândia
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**UMA CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DE
COMPLEXOS EÓLICOS CONTENDO GERADORES
ESPECIAIS PARA ATENUAÇÃO DAS COMPONENTES
HARMÔNICAS**

Dissertação apresentada por Paulo Henrique Barbosa Naves à Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Aprovada em 31 de outubro de 2007.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) - UFU
Gilson Paulillo, Dr. - LACTEC
José Wilson Resende, PhD. - UFU
Kleiber David Rodrigues, Dr. - UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- N322c Naves, Paulo Henrique Barbosa, 1981-
Uma contribuição à modelagem de complexos eólicos contendo geradores especiais para atenuação das componentes harmônicas / Paulo Henrique Barbosa. - 2007.
116 p. : il.
- Orientador: José Carlos de Oliveira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.
1. Força eólica - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade - I. Oliveira, José Carlos de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311.24

**UMA CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DE
COMPLEXOS EÓLICOS CONTENDO GERADORES
ESPECIAIS PARA ATENUAÇÃO DAS COMPONENTES
HARMÔNICAS**

Paulo Henrique Barbosa Naves

Dissertação apresentada por Paulo Henrique Barbosa Naves à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por tudo que me proporciona; a meus pais, Paulo e Marinete e a meu irmão Marcel, que em suas simplicidades me ensinaram a viver e a sonhar.

AGRADECIMENTOS

À Deus, agradeço, por estar comigo em todos os momentos, sejam difíceis ou não. Agradeço a Ele, pois sem a sabedoria que me foi dada do alto, não seria capaz de concluir esse projeto.

Agradeço aos meus pais, Paulo e Marinete, pelo apoio moral, financeiro e principalmente pela presença e preocupação com meus estudos. À meu irmão pela amizade e companheirismo.

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. José Carlos, pela confiança depositada, amizade, compreensão às minhas limitações e orientação segura.

Aos colegas de pós-graduação, Alexandre Zappellini (Gaúcho), Carlos Eduardo (Dudu), Marcus Vinicius, Ivan Nunes, Fernanda Hein, Adeon, Bismarck, Carlos Eduardo (Cadu), João Areis, Ivandro, Fernando Belchior, Ana Cláudia, Nilo e demais pelo companheirismo e apoio.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo subsídio financeiro.

RESUMO

Grande parte dos sistemas de conversão de energia eólica (WECS) atualmente em operação no mundo utiliza geradores assíncronos para a transformação da energia contida no vento em energia elétrica. No Brasil, embora se reconheça que a parcela de centrais eólicas ainda seja bastante reduzida, destaca-se que o princípio da geração empregada é majoritariamente síncrona. Dentro deste princípio, a turbina opera com velocidade variável e a sincronização da geração à rede de conexão é feita através de conversores estáticos de frequência. Neste particular ressalta-se que os recursos de simulação atualmente disponíveis que utilizam a tecnologia aqui destacada, ainda são escassos. Notadamente, a questão se agrava quando se considera que as máquinas geradoras utilizadas não se constituem em unidades síncronas convencionais, mas sim, a tecnologia eólica prioriza o emprego de geradores síncronos hexafásicos especiais. Este fato norteou o tema de pesquisa desta dissertação, a qual apresenta uma proposta de modelagem matemática destinada à representação de geradores síncronos hexafásicos especiais no domínio do tempo, visando aplicações em sistemas de conversão de energia eólica de velocidade variável. A partir da representação feita e sua implementação computacional, procede-se a um conjunto de estudos de desempenho operacional da máquina especial inserida num complexo eólico. Objetivando o estabelecimento de termos comparativos com um parque constituído por geradores trifásicos convencionais, aspectos associados com formas de onda, melhoria das distorções harmônicas, melhor desempenho dos enrolamentos amortecedores, dentre outros, são focados e discutidos no âmbito desta dissertação e permitem ressaltar propriedades vantajosas atreladas com o emprego da máquina especial.

Palavras-Chave: Gerador síncrono hexafásico especial, sistemas eólicos, qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

Most of the wind energy conversion systems (WECS) currently in operation in the world use asynchronous generators in the transformation of wind energy into electricity energy. In Brazil, although it is recognized that the parcel of wind farms is still very reduced, it is evidenced that the principle of the employed generation is mainly synchronous. Within this principle, the turbine operates with variable speed and the synchronization of the generation with the network connection is made through static frequency converters. In this particular case it is noted that the currently available resources of simulation that uses the highlighted technology here, are still scarce. Notably, the question aggravates when considering that the used generating machines do not consist in conventional synchronous units, the wind technology prioritizes the employment of special six-phase synchronous generators. This fact guided the subject of research of this dissertation, which presents a proposal for the mathematical modeling of special six-phase synchronous generators in the time domain, and aims at their application in the conversional systems of variable wind speed. Having completed their representations and their computational implementation, there follows a set of studies of the operational performance of these special machines inserted into a wind complex. Objectifying the establishment of comparisons between these generators and conventional three-phase generators, aspects such as wave forms, improvement of the harmonic distortions, better performance of the damper windings, among others, are focused and then the advantageous properties associated with the employment of these special machine are highlighted throughout this dissertation.

Keywords: Special six-phase synchronous generator, wind systems, electrical power quality.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL	01
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS	01
1.2 DIRETRIZES DESTA DISSERTAÇÃO.....	05
1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO.....	07
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	07

CAPÍTULO II

MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR SÍNCRONO

HEXAFÁSICO	10
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	10
2.2 PROPRIEDADES DO GERADOR HEXAFÁSICO ESPECIAL.....	11
2.3 MODELAGEM DO GERADOR HEXAFÁSICO ESPECIAL.....	13
2.4 INDUTÂNCIAS DO GERADOR.....	14
2.4.1 INDUTÂNCIAS PRÓPRIAS DO ESTATOR.....	14
2.4.2 INDUTÂNCIAS MÚTUAS ENTRE AS FASES DO ESTATOR.....	16
2.4.3 INDUTÂNCIAS MÚTUAS ENTRE ESTATOR E ROTOR.....	19
2.4.4 INDUTÂNCIAS PRÓPRIAS DO ROTOR.....	21
2.4.5 INDUTÂNCIAS MÚTUAS DO ROTOR.....	22
2.5 FLUXOS CONCATENADOS.....	23
2.6 CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO.....	25
2.7 EXPRESSÃO DA DINÂMICA DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	31
2.8 TENSÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	32
2.9 PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	34
2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39

CAPÍTULO III

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR

HEXAFÁSICO.....	41
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	41
3.2 A BASE COMPUTACIONAL UTILIZADA.....	42
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO GERADOR.....	44
3.4 SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO SIMULADO.....	48
3.4.1 SISTEMA COM GERAÇÃO HEXAFÁSICA.....	49
3.4.2 SISTEMA COM GERAÇÃO TRIFÁSICA CONVENCIONAL.....	53
3.5 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR HEXAFÁSICO.....	54
3.6 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR TRIFÁSICO CONVENCIONAL.....	67
3.7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL.....	76
3.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	82
3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84

CAPÍTULO IV

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR

HEXAFÁSICO INSERIDO EM UM COMPLEXO EÓLICO.....	86
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	86
4.2 SISTEMA EÓLICO UTILIZADO E CARACTERÍSTICAS.....	87
4.3 RESULTADOS OBTIDOS.....	90
(A) PONTO 1.....	90
(B) PONTO 2.....	92
(C) PONTO 3.....	96
(D) PONTO 4.....	101

4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
-----	---------------------------	-----

CAPÍTULO V

	CONCLUSÕES.....	109
--	------------------------	------------

	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
--	---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tensão no barramento CC para retificadores de 6 e 12 pulsos.....	12
Figura 2.2 – Arranjo físico do gerador hexafásico.....	13
Figura 3.1 – Ilustração dos pinos de conexão do gerador.....	44
Figura 3.2 – Sistema Hexafásico.....	50
Figura 3.3 – Sistema Trifásico.....	53
Figura 3.4 – Tensões trifásicas <i>abc</i> nos terminais de saída do gerador hexafásico.....	55
Figura 3.5 – Tensões trifásicas <i>xyz</i> nos terminais de saída do gerador hexafásico.....	55
Figura 3.6 – Defasagem de 30° entre as tensões.....	56
Figura 3.7 – Espectro harmônico de tensão nos terminais do gerador hexafásico.....	57
Figura 3.8 – Correntes nas linhas <i>abc</i> do gerador hexafásico.....	58
Figura 3.9 – Correntes nas linhas <i>xyz</i> do gerador hexafásico.....	58
Figura 3.10 – Defasagem de 30° para as correntes.....	59
Figura 3.11 – Espectro harmônico para a corrente nos terminais do gerador hexafásico.....	59
Figura 3.12 – Fluxos para as fases <i>abc</i> do gerador hexafásico.....	60
Figura 3.13 – Fluxos para as fases <i>xyz</i> do gerador hexafásico.....	60
Figura 3.14 – Conjugado eletromagnético produzido pelo gerador hexafásico.....	61
Figura 3.15 – Espectro harmônico do conjugado produzido pelo gerador hexafásico....	62
Figura 3.16 – Corrente do campo de excitação do gerador hexafásico.....	62
Figura 3.17 – Espectro harmônico da corrente de campo para o gerador hexafásico.....	63
Figura 3.18 – Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador hexafásico.....	64
Figura 3.19 – Espectro harmônico corrente do enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador hexafásico.....	64
Figura 3.20 – Tensão retificada para o sistema hexafásico.....	65
Figura 3.21 – Espectro harmônico da tensão retificada para o sistema hexafásico.....	65
Figura 3.22 – Corrente retificada para o sistema hexafásico.....	66
Figura 3.23 – Espectro harmônico da corrente retificada para o sistema hexafásico.....	66
Figura 3.24 – Tensões trifásicas nos terminais de saída do gerador trifásico.....	67
Figura 3.25 – Espectro harmônico de tensão nos terminais do gerador trifásico.....	68

Figura 3.26 – Correntes nos terminais do gerador trifásico.....	69
Figura 3.27 – Espectro harmônico da corrente nos terminais do gerador trifásico.....	69
Figura 3.28 – Fluxos nas fases do gerador trifásico.....	70
Figura 3.29 – Conjugado eletromagnético produzido pelo gerador trifásico.....	71
Figura 3.30 – Espectro harmônico do conjugado produzido pelo gerador trifásico.....	71
Figura 3.31 – Corrente no enrolamento de campo do gerador trifásico.....	72
Figura 3.32 – Espectro harmônico da corrente de campo do gerador trifásico.....	72
Figura 3.33 – Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador trifásico.....	73
Figura 3.34 – Espectro harmônico da corrente do enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador trifásico.....	74
Figura 3.35 – Tensão retificada para o sistema trifásico.....	74
Figura 3.36 – Espectro harmônico da tensão retificada para o sistema trifásico.....	75
Figura 3.37 – Corrente retificada para o sistema trifásico.....	75
Figura 3.38 – Espectro harmônico da corrente retificada para o sistema trifásico.....	76
Figura 3.39 – Tensão de linha para os dois sistemas.....	77
Figura 3.40 – Corrente de linha para os dois sistemas.....	77
Figura 3.41 – Fluxo magnético na fase a para os dois sistemas.....	78
Figura 3.42 – Conjugado produzido pelos geradores: trifásico e hexafásico.....	79
Figura 3.43 – Corrente do campo de excitação para os dois sistemas.....	80
Figura 3.44 – Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto para os dois sistemas.....	81
Figura 3.45 – Tensão retificada para os dois sistemas.....	81
Figura 3.46 – Corrente retificada para os dois sistemas.....	82
Figura 3.47 – Gráfico comparativo das distorções harmônicas totais para diversas grandezas.....	84
Figura 4.1 – Sistema eólico investigado.....	87
Figura 4.2 – Pontos monitorados.....	89
Figura 4.3 – Velocidade do vento.....	90
Figura 4.4 – Velocidade mecânica no eixo do rotor.....	91
Figura 4.5 – Coeficiente de potência.....	91
Figura 4.6 – Potência aerodinâmica.....	92
Figura 4.7 – Perfil das tensões trifásicas <i>abc</i> nos terminais de saída do gerador elétrico.....	93

Figura 4.8 – Perfil das tensões trifásicas <i>xyz</i> nos terminais de saída do gerador elétrico.....	93
Figura 4.9 – Zoom das tensões mostradas na figura 4.7, na saída do gerador elétrico...	94
Figura 4.10 – Perfil das correntes nos terminais <i>abc</i> de saída do gerador elétrico.....	95
Figura 4.11 – Perfil das correntes nos terminais <i>xyz</i> de saída do gerador elétrico.....	95
Figura 4.12 – Zoom das correntes nos terminais de saída do gerador elétrico mostradas na figura 4.10, em regime.....	96
Figura 4.13 – Zoom das correntes nos terminais de saída do gerador elétrico mostradas na figura 4.10, durante o cume da turbulência.....	96
Figura 4.14 – Tensão no elo CC.....	97
Figura 4.15 – Tensão nos terminais de saída do inversor.....	98
Figura 4.16 – Zoom das tensões nos terminais de saída do inversor mostradas na figura 4.15.....	98
Figura 4.17 – Espectro harmônico de tensão nos terminais de saída do conversor de frequência.....	98
Figura 4.18 – Correntes nos terminais de saída do inversor.....	99
Figura 4.19 – Zoom das correntes nos terminais de saída do inversor mostrados na figura 4.18, em regime.....	100
Figura 4.20 – Zoom das correntes nos terminais de saída do inversor mostrados na figura 4.18, no pico do transitório.....	100
Figura 4.21 – Espectro harmônico de corrente nos terminais do conversor de frequência.....	101
Figura 4.22 – Tensões no ponto de acoplamento comum (PAC).....	102
Figura 4.23 – Zoom das tensões mostradas na figura 4.22.....	102
Figura 4.24 – Perfil <i>rms</i> das tensões no ponto de acoplamento comum (PAC).....	103
Figura 4.25 – Espectro harmônico da tensão no PAC.....	103
Figura 4.26 – Correntes no ponto de acoplamento comum (PAC).....	104
Figura 4.27 – Zoom das correntes mostradas na figura 4.26, em regime.....	104
Figura 4.28 – Zoom das correntes mostradas na figura 4.26, durante a rajada.....	105
Figura 4.29 – Espectro harmônico da corrente no PAC.....	105
Figura 4.30 – Potência ativa gerada pela turbina eólica.....	106
Figura 4.31 – Potência reativa fornecida pelo gerador eólico.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros internos da máquina síncrona.....	35
Tabela 2.2 – Parâmetros externos da máquina síncrona.....	36
Tabela 3.1 – Terminais para conexão do gerador síncrono.....	44
Tabela 3.2 – Variáveis de entrada para o gerador síncrono.....	47
Tabela 3.3 – Variáveis de saída para o gerador.....	48
Tabela 3.4 – Dados do gerador hexafásico.....	51
Tabela 3.5 – Dados do regulador de tensão.....	52
Tabela 3.6 – Dados do rotor eólico.....	52
Tabela 3.7 – Dados do vento.....	53
Tabela 3.8 – Síntese comparativa entre os resultados obtidos para as duas máquinas.....	83
Tabela 4.1 – Dados utilizados nos estudos computacionais.....	88
Tabela 4.2 – Características do caso simulado.....	88
Tabela 4.3 – Pontos de monitoramento e grandezas monitoradas.....	89

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido ao constante aumento da demanda de energia, sustentado pelas mudanças inerentes sofridas no cenário mundial, sejam elas mudanças de caráter tecnológico ou mesmo ligadas ao nicho ao qual a sociedade encontra-se imersa, novas soluções devem ser desenvolvidas de forma a suprir esse aumento e concomitantemente atender as condições de preservação do planeta.

As fontes de energia utilizadas em maiores escalas no mundo atual, sejam elas provenientes do petróleo, carvão, energia hidráulica, nuclear, etc, têm causado sérias preocupações no que diz respeito ao impacto causado ao meio ambiente. Neste contexto, ressalta-se que, à medida que avançam os estudos a respeito das modificações causadas no ambiente terrestre devido a ação do homem, crescem também as preocupações e necessidades da consolidação de soluções para atenuar tais problemas. Neste particular, a busca por soluções que visem conciliar o aumento da energia disponível para uso da sociedade com a preservação do meio ambiente, tem merecido grande atenção no cenário mundial. Medidas

têm sido tomadas com o intuito de viabilizar a energia necessária e, juntamente, limitar ou eliminar o atual nível de degradação do planeta. Exemplo disso é o protocolo de Kioto, estabelecido em 1997, que tem como meta maior a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera terrestre.

No que tange ao desenvolvimento de novas tecnologias que agredam menos o meio ambiente, destacam-se, prioritariamente, aquelas que utilizam novos recursos de geração, notadamente originadas de fontes de energia renováveis ou alternativas. Com tais preocupações em mente, as fontes de energia renováveis têm crescido no cenário mundial, e particularmente no Brasil, através dos incentivos políticos atrelados com o programa nacional denominado por PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.662, de 11 de Novembro de 2003, a importância da matéria fica fortalecida. Este programa tem por meta principal o aumento da participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica no país. Dentre as possibilidades aplicáveis ao país destacam-se: energia eólica (ventos), biomassa e pequenas centrais hidrelétricas.

Fatos como os mencionados foram responsáveis pela mudança de postura de diversos países, resultando na adoção de metas para a substituição gradativa das fontes convencionais por fontes alternativas. Neste particular destaca-se a Alemanha, com um terço de toda a produção de energia eólica mundial e a Dinamarca com 20 % de seu consumo atendido por este tipo de energia [14]. Postura semelhante observa-se nos Estados Unidos da América e Índia, os quais, dentre outros países, também passaram a integrar parques eólicos aos seus complexos elétricos. Enfim, o emprego de unidades eólicas é hoje uma tendência mundial.

A utilização da energia do vento, ou eólica, como fonte primária para a geração da energia elétrica, é uma realidade incontestável e em franco uso em muitos países do mundo e, no Brasil, este potencial energético encontra-se ainda em fase embrionária. Reconhecendo que

a busca de fontes de energia “limpas” constitui-se, inevitavelmente, no anseio da sociedade como um todo, embora a pequena difusão deste aproveitamento em nosso país, como já mencionado, as políticas nacionais caminham no sentido de incentivar tais desenvolvimentos. Como fruto deste projeto, reconhece-se, na atualidade, cerca de 1.400 MW de centrais de energia eólica contratadas pela Eletrobrás por meio do PROINFA [35].

Dentre os aspectos atrativos oferecidos pelo uso da energia eólica destacam-se:

- Tempo para implantação do projeto muito menor do que para usinas térmicas, nucleares e hidráulicas;
- Custos de implantação e operação reduzidos, comparativamente às tecnologias convencionais utilizadas para esta finalidade;
- Trata-se de uma fonte de energia segura e renovável;
- Apresenta reduzida manutenção dos sistemas;
- Possui baixo impacto ambiental;
- É compatível com a utilização do solo para outras atividades, tais como a pecuária, agricultura, etc.

Sob o aspecto técnico, também se constata alguns importantes fatores que contribuem para o crescimento da utilização da energia eólica. Alguns deles são ressaltados na sequência:

- Desenvolvimento de novos materiais, o que possibilita a construção de pás para rotores eólicos mais leves, resistentes e baratas;
- Avanços da tecnologia da eletrônica de potência, que permite a fabricação de sistemas eólicos de maior potência, tornando-os atrativos para a interligação com os sistemas elétricos;
- Desenvolvimento de novas técnicas para o controle da potência extraída do vento, da potência ativa injetada ao sistema elétrico e reativa intercambiada com o mesmo;

- Experiência e domínio das diversas tecnologias utilizadas em sistemas eólicos;
- Utilização de sistemas eólicos de velocidade variável, em particular os dotados de geradores síncronos, que além de otimizar a extração de potência, produzem menores impactos sobre as redes elétricas;
- Redução de custos, em parte, devido aos motivos anteriormente mencionados.

Aspectos de ordem econômica também colaboram para o crescimento da utilização da energia provida por sistemas eólicos. Um exemplo prático disso é o aumento de preços sofrido pelo petróleo, principal combustível fóssil, notadamente a partir da década de 1970, que certamente motivou governos, instituições de pesquisa e setor produtivo a investir em novas fontes energéticas. Como resultado deste conjunto de fatores, as fontes alternativas ou renováveis de energia constituem-se, na atualidade, em soluções energéticas que avançam em importância e sua expressão já se faz sentir nas matrizes energéticas de países do mundo todo [15], [16], [17], [18] e [19].

Nesta direção, surge então, a necessidade de se realizar estudos cada vez mais completos do desempenho dos sistemas que contemplem fontes de energia renováveis. Não apenas o desempenho da geração alternativa deve ser levado em consideração, mas também os efeitos provocados pela inserção da mesma no sistema elétrico, assim como as influências mútuas entre os mesmos. Procurando atender a tais metas surge, como nas mais distintas áreas de conhecimento, as simulações computacionais as quais se constituem em ferramentas essenciais ao planejamento e operação dos complexos elétricos. Neste particular, muito embora o reconhecimento da existência de inúmeras plataformas computacionais e modelos para os mais diversos estudos em engenharia elétrica, no que tange à questão dos sistemas eólicos, ainda se reconhece a necessidade de grandes esforços até o oferecimento de bases computacionais confiáveis aos objetivos da área.

1.2 – DIRETRIZES DESTA DISSERTAÇÃO

Os sistemas de conversão de energia eólica são conhecidos na comunidade científica como WECS, do inglês *Wind Energy Conversion System*.

Um componente importante dos WECS são as máquinas destinadas à conversão da energia do vento em energia elétrica, quais sejam os geradores. Estes dispositivos podem ser de tipos diferentes e assumir diversas configurações, podendo, no entanto, em sua essência, serem classificados em geradores síncronos e assíncronos.

Com respeito a velocidade de operação podem ser encontrados aerogeradores de velocidade constante e de velocidade variável. O primeiro tipo utiliza como gerador elétrico exclusivamente máquinas de indução com rotor em gaiola de esquilo [20] e [21].

Sistemas eólicos de velocidade variável, os quais se enquadram no escopo desta dissertação, podem operar tanto com máquinas de indução de dupla alimentação (DFIG – *Double Feed Induction Generator*) ou com máquinas síncronas, de rotor bobinado ou de ímã permanente [22] e [23].

Vale ainda destacar que os geradores síncronos empregados em parques eólicos possuem características construtivas próprias e distintas dos produtos utilizados em centrais hidráulicas, térmicas e nas pequenas centrais hidroelétricas. Por tal motivo, fica fortalecida a tese da busca dos modelos específicos empregados para os geradores síncronos das centrais eólicas. Tais máquinas, como se sabe, são constituídas por conexões hexafásicas e diferem de forma significativa da tecnologia tradicional. No que tange a tais máquinas, a literatura identificada com suas aplicações em sistemas eólicos é escassa. As referências [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10] e [11] estão relacionadas com os arranjos físicos e modelagem de geradores hexafásicos. As cinco primeiras, [1], [2], [3], [4] e [5] exploram o emprego de tais máquinas em sistemas contendo retificadores, porém não diretamente correlacionadas

com sistemas eólicos. As referências [6] e [7], tratam de aplicações ligadas ao gerador hexafásico suprimindo, via um de seus conjuntos de enrolamentos, uma carga tipo impedância constante; e através do outro conjunto, uma unidade retificadora de 6 pulsos. Em [11] tem-se um gerador hexafásico alimentando um complexo eólico simplificado.

No Brasil, devido a uma forte presença de um fabricante internacional de grande porte, e possuidor de um grande domínio tecnológico no que tange ao emprego de máquinas síncronas, esta tendência ocupa posição de destaque para os parques eólicos futuros. Esta opção traz, todavia, dificuldades atreladas com os modelos computacionais atualmente disponibilizados pelo mercado. De fato, a maioria absoluta dos programas existentes faz uso, exclusivamente, de geradores de indução ou assíncronos, os quais não são utilizados pelo fabricante instalado no Brasil. Face a isto, a busca do domínio desta tecnologia significa, naturalmente, uma visão de futuro para o campo de trabalho focado nesta proposta.

Reconhecendo-se, pois a carência de documentos voltados para a modelagem computacional no domínio do tempo das máquinas síncronas hexafásicas, com os conjuntos trifásicos defasados de 30° , esta dissertação tem por meta explorar tal tema. A idéia fundamental consiste no desenvolvimento de expressões matemáticas, no domínio do tempo, que definam o comportamento do gerador síncrono hexafásico, e na sua respectiva implementação computacional. Para isto será empregado um pacote computacional que utilize técnicas no domínio do tempo e que permita a análise das grandezas elétricas do gerador tanto em regime permanente quanto em regime transitório de operação.

Este tipo de gerador com características construtivas tão singulares, pode ser classificado na categoria de máquinas especiais, as quais possuem propriedades atrativas quando do suprimento de unidades retificadoras de 12 pulsos. Dentre tais características destacam-se:

- Eliminação dos efeitos das componentes harmônicas de ordem 5, 7, etc no âmbito da operação da máquina, reduzindo, assim, a distorção harmônica total resultante em seu interior;
- Obtenção de uma tensão retificada de valor duplicado para uma mesma tensão gerada pela máquina;
- Melhorias associadas com a operação da bobina de campo do gerador;
- Compartilhamento da corrente de linha em duas parcelas, cada qual correspondente a 50% da corrente total suprida pela máquina ao retificador;
- Redução substancial da corrente nos enrolamentos amortecedores das máquinas síncronas;
- Atenuação dos torques oscilatórios presentes no eixo da máquina.

Uma vez obtida a base computacional necessária, são realizados estudos avaliativos de desempenho da geração hexafásica e estabelecidos termos comparativos com o emprego de geradores síncronos trifásicos convencionais.

Por fim, os trabalhos avançam na direção do estudo de desempenho de um complexo eólico completo, sob a ação de fontes de energia compatíveis com a operação real, focando formas de onda e desempenho dos distintos pontos físicos que perfazem o sistema como um todo.

1.3 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

Tendo contextualizado o tema e estabelecidas as diretrizes que nortearam a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, vale ressaltar que esta dissertação apresenta as seguintes contribuições direcionadas ao estudo dos geradores síncronos hexafásicos especiais multipólos:

- Desenvolvimento do modelo matemático representativo do gerador hexafásico especial, utilizando para tanto de técnicas de representação baseadas no domínio do tempo;
- Implementação do modelo matemático em um simulador que utiliza técnicas de modelagem no domínio do tempo;
- Estudos do desempenho computacional do gerador síncrono hexafásico comparativamente à um gerador equivalente convencional;
- Realização de estudos operacionais do gerador síncrono hexafásico inserido na estrutura de um complexo de geração eólico interligado à rede elétrica.

1.4 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de atender as metas supracitadas, esta dissertação apresenta-se estruturada, além deste capítulo introdutório, com as seguintes unidades:

CAPÍTULO II – MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR SÍNCRONO HEXAFÁSICO.

Este capítulo destina-se ao desenvolvimento das expressões matemáticas, no domínio do tempo, para uma máquina hexafásica especial, destacando ainda as propriedades vantajosas advindas de sua operação conjunta com uma ponte retificadora de 12 pulsos.

CAPÍTULO III – ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR HEXAFÁSICO.

Esta unidade tem por meta a avaliação comparativa do desempenho de um gerador hexafásico diante de uma máquina equivalente trifásica e convencional.

CAPÍTULO IV – ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR HEXAFÁSICO INSERIDO EM UM COMPLEXO EÓLICO.

Este capítulo insere o gerador hexafásico numa estrutura completa de um parque eólico, compreendendo deste a entrada de energia até o ponto de conexão com a rede CA de conexão. São então realizados estudos investigativos sobre o desempenho do sistema à luz de um suprimento energético típico e avaliadas as propriedades operacionais nos mais distintos pontos físicos que perfazem a unidade eólica como um todo.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

Este capítulo sintetiza as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais a respeito dos pontos focados ao longo do documento, quanto às características avaliadas para a máquina em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Por fim, condensa-se o material bibliográfico utilizado para o desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO II

MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR SÍNCRONO HEXAFÁSICO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo contempla o princípio de funcionamento e a modelagem matemática do gerador síncrono hexafásico multipólos, além de apresentar algumas características intrínsecas a este tipo de máquina síncrona, quando comparada às trifásicas tradicionais.

A representação do gerador aqui contemplada baseou-se no modelo geral fundamentado na teoria dos fluxos associados com a operação das máquinas sob foco, estendendo-a, naturalmente para a situação particular do arranjo hexafásico especial aqui considerado. Este, como estabelecido ao longo desta dissertação, difere construtivamente de um gerador síncrono trifásico formado por um conjunto de enrolamentos igualmente defasados de 120° , pela inserção de segundo conjunto trifásico de bobinas, também com 120° de defasagem entre suas bobinas. Vale ainda lembrar que os dois arranjos encontram-se montados com diferenças angulares de 30° , fato este que proporciona os ganhos já destacados no capítulo anterior.

Dentro deste contexto, o cerne desta unidade da dissertação encontra-se direcionados aos seguintes pontos focais:

- Apresentação esquemática da estrutura funcional da máquina hexafásica especial contemplada nos estudos;
- Definição das indutâncias que definem os mais diversos acoplamentos e dispersões relacionadas com os fluxos magnéticos existentes na máquina;
- Formulação das relações eletro-magnéticas que descrevem a operação da máquina, utilizando para tanto técnicas de modelagem no domínio do tempo;
- Estabelecimento das expressões de definição de conjugados, inércia, etc;
- Apresentação da correlação entre os parâmetros internos e externos necessários à formulação.

2.2 – PROPRIEDADES DO GERADOR HEXAFÁSICO ESPECIAL

Uma vez estabelecida a modelagem matemática do gerador especial aqui considerado, pode-se, neste momento, apresentar algumas propriedades que têm tornado o arranjo hexafásico especial atrativo para as aplicações em sistemas eólicos.

Em vista dos objetivos aqui almejados, qual seja, que o gerador alimentado por uma turbina eólica seja conectado a um retificador para posterior inversão e conexão final à rede alternada, há, indiscutivelmente, problemas associados com as componentes harmônicas de corrente produzidas pelo equipamento de retificação. Estas componentes, como se sabe, são injetadas na unidade de geração e isto pode ocasionar expressivos impactos na operação da máquina. Por tal motivo, a substituição dos convencionais arranjos de 6 pulsos pelos de 12 pulsos constitui-se em solução altamente atrativa, visto a eliminação de 50% do espectro

harmônico dos efeitos advindos das correntes no interior da máquina. É pois dentro deste cenário que o emprego dos geradores com dois conjuntos de bobinas trifásicas defasadas de 30° encontra uma forte sustentação, visto que os dois sistemas trifásicos de tensão assim produzidos viabilizam a operação das unidades retificadoras de 12 pulsos [11]. Adicionalmente a esta propriedade, há ainda a se destacar o fato de que as tensões e correntes no elo CC de interligação entre o retificador e inversor também têm suas formas de onda melhoradas quando do emprego dos sistemas de 12 pulsos [11].

Um outro ponto que não pode ser ignorado e que pesa favoravelmente ao emprego da máquina especial está vinculado com a possibilidade da obtenção de uma tensão retificada de valor dobrado àquele obtido via um gerador trifásico convencional. De fato, com um mesmo nível de tensão de isolamento consegue-se, através da conexão série de dois retificadores, o dobro da tensão que seria atingida caso se utilizasse apenas uma unidade retificadora de 6 pulsos.

A figura 2.1 a seguir ilustra a diferença entre uma tensão no barramento CC quando da utilização de um retificador de 6 pulsos e de um retificador de 12 pulsos.

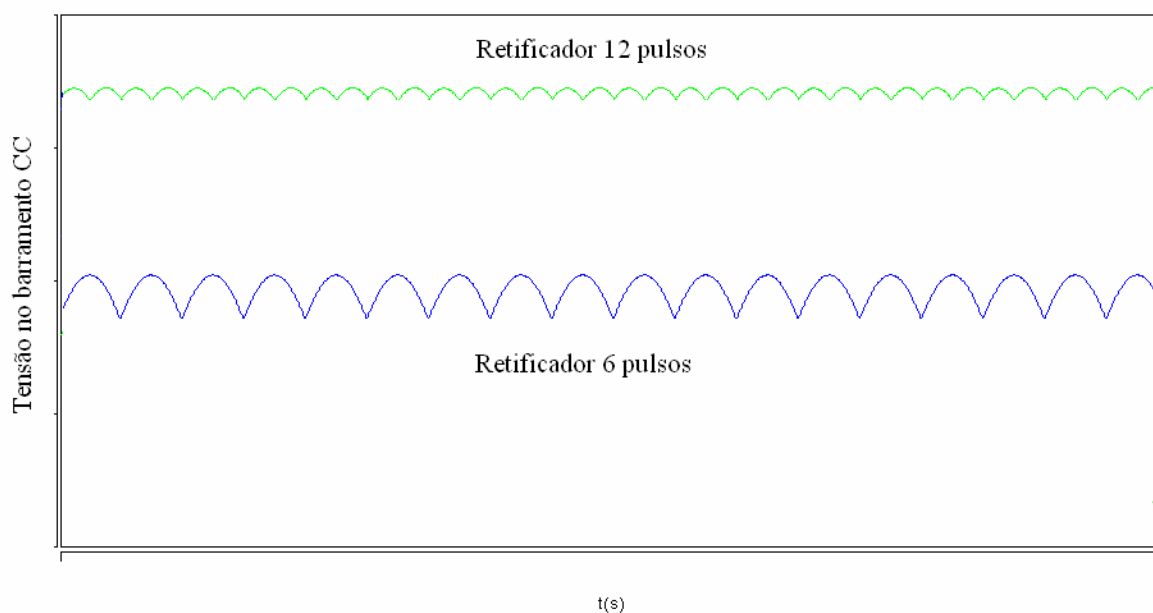


Figura 2.1 – Tensão no barramento CC para retificadores de 6 e 12 pulsos.

2.3 – MODELAGEM DO GERADOR HEXAFÁSICO ESPECIAL

Como dito anteriormente o gerador síncrono hexafásico proposto aqui possui dois conjuntos de enrolamentos trifásicos (com bobinas defasadas de 120° entre si) defasados entre si de 30° . Nestes termos sua estrutura apresenta-se constituída por um conjunto de enrolamentos identificados por abc e outro por xyz . A figura 2.2 esclarece sobre a mencionada constituição física. A figura ainda identifica os eixos de referência abc , xyz e aqueles classicamente conhecidos por dq .

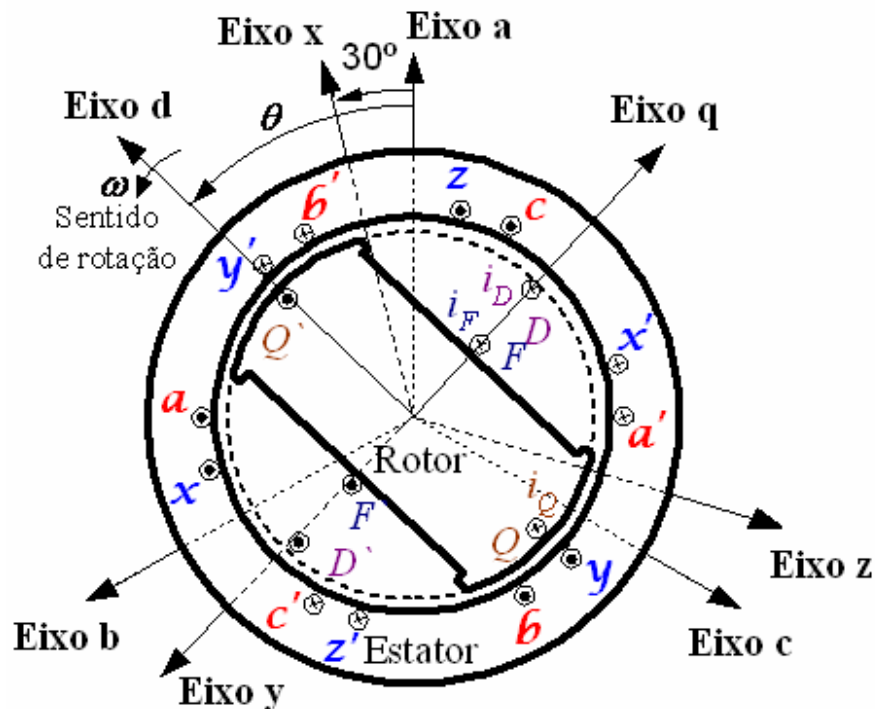


Figura 1 – Arranjo físico do gerador hexafásico.

O arranjo indicado ainda evidencia os enrolamentos de armadura: aa' , bb' , cc' , formando o primeiro conjunto de enrolamentos trifásicos abc , os enrolamentos xx' , yy' , zz' , formando o segundo conjunto de enrolamentos trifásicos xyz , o enrolamento de campo FF' , e os amortecedores DD' e QQ' associados aos eixos direto e quadratura, respectivamente.

2.4 – INDUTÂNCIAS DO GERADOR

Para se atingir as expressões representativas da máquina sob consideração, o primeiro passo consiste na determinação das expressões para as diversas indutâncias da máquina, levando em consideração que o acoplamento magnético entre cada par de enrolamentos é função da posição do rotor, principalmente quando do tratamento de máquinas de pólos salientes.

Para fins de definição de uma referência para a medição da posição angular do rotor, que é dada em função do ângulo θ , o eixo da fase a do estator é tomado como referência, assumindo valor $\theta = 0^\circ$ para a posição de alinhamento entre eixo d do rotor e o eixo da citada fase, conforme pode ser visto na figura 2.2.

A seguir, são apresentadas as expressões para as indutâncias associadas com cada enrolamento físico constituinte da máquina.

2.4.1 – INDUTÂNCIAS PRÓPRIAS DO ESTATOR

A indutância própria ou auto-indutância de qualquer fase do estator terá sempre valor positivo e amplitude oscilatória com frequência que corresponde ao dobro da frequência de operação da máquina (frequência de segunda ordem harmônica). Isto se deve à variação do entreferro, a qual, como já mencionado, é mais relevante para as máquinas de pólos salientes, as quais se constituem no objeto deste trabalho. Desta forma, a indutância própria de uma determinada fase fica oscilando entre um valor máximo e mínimo. Observando-se, por exemplo, a fase a , tem-se que para valores do ângulo $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$, o eixo da fase a e o eixo direto do rotor estão alinhados, fazendo com que a indutância própria da fase em questão

assuma seus valores máximos, pois nestas posições a relutância do circuito magnético é mínima. Para as posições angulares $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 270^\circ$, a indutância própria da fase a assume seus valores mínimos, pois a relutância neste caso é máxima. A indutância própria atinge valores máximos a cada π radianos.

Desta forma, pode-se utilizar a expressão (1), que genericamente define o comportamento da indutância própria de uma fase do estator:

$$L_{ii} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos 2(\theta + \alpha_i) \quad (1)$$

Sendo:

L_{ii} – a indutância própria de cada fase do estator, e o sub-índice ii deve assumir os valores de a, b, c, x, y e z , para $i = i$;

L_{s1} – o valor médio da indutância;

L_{s2} – o valor da indutância de dispersão;

L_m – o valor da amplitude de variação da indutância própria;

θ – o valor do ângulo que define a posição do rotor;

α_i – o valor do ângulo entre o eixo da fase em análise e a referência.

No que tange às expressões individuais das indutâncias próprias para os distintos enrolamentos que perfazem o estator:

$$L_{aa} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos(2\theta) \quad (2)$$

$$L_{bb} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos[2(\theta - 2\pi/3)] \quad (3)$$

$$L_{cc} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos[2(\theta + 2\pi/3)] \quad (4)$$

$$L_{xx} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos[2(\theta - \pi/6)] \quad (5)$$

$$L_{yy} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos[2(\theta - 5\pi/6)] \quad (6)$$

$$L_{zz} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos[2(\theta + \pi/2)] \quad (7)$$

Vale ressaltar ainda que $L_s > L_m$, fato este que garante sempre o sinal positivo para a indutância própria de cada fase do estator.

2.4.2 – INDUTÂNCIAS MÚTUAS ENTRE AS FASES DO ESTATOR

A indutância mútua entre duas fases quaisquer do estator é função da posição angular do mesmo, ou seja, do valor de θ . Por exemplo, a indutância mútua entre as fases a e b será máxima para valores de $\theta = -30^\circ$ e $\theta = 150^\circ$, pois o caminho da relutância é mínimo. Para os ângulos $\theta = 60^\circ$ e $\theta = 240^\circ$ a indutância mútua será mínima. O valor da indutância mútua é negativo, pois a corrente positiva em uma dada fase produz um fluxo que atravessa as outras fases em sentido oposto ao sentido do fluxo produzido por corrente positiva nestas fases.

Nestes termos, a expressão genérica que representa a indutância mútua entre duas fases quaisquer do estator é:

$$L_{ik} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta + \alpha_{ik})] \quad (8)$$

Onde:

L_{ik} – indutância mútua entre duas fases do estator, onde o sub-índice ik assume: $a, b,$

c, x, y e z , para $i \neq k$, e $L_{ik} = L_{ki}$;

M_s – valor médio da indutância;

L_m – valor da amplitude de variação da indutância mútua;

θ – valor do ângulo que defini a posição do rotor;

α_{ik} – valor do ângulo em que a indutância mútua é máxima em relação a referência.

As expressões que descrevem o comportamento da indutância mútua entre as fases do estator para a máquina aqui considerada serão:

$$L_{ab} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta + \pi/6)] = L_{ba} \quad (9)$$

$$L_{ac} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta + 5\pi/6)] = L_{ca} \quad (10)$$

$$L_{ax} = -M_{s1} - L_m \cdot \cos[2(\theta - \pi/12)] = L_{xa} \quad (11)$$

$$L_{ay} = -M_{s2} - L_m \cdot \cos[2(\theta + \pi/12)] = L_{ya} \quad (12)$$

$$L_{az} = -M_{s3} - L_m \cdot \cos[2(\theta - \pi/4)] = L_{za} \quad (13)$$

$$L_{bc} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta - \pi/2)] = L_{cb} \quad (14)$$

$$L_{bx} = -M_{s3} - L_m \cdot \cos[2(\theta - 11\pi/12)] = L_{xb} \quad (15)$$

$$L_{by} = -M_{s1} - L_m \cdot \cos[2(\theta - 3\pi/4)] = L_{yb} \quad (16)$$

$$L_{bz} = -M_{s2} - L_m \cdot \cos[2(\theta - 7\pi/12)] = L_{zb} \quad (17)$$

$$L_{cx} = -M_{s2} - L_m \cdot \cos[2(\theta + 3\pi/4)] = L_{xc} \quad (18)$$

$$L_{cy} = -M_{s3} - L_m \cdot \cos[2(\theta + 5\pi/12)] = L_{yc} \quad (19)$$

$$L_{cz} = -M_{s1} - L_m \cdot \cos[2(\theta + 7\pi/12)] = L_{zc} \quad (20)$$

$$L_{xy} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta + 0)] = L_{yx} \quad (21)$$

$$L_{xz} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta + 2\pi/3)] = L_{zx} \quad (22)$$

$$L_{yz} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta - 2\pi/3)] = L_{zy} \quad (23)$$

O sinal negativo da indutância mútua é garantido pela condição de que $|M_s| > L_m$. Os valores máximos para a indutância mútua repetem-se a cada π radianos. Também, para o arranjo em pauta é válida a afirmação que $L_{ik} = L_{ki}$.

2.4.3 – INDUTÂNCIAS MÚTUAS ENTRE ESTATOR E ROTOR

A indutância mútua entre uma bobina do estator e outra pertencente ao rotor varia senoidalmente com a posição do rotor. O conceito é clássico e permite constatar que os valores absolutos das amplitudes máximas sempre ocorrerão quando o eixo de determinada bobina do rotor alinhar-se com o eixo de um enrolamento do estator. Também, a indutância será nula sempre que os eixos destes circuitos formarem um ângulo $\theta = 90^\circ$. Por exemplo, considerando a indutância mútua entre o eixo da fase a e o eixo do enrolamento de campo F , esta será máxima para valores de $\theta = 0, \theta = 2\pi, \theta = 4\pi$, etc, e será mínima para valores de $\theta = \pi, \theta = 3\pi, \theta = 5\pi$, etc. O mesmo acontece quando se compara o eixo da fase a com o enrolamento amortecedor de eixo direto D , pois este se encontra alinhado com o enrolamento de campo F . Já para o enrolamento amortecedor Q , há um fenômeno correspondente porém com defasagem de $\pi/2$. Dentro desta lógica, a expressão genérica que descreve a indutância mútua entre uma fase do estator e uma bobina do rotor é:

$$L_{ik} = M_k \cdot \cos(\theta + \alpha_{ik}) \quad (24)$$

Sendo:

L_{ik} – indutância mútua entre uma determinada fase do estator e determinado circuito do rotor, onde o sub-índice ik deve assumir $i = a, b, c, x, y$ e z , e $k = F, D$ e Q , e

$$L_{ik} = L_{ki};$$

M_k – valor da amplitude de variação da indutância mútua;

θ – valor do ângulo que defini a posição do rotor;

α_{ik} – valor do ângulo entre o eixo da fase em análise e a referência.

As expressões que descrevem o comportamento da indutância mútua entre as fases do estator e os circuitos do rotor são:

$$L_{aF} = M_F \cdot \cos(\theta) = L_{Fa} \quad (25)$$

$$L_{aD} = M_D \cdot \cos(\theta) = L_{Da} \quad (26)$$

$$L_{aQ} = M_Q \cdot \sin(\theta) = L_{Qa} \quad (27)$$

$$L_{bF} = M_F \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) = L_{Fb} \quad (28)$$

$$L_{bD} = M_D \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) = L_{Db} \quad (29)$$

$$L_{bQ} = M_Q \cdot \sin(\theta - 2\pi/3) = L_{Qb} \quad (30)$$

$$L_{cF} = M_F \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) = L_{Fc} \quad (31)$$

$$L_{cD} = M_D \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) = L_{Dc} \quad (32)$$

$$L_{cQ} = M_Q \cdot \sin(\theta + 2\pi/3) = L_{Qc} \quad (33)$$

$$L_{xF} = M_F \cdot \cos(\theta - \pi/6) = L_{Fx} \quad (34)$$

$$L_{xD} = M_D \cdot \cos(\theta - \pi / 6) = L_{Dx} \quad (35)$$

$$L_{xQ} = M_Q \cdot \sin(\theta - \pi / 6) = L_{Qx} \quad (36)$$

$$L_{yF} = M_F \cdot \cos(\theta - 5\pi / 6) = L_{Fy} \quad (37)$$

$$L_{yD} = M_D \cdot \cos(\theta - 5\pi / 6) = L_{Dy} \quad (38)$$

$$L_{yQ} = M_Q \cdot \sin(\theta - 5\pi / 6) = L_{Qy} \quad (39)$$

$$L_{zF} = M_F \cdot \cos(\theta + \pi / 2) = L_{Fz} \quad (40)$$

$$L_{zD} = M_D \cdot \cos(\theta + \pi / 2) = L_{Dz} \quad (41)$$

$$L_{zQ} = M_Q \cdot \sin(\theta + \pi / 2) = L_{Qz} \quad (42)$$

2.4.4 – INDUTÂNCIAS PRÓPRIAS DO ROTOR

A indutância própria do enrolamento de campo, bem como dos enrolamentos amortecedores do rotor, possuem valores constantes, isto é, não dependem da posição do rotor.

A expressão genérica que descreve uma indutância própria do rotor tem pois a forma:

$$L_{ii} = L_{i1} + L_{i2} \quad (43)$$

Em que:

L_{ii} – é o valor total da indutância própria de determinado circuito do rotor, o sub-

índice ii assumi: F , D e Q , para $i = i$;

L_{i1} – é o valor da indutância própria do circuito em análise;

L_{i2} – é o valor da indutância de dispersão.

Aplicando a equação (43) para os enrolamentos presentes no rotor da máquina tem-se que:

$$L_{FF} = L_{F1} + L_{F2} \quad (44)$$

$$L_{DD} = L_{D1} + L_{D2} \quad (45)$$

$$L_{QQ} = L_{Q1} + L_{Q2} \quad (46)$$

2.4.5 – INDUTÂNCIAS MÚTUAS DO ROTOR

A indutância mútua entre circuitos do rotor também possui valor constante e não depende da posição angular deste. Desta forma a expressão genérica para uma indutância mútua entre as bobinas pertencentes ao rotor será do tipo:

$$L_{ik} = L_{i1} \quad (47)$$

Onde:

L_{ik} – indutância mútua entre os circuitos sob análise, sendo que o sub-índice ik assumi: F, D e Q , para $i \neq k$.

Devido à questão de defasamento entre as bobinas, somente haverá indutância mútua entre o circuito de campo F e o amortecedor de eixo direto D , pois estes possuem seus eixos alinhados. Já as indutâncias mútuas entre o enrolamento amortecedor de eixo em quadratura Q com os enrolamentos de eixo direto D e F terão valores nulos, visto estarem em disposição perpendicular. Assim sendo:

$$L_{FD} = M_{FD} = L_{DF} \quad (48)$$

$$L_{FQ} = 0 = L_{QF} \quad (49)$$

$$L_{DQ} = 0 = L_{QD} \quad (50)$$

2.5 – FLUXOS CONCATENADOS

A partir do conhecimento das indutâncias que descrevem a operação da máquina torna-se factível a obtenção de expressões que correlacionam os fluxos magnéticos e respectivas correntes presentes nos diversos enrolamentos que perfazem o gerador sob consideração. De uma maneira simplificada, pode-se escrever a expressão para o fluxo concatenado da seguinte forma:

$$[\lambda] = [L] \cdot [i] \quad (51)$$

Em que:

$[\lambda]$ – vetor dos fluxos concatenados;

$[L]$ – matriz das indutâncias da máquina;

$[i]$ – vetor das correntes nos enrolamentos da máquina.

Em função das definições anteriores pode-se, a partir da equação matricial (51), obter a equação com os fluxos concatenados de todos os enrolamentos da máquina síncrona hexafásica. Assim procedendo:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{ax} & L_{ay} & L_{az} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bx} & L_{by} & L_{bz} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cx} & L_{cy} & L_{cz} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{xa} & L_{xb} & L_{xc} & L_{xx} & L_{xy} & L_{xz} & L_{xF} & L_{xD} & L_{xQ} \\ L_{ya} & L_{yb} & L_{yc} & L_{yx} & L_{yy} & L_{yz} & L_{yF} & L_{yD} & L_{yQ} \\ L_{za} & L_{zb} & L_{zc} & L_{zx} & L_{zy} & L_{zz} & L_{zF} & L_{zD} & L_{zQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{Fx} & L_{Fy} & L_{Fz} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{Dx} & L_{Dy} & L_{Dz} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{Qx} & L_{Qy} & L_{Qz} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_x \\ i_y \\ i_z \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (52)$$

Resolvendo a equação matricial chega-se a:

$$\lambda_a = L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + L_{ax} \cdot i_x + L_{ay} \cdot i_y + L_{az} \cdot i_z + L_{aF} \cdot i_F + L_{aD} \cdot i_D + L_{aQ} \cdot i_Q \quad (53)$$

$$\lambda_b = L_{ab} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + L_{bx} \cdot i_x + L_{by} \cdot i_y + L_{bz} \cdot i_z + L_{bF} \cdot i_F + L_{bD} \cdot i_D + L_{bQ} \cdot i_Q \quad (54)$$

$$\lambda_c = L_{ac} \cdot i_a + L_{bc} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c + L_{cx} \cdot i_x + L_{cy} \cdot i_y + L_{cz} \cdot i_z + L_{cF} \cdot i_F + L_{cD} \cdot i_D + L_{cQ} \cdot i_Q \quad (55)$$

$$\lambda_x = L_{ax} \cdot i_a + L_{bx} \cdot i_b + L_{cx} \cdot i_c + L_{xx} \cdot i_x + L_{xy} \cdot i_y + L_{xz} \cdot i_z + L_{xF} \cdot i_F + L_{xD} \cdot i_D + L_{xQ} \cdot i_Q \quad (56)$$

$$\lambda_y = L_{ay} \cdot i_a + L_{by} \cdot i_b + L_{cy} \cdot i_c + L_{xy} \cdot i_x + L_{yy} \cdot i_y + L_{yz} \cdot i_z + L_{yF} \cdot i_F + L_{yD} \cdot i_D + L_{yQ} \cdot i_Q \quad (57)$$

$$\lambda_z = L_{az} \cdot i_a + L_{bz} \cdot i_b + L_{cz} \cdot i_c + L_{xz} \cdot i_x + L_{yz} \cdot i_y + L_{zz} \cdot i_z + L_{zF} \cdot i_F + L_{zD} \cdot i_D + L_{zQ} \cdot i_Q \quad (58)$$

$$\lambda_F = L_{aF} \cdot i_a + L_{bF} \cdot i_b + L_{cF} \cdot i_c + L_{xF} \cdot i_x + L_{yF} \cdot i_y + L_{zF} \cdot i_z + L_{FF} \cdot i_F + L_{FD} \cdot i_D + L_{FQ} \cdot i_Q \quad (59)$$

$$\lambda_D = L_{aD} \cdot i_a + L_{bD} \cdot i_b + L_{cD} \cdot i_c + L_{xD} \cdot i_x + L_{yD} \cdot i_y + L_{zD} \cdot i_z + L_{FD} \cdot i_F + L_{DD} \cdot i_D + L_{DQ} \cdot i_Q \quad (60)$$

$$\lambda_Q = L_{aQ} \cdot i_a + L_{bQ} \cdot i_b + L_{cQ} \cdot i_c + L_{xQ} \cdot i_x + L_{yQ} \cdot i_y + L_{zQ} \cdot i_z + L_{FQ} \cdot i_F + L_{DQ} \cdot i_D + L_{QQ} \cdot i_Q \quad (61)$$

2.6 – CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO

O conjugado eletromagnético pode ser obtido a partir do princípio de conservação de energia [24]. O resultado da aplicação deste fundamento conduz à:

$$T_e = \frac{p}{2} \sum_i \sum_k i_i i_k \frac{dL_{ik}}{d\theta} \quad (62)$$

Sendo:

T_e – conjugado eletromagnético desenvolvido pelo gerador hexafásico;

p – número de pólos do gerador;

i – correntes nos enrolamentos do gerador, para i e k assumindo $a, b, c, x, y, z, F, D, Q$.

$$\frac{dL_{ik}}{d\theta} = \dot{L}_{ik} - \text{derivadas das expressões das indutâncias dos enrolamentos da máquina,}$$

para i e k assumindo $a, b, c, x, y, z, F, D, Q$.

Assim, torna-se necessário derivar as expressões que descrevem o comportamento das indutâncias do gerador síncrono hexafásico em função do ângulo θ , a fim de que se obter a equação do conjugado eletromagnético. As derivadas das expressões citadas são:

$$\dot{L}_{aa} = -2 \cdot L_m \cdot \sin(2\theta) \quad (63)$$

$$\dot{L}_{ab} = 2 \cdot L_m \cdot \sin[2(\theta + \pi/6)] \quad (64)$$

$$\dot{L}_{ac} = 2 \cdot L_m \cdot \sin[2(\theta + 5\pi/6)] \quad (65)$$

$$\dot{L}_{ax} = 2 \cdot L_m \cdot \sin[2(\theta - \pi/12)] \quad (66)$$

$$\dot{L}_{ay} = 2 \cdot L_m \cdot \sin[2(\theta + \pi/12)] \quad (67)$$

$$\dot{L}_{az} = 2 \cdot L_m \cdot \sin[2(\theta - \pi/4)] \quad (68)$$

$$\dot{L}_{aF} = -M_F \cdot \sin(\theta) \quad (69)$$

$$\dot{L}_{aD} = -M_D \cdot \text{sen}(\theta) \quad (70)$$

$$\dot{L}_{aQ} = M_Q \cdot \cos(\theta) \quad (71)$$

$$\dot{L}_{bb} = -2 \cdot L_m \cdot \text{sen}\left[2\left(\theta - 2\pi/3\right)\right] \quad (72)$$

$$\dot{L}_{bc} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen}\left[2\left(\theta - \pi/2\right)\right] \quad (73)$$

$$\dot{L}_{bx} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen}\left[2\left(\theta - 11\pi/12\right)\right] \quad (74)$$

$$\dot{L}_{by} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen}\left[2\left(\theta - 3\pi/4\right)\right] \quad (75)$$

$$\dot{L}_{bz} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen}\left[2\left(\theta - 7\pi/12\right)\right] \quad (76)$$

$$\dot{L}_{bF} = -M_F \cdot \text{sen}(\theta - 2\pi/3) \quad (77)$$

$$\dot{L}_{bD} = -M_D \cdot \text{sen}(\theta - 2\pi/3) \quad (78)$$

$$\dot{L}_{bQ} = M_Q \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) \quad (79)$$

$$\dot{L}_{cc} = -2 \cdot L_m \cdot \text{sen} \left[2(\theta + 2\pi/3) \right] \quad (80)$$

$$\dot{L}_{cx} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen} \left[2(\theta + 3\pi/4) \right] \quad (81)$$

$$\dot{L}_{cy} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen} \left[2(\theta + 5\pi/12) \right] \quad (82)$$

$$\dot{L}_{cz} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen} \left[2(\theta + 7\pi/12) \right] \quad (83)$$

$$\dot{L}_{cF} = -M_F \cdot \text{sen}(\theta + 2\pi/3) \quad (84)$$

$$\dot{L}_{cD} = -M_D \cdot \text{sen}(\theta + 2\pi/3) \quad (85)$$

$$\dot{L}_{cQ} = M_Q \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) \quad (86)$$

$$\dot{L}_{xx} = -2 \cdot L_m \cdot \text{sen} \left[2(\theta - \pi/6) \right] \quad (87)$$

$$\dot{L}_{xy} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen}(2\theta) \quad (88)$$

$$\dot{L}_{xz} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen} \left[2(\theta - \pi/3) \right] \quad (89)$$

$$\dot{L}_{xF} = -M_F \cdot \text{sen}(\theta - \pi / 6) \quad (90)$$

$$\dot{L}_{xD} = -M_D \cdot \text{sen}(\theta - \pi / 6) \quad (91)$$

$$\dot{L}_{xQ} = M_Q \cdot \cos(\theta - \pi / 6) \quad (92)$$

$$\dot{L}_{yy} = -2 \cdot L_m \cdot \text{sen}[2(\theta - 5\pi / 6)] \quad (93)$$

$$\dot{L}_{yz} = 2 \cdot L_m \cdot \text{sen}[2(\theta - 2\pi / 3)] \quad (94)$$

$$\dot{L}_{yF} = -M_F \cdot \text{sen}(\theta - 5\pi / 6) \quad (95)$$

$$\dot{L}_{yD} = -M_D \cdot \text{sen}(\theta - 5\pi / 6) \quad (96)$$

$$\dot{L}_{yQ} = M_Q \cdot \cos(\theta - 5\pi / 6) \quad (97)$$

$$\dot{L}_{zz} = -2 \cdot L_m \cdot \text{sen}[2(\theta + \pi / 2)] \quad (98)$$

$$\dot{L}_{zF} = -M_F \cdot \text{sen}(\theta + \pi / 2) \quad (99)$$

$$\dot{L}_{zD} = -M_D \cdot \sin(\theta + \pi/2) \quad (100)$$

$$\dot{L}_{zQ} = M_Q \cdot \cos(\theta + \pi/2) \quad (101)$$

$$\dot{L}_{FF} = 0 \quad (102)$$

$$\dot{L}_{FD} = 0 \quad (103)$$

$$\dot{L}_{FQ} = 0 \quad (104)$$

$$\dot{L}_{DD} = 0 \quad (105)$$

$$\dot{L}_{DQ} = 0 \quad (106)$$

$$\dot{L}_{QQ} = 0 \quad (107)$$

Em que:

$\dot{L}_{ik}$ – representa a derivada da expressão de determinada indutância, conforme definido pelo sub-índice ik , para i e k iguais a: $a, b, c, x, y, z, F, D, Q$.

Substituindo as derivadas acima na expressão do conjugado eletromagnético chega-se a equação (108):

$$\begin{aligned}
 T_e' = & i_a \cdot \left(\dot{L}_{aa} \cdot i_a + \dot{L}_{ab} \cdot i_b + \dot{L}_{ac} \cdot i_c + \dot{L}_{ax} \cdot i_x + \dot{L}_{ay} \cdot i_y + \dot{L}_{az} \cdot i_z + \dot{L}_{aF} \cdot i_F + \dot{L}_{aD} \cdot i_D + \dot{L}_{aQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_b \cdot \left(\dot{L}_{ab} \cdot i_a + \dot{L}_{bb} \cdot i_b + \dot{L}_{bc} \cdot i_c + \dot{L}_{bx} \cdot i_x + \dot{L}_{by} \cdot i_y + \dot{L}_{bz} \cdot i_z + \dot{L}_{bF} \cdot i_F + \dot{L}_{bD} \cdot i_D + \dot{L}_{bQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_c \cdot \left(\dot{L}_{ac} \cdot i_a + \dot{L}_{bc} \cdot i_b + \dot{L}_{cc} \cdot i_c + \dot{L}_{cx} \cdot i_x + \dot{L}_{cy} \cdot i_y + \dot{L}_{cz} \cdot i_z + \dot{L}_{cF} \cdot i_F + \dot{L}_{cD} \cdot i_D + \dot{L}_{cQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_x \cdot \left(\dot{L}_{ax} \cdot i_a + \dot{L}_{bx} \cdot i_b + \dot{L}_{cx} \cdot i_c + \dot{L}_{xx} \cdot i_x + \dot{L}_{xy} \cdot i_y + \dot{L}_{xz} \cdot i_z + \dot{L}_{xF} \cdot i_F + \dot{L}_{xD} \cdot i_D + \dot{L}_{xQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_y \cdot \left(\dot{L}_{ay} \cdot i_a + \dot{L}_{by} \cdot i_b + \dot{L}_{cy} \cdot i_c + \dot{L}_{xy} \cdot i_x + \dot{L}_{yy} \cdot i_y + \dot{L}_{yz} \cdot i_z + \dot{L}_{yF} \cdot i_F + \dot{L}_{yD} \cdot i_D + \dot{L}_{yQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_z \cdot \left(\dot{L}_{az} \cdot i_a + \dot{L}_{bz} \cdot i_b + \dot{L}_{cz} \cdot i_c + \dot{L}_{xz} \cdot i_x + \dot{L}_{yz} \cdot i_y + \dot{L}_{zz} \cdot i_z + \dot{L}_{zF} \cdot i_F + \dot{L}_{zD} \cdot i_D + \dot{L}_{zQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_F \cdot \left(\dot{L}_{aF} \cdot i_a + \dot{L}_{bF} \cdot i_b + \dot{L}_{cF} \cdot i_c + \dot{L}_{xF} \cdot i_x + \dot{L}_{yF} \cdot i_y + \dot{L}_{zF} \cdot i_z + \dot{L}_{FF} \cdot i_F + \dot{L}_{FD} \cdot i_D + \dot{L}_{FQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_D \cdot \left(\dot{L}_{aD} \cdot i_a + \dot{L}_{bD} \cdot i_b + \dot{L}_{cD} \cdot i_c + \dot{L}_{xD} \cdot i_x + \dot{L}_{yD} \cdot i_y + \dot{L}_{zD} \cdot i_z + \dot{L}_{FD} \cdot i_F + \dot{L}_{DD} \cdot i_D + \dot{L}_{DQ} \cdot i_Q \right) + \\
 & + i_Q \cdot \left(\dot{L}_{aQ} \cdot i_a + \dot{L}_{bQ} \cdot i_b + \dot{L}_{cQ} \cdot i_c + \dot{L}_{xQ} \cdot i_x + \dot{L}_{yQ} \cdot i_y + \dot{L}_{zQ} \cdot i_z + \dot{L}_{FQ} \cdot i_F + \dot{L}_{DQ} \cdot i_D + \dot{L}_{QQ} \cdot i_Q \right)
 \end{aligned} \tag{108}$$

Finalmente:

$$T_e = \frac{p}{2} \cdot T_e' \tag{109}$$

Portanto, a expressão (109) representa, de uma maneira mais simplificada, o conjugado da máquina em estudo.

2.7 – EXPRESSÃO DA DINÂMICA DA MÁQUINA SÍNCRONA

A expressão que expressa a dinâmica do movimento de uma máquina síncrona [25] é dada por:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_T - T_e \quad (110)$$

Em que:

T_T – conjugado do acionamento primário (turbina eólica);

T_e – conjugado eletromagnético;

J – momento de inércia.

2.8 – TENSÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA

Para a obtenção das equações das diversas tensões associadas aos terminais das distintas bobinas que perfazem a máquina será utilizado um modelo de circuito comum. Este se fundamenta no princípio que as tensões são compostas por uma parcela proporcional à respectiva corrente (supondo as resistências dos enrolamentos constantes) e outra advinda dos fluxos concatenados. De um modo geral pode-se escrever a equação para tensão da seguinte forma:

$$v = e - r \cdot i \quad (111)$$

Em que:

v – é a tensão resultante no enrolamento;

r – é a resistência do circuito do enrolamento em estudo;

i – é a corrente que circula pelo circuito do enrolamento;

e – é a força eletromotriz produzida no enrolamento e dada por:

$$e = - \frac{d(Li)}{dt} = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (112)$$

Substituindo-se a equação (112) na expressão (111):

$$v = -r \cdot i - \frac{d\lambda}{dt} \quad (113)$$

Portanto, para obtenção das equações de tensão basta aplicar a equação (113) para cada enrolamento considerado nas análises. Para o caso dos enrolamentos que perfazem a máquina em questão:

$$v_a = -r_a \cdot i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (114)$$

$$v_b = -r_b \cdot i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (115)$$

$$v_c = -r_c \cdot i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (116)$$

$$v_x = -r_x \cdot i_x - \frac{d\lambda_x}{dt} \quad (117)$$

$$v_y = -r_y \cdot i_y - \frac{d\lambda_y}{dt} \quad (118)$$

$$v_z = -r_z \cdot i_z - \frac{d\lambda_z}{dt} \quad (119)$$

$$v_F = r_F \cdot i_F + \frac{d\lambda_F}{dt} \quad (120)$$

$$v_D = r_D \cdot i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} = 0 \quad (121)$$

$$v_Q = r_Q \cdot i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} = 0 \quad (122)$$

2.9 – PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA

Os parâmetros de interesse para a modelagem da máquina síncrona são basicamente suas indutâncias (ou reatâncias) mútuas, próprias, resistências, etc. Todavia, as grandezas apontadas no processo da formulação matemática descrita anteriormente nem sempre são disponíveis de forma imediata. De fato, as informações fornecidas pelos fabricantes, via projeto ou testes de fábrica, não coincidem com as grandezas constantes nas inúmeras equações apresentadas. Este fato determina a necessidade da utilização de equações que correlacionem os parâmetros fornecidos pelos fabricantes com aqueles efetivamente requeridos pelas expressões que descrevem o comportamento da máquina síncrona [34]. O processo associado com esta transformação recebeu a designação de “transformação de parâmetros externos em internos” e objetiva pois associar dados frequentemente encontrados em livros, catálogos, etc. com aqueles exigidos pelas equações de fluxo, tensão, conjugado, etc.

Para se atingir a tais propósitos, a tabela 2.1 identifica as diversas grandezas vinculadas com as formulações matemáticas, quais sejam, os parâmetros internos da máquina.

Tabela 2.1 – Parâmetros internos da máquina síncrona

Parâmetro	Identificação
L_{s1}, L_m	Valor máximo das parcelas constantes da indutância própria de uma fase do estator, não incluindo a dispersão.
L_{F1}	Valor máximo da parcela constante da indutância própria do enrolamento de campo, não incluindo a dispersão.
L_{D1}, L_{Q1}	Valores máximos das parcelas “d e q” da parcela constante da indutância própria do enrolamento amortecedor, não incluindo a dispersão.
$M_s, M_{s1}, M_{s2}, M_{s3}$	Valores das parcelas constantes das indutâncias mútuas entre as fases do estator
M_F	Valor máximo da indutância mútua entre uma fase do estator e o enrolamento de campo.
M_D	Valor máximo da indutância mútua entre uma fase do estator e a componente de eixo “d” do enrolamento amortecedor.
M_Q	Valor máximo da indutância mútua entre uma fase do estator e a componente de eixo “q” do enrolamento amortecedor.
M_{FD}	Valor máximo da indutância mútua entre o campo e a componente de eixo “d” do enrolamento amortecedor.
M_{FQ}	Valor máximo da indutância mútua entre o campo e a componente de eixo “q” do enrolamento amortecedor.
M_{DQ}	Valor máximo da indutância mútua entre as componentes de eixos “d” e “q” do enrolamento amortecedor.
$r_a = r_b = r_c = r_x = r_y = r_z$	Valor da resistência por fase do estator.
r_F	Valor da resistência do campo
r_D, r_Q	Valores das resistências das parcelas de eixos “d” e “q” do enrolamento amortecedor
L_{s2}	Valor da indutância de dispersão por fase do estator (fases a, b, c, x, y e z)
L_{F2}	Valor da indutância de dispersão do enrolamento de campo.
L_{D2}, L_{Q2}	Valores das indutâncias de dispersão das componentes de eixos “d” e “q” do enrolamento amortecedor.
J	Momento de inércia das partes girantes (turbina eólica e gerador).

Complementarmente, a tabela 2.2 é indicativa dos parâmetros disponíveis e oferecidos pelos fabricantes dos geradores e outras fontes. Estes dados são aqui denominados por parâmetros externos da máquina.

Tabela 2.2 – Parâmetros externos da máquina síncrona

Parâmetro	Descrição	Unidade
X_d	Reatância síncrona de eixo direto	Pu
X_q	Reatância síncrona de eixo em quadratura	Pu
X_ℓ	Reatância de dispersão de uma fase do estator	Pu
X'_d	Reatância transitória de eixo direto	Pu
X''_d	Reatância sub-transitória de eixo direto	Pu
X''_q	Reatância sub-transitória de eixo em quadratura	Pu
T'_{d0}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto	S
T''_{d0}	Constante de tempo sub-transitória de eixo direto em circuito aberto	S
T''_{q0}	Constante de tempo sub-transitória de eixo em quadratura em circuito aberto	S
r_s	Resistência por fase do estator	Pu
J ou H	Momento ou constante de inércia das partes girantes (gerador e turbina eólica)	kg.m ² ou s

A seguir, são apresentadas as expressões matemáticas desenvolvidas a partir de [34] que correlacionam os parâmetros externos, encontrados em folhas de ensaios, catálogos, livros, etc, com aqueles utilizados na modelagem matemática estabelecida anteriormente, denominados por parâmetros internos.

$$L_{s1} = \frac{1}{3}(X_d + X_q - 2X_\ell) \quad (123)$$

$$L_m = \frac{1}{3}(X_d - X_q) \quad (124)$$

$$M_s = \frac{1}{6}(X_d + X_q - 2X_\ell) \quad (125)$$

$$M_{s1} = -\frac{1}{6}(X_d + X_q - 2X_\ell) \quad (126)$$

$$M_{s2} = \frac{1}{6}(X_d + X_q - 2X_\ell) \cdot (\cos(\pi/6) + \sqrt{3} \sin(\pi/6)) \quad (127)$$

$$M_{s3} = \frac{1}{6}(X_d + X_q - 2X_\ell) \cdot (\cos(\pi/6) - \sqrt{3} \sin(\pi/6)) \quad (128)$$

$$L_{F2} = \frac{(X'_d - X_\ell) \cdot (X_d - X_\ell)}{(X_d - X'_d)} \quad (129)$$

$$L_{F1} = X_d - X_\ell \quad (130)$$

$$L_{D2} = \frac{L_{F2} \cdot (X''_d - X_\ell) \cdot (X_d - X_\ell)}{L_{F2} \cdot (X_d - X_\ell) + L_{F1} \cdot (X''_d - X_\ell)} \quad (131)$$

$$L_{D1} = X_d - X_\ell \quad (132)$$

$$L_{Q2} = \frac{(X''_q - X_\ell) \cdot (X_q - X_\ell)}{(X_q - X''_q)} \quad (133)$$

$$L_{Q1} = X_q - X_\ell \quad (134)$$

$$M_F = \sqrt{(2M_s + L_m) \cdot (L_{F1})} \quad (135)$$

$$M_D = \sqrt{(2M_s + L_m) \cdot (L_{D1})} \quad (136)$$

$$M_Q = \sqrt{(2M_s - L_m) \cdot (L_{Q1})} \quad (137)$$

$$M_{FD} = \sqrt{(L_{D1} - L_{D2}) \cdot (L_{F1} - L_{F2})} \quad (138)$$

$$M_{DQ} = M_{FQ} = 0 \quad (139)$$

$$L_{s1} = X_\ell \quad (140)$$

$$r_a = r_b = r_c = r_x = r_y = r_z = r_s \quad (141)$$

$$r_F = \frac{L_{F1}}{2\pi f \cdot T'_{d0}} \quad (142)$$

$$r_D = \frac{1}{2\pi f \cdot T''_{d0}} \cdot \left[L_{D2} + \frac{(L_{D1} - L_{D2}) \cdot L_{F2}}{(L_{D1} - L_{D2} + L_{F2})} \right] \quad (143)$$

2.10 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo foi centrado na questão da modelagem matemática do gerador síncrono hexafásico especial. Inicialmente foram tecidos comentários sobre os aspectos básicos relacionados com a constituição física do gerador hexafásico, enfatizando a identificação e disposição dos enrolamentos presentes no estator da máquina. A denominação especial, como visto, tem por fundamento a caracterização de uma máquina com construção diferenciada das hexafásicas convencionais, pelo fato que os dois conjuntos de enrolamentos trifásicos encontram-se com defasagens de 30° e não os tradicionais 60° . O grande motivo pela utilização deste defasamento está no atendimento aos requisitos associados com a estrutura da unidade retificadora de 12 para posterior inversão e conexão final à rede alternada. A substituição da configuração de 6 pulsos pela de 12 proporciona vantagens como a eliminação, em alguns casos, de cerca de 50% do valor do espectro harmônico de certas correntes e grandezas ligadas a elas. Também, quando do emprego desta configuração tem-se, como resultado, a obtenção de uma tensão CC de nível dobrado ao valor obtido por uma unidade retificadora de 6 pulsos convencional, sem a necessidade de ampliar a classe de tensão do gerador.

A partir de princípios bastante difundidos no contexto internacional e nacional sobre a questão da modelagem de máquinas síncronas utilizando uma formulação “a,b,c” no domínio do tempo, como apontado nas referências comentadas, foram então desenvolvidos os modelos próprios ao presente trabalho de pesquisa. Os resultados obtidos, nos termos derivados nesta dissertação, encontram consonância parcial com duas referências internacionais, as quais foram devidamente identificadas no texto. Todavia, ressalta-se que a formulação, como um todo, constitui-se numa contribuição importante deste trabalho para a inserção das mencionadas máquinas especiais no contexto dos complexos eólicos.

Além do detalhamento das expressões envolvendo a grande diversidade de grandezas factíveis relevantes à caracterização da operação dos geradores, foram também tecidos esclarecimentos sobre a questão dos dados de entrada, com ênfase a correlação entre aqueles normalmente disponibilizados e aqueles necessários aos modelos matemáticos.

CAPÍTULO III

ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO GERADOR HEXAFÁSICO

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados dos estudos computacionais associados com a operação do gerador síncrono hexafásico e a análise comparativa entre esta máquina e as convencionais.

Para tanto, os modelos contemplados no Capítulo II são empregados para a obtenção de um programa computacional, que se fundamenta em técnicas de modelagem no domínio do tempo, e, a partir desta base, uma série de estudos de desempenho são realizadas sob condições normais de operação do parque eólico.

Dentro deste enfoque, este capítulo tem como pontos fundamentais:

- Apresentar a base computacional utilizada e o programa representativo do gerador hexafásico;

- Descrever os sistemas eólicos a serem simulados, apontando às partes componentes dos mesmos;
- Mostrar e discutir os resultados de desempenho obtidos através do emprego de um gerador hexafásico e um trifásico convencional;
- Comparar grandezas como: correntes, tensões, conjugado, fluxo, nível de distorção harmônica, etc, obtidas a partir do gerador hexafásico e trifásico, com vistas a ressaltar as vantagens advindas do emprego da máquina especial.

3.2 – A BASE COMPUTACIONAL UTILIZADA

A escolha da plataforma computacional para fins desta pesquisa recaiu num software que permite a realização de estudos de naturezas diversas, como por exemplo: de regime permanente e transitório, estudos harmônicos, fluxo de carga, estudos dinâmicos, etc. Salienta-se, que tal versatilidade é conseguida graças à utilização de técnicas baseadas no domínio do tempo. Dentro desse princípio, destaca-se o simulador “SABER”, o qual possui excelentes recursos gráficos, além de uma interação amigável com o usuário, constituindo-se numa grande vantagem para a análise dinâmica de sistemas elétricos [30]. Este simulador utiliza uma linguagem própria denominada “MAST”, de fácil compreensão, que permite a modelagem de componentes elétricos, mecânicos, etc, através de rotinas específicas denominadas “Templates” [31]. Isto torna possível a montagem de um sistema complexo, através da conexão de blocos. O simulador possui ainda a vantagem de permitir a utilização de rotinas elaboradas em outras linguagens como C e Fortran [30], [32], [33].

Os atributos mencionados para o pacote SABER servem, portanto, como balizadores da adequada escolha da plataforma computacional utilizada nesta dissertação. Dentre as várias vantagens do simulador, pode-se destacar:

- Existência de uma biblioteca padrão, para simular elementos do sistema elétrico tais como: resistor (R), indutor (L) e capacitor (C), etc;
- Grande versatilidade gráfica;
- Facilidade na análise de resultados como: distorção harmônica (através da Série de Fourier), análise transitória, etc;
- Permite definir parâmetros de simulação como: tempo de simulação, passo de integração;
- Ajusta automaticamente o passo de integração entre valores máximo e mínimo pré-definidos;
- Dispõe de vários métodos de integração numérica para a solução de equações diferenciais;
- Possibilidade de montar o sistema através da conexão (“física”) dos blocos que representam os equipamentos modelados (geradores, motores, transformadores, cabos, etc);
- Modelagem de equipamentos elétricos ou mecânicos através de suas equações diferenciais.

Diante destas propriedades e à luz do fato que esta foi a plataforma computacional utilizada pelas referências [12], [13] o modelo de gerador proposto no capítulo anterior foi implementado na mesma estrutura.

3.3 – IMPLEMENTAÇÃO DO GERADOR

Avançando na direção da implementação computacional do modelo, a figura 3.1 mostra o desenho do *template* da máquina hexafásica desenvolvida e utilizada para os trabalhos investigativos desta dissertação. A figura ressalta e identifica os pinos das conexões mecânica (eixo) e elétrica (excitação, estator e neutro).

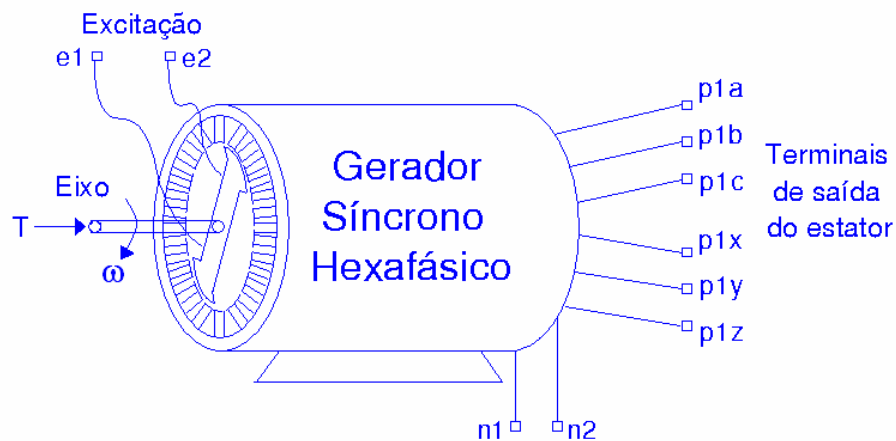


Figura 3.1 – Ilustração dos pinos de conexão do gerador.

A tabela 3.1 apresenta os pontos de conexão, tipo e respectiva descrição, para o modelo, em conformidade com a figura ilustrada anteriormente.

Tabela 3.1 – Terminais para conexão do gerador síncrono

Nome	Tipo	Descrição
ω	<i>Var</i>	Velocidade do eixo
T	<i>Ref</i>	Torque mecânico no eixo do gerador
e1	<i>Electrical</i>	Terminal 1 da excitatriz
e2	<i>Electrical</i>	Terminal 2 da excitatriz
n1	<i>Electrical</i>	Neutro do arranjo trifásico <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i>
n2	<i>Electrical</i>	Neutro do arranjo trifásico <i>x</i> , <i>y</i> e <i>z</i>
p1a	<i>Electrical</i>	Terminal da fase <i>a</i> do estator
p1b	<i>Electrical</i>	Terminal da fase <i>b</i> do estator
p1c	<i>Electrical</i>	Terminal da fase <i>c</i> do estator
p1x	<i>Electrical</i>	Terminal da fase <i>x</i> do estator
p1y	<i>Electrical</i>	Terminal da fase <i>y</i> do estator
p1z	<i>Electrical</i>	Terminal da fase <i>z</i> do estator

Os diferentes aspectos relacionados com o *template* do gerador síncrono são mostrados na sequência.

A) CABEÇALHO DO *TEMPLATE* GERADOR

A declaração seguinte refere-se ao cabeçalho do *template* do gerador síncrono hexafásico denominado de **gerador especial**. No cabeçalho são definidos quais os pontos de conexão do *template* e quais os parâmetros de entrada do gerador. Trata-se de um modelo genérico, motivo pelo qual o programa desenvolvido pode ser extrapolado para geradores síncronos hexafásicos especiais com quaisquer parâmetros. A forma como é definido o cabeçalho é mostrada a seguir:

element template gerador_especial eixo e1 e2 n1 n2 p1a p1b p1c p1x p1y p1z = Xd, Xq, Xl, Xtd, Xsq, Xsd, Ttdo, Tsdo, Tsqo, Rs, inercia, f, p, ic1, Snom, Vnom, I_rotor

B) DESCRIÇÃO DO *TEMPLATE*

Este *template* simula um gerador síncrono hexafásico especial através da modelagem a, b, c. A modelagem implementada é realizada em função da proposta feita no capítulo II. O modelo apresenta um conjunto de pinos de conexão, mecânicos e elétricos, que propiciam o interfaceamento com dispositivos de entrada e de saída do gerador. Como estabelecido ao longo do trabalho, a força motriz de acionamento do gerador é proveniente da energia extraída do vento através do rotor eólico e, os sinais gerados pelo gerador elétrico alimentam o retificador.

C) DESCRIÇÃO DOS DIFERENTES ELEMENTOS CONSTANTES NO CABEÇALHO

Neste ponto são descritas as declarações que compõem o cabeçalho do *template gerador*.

- **Gerador especial** – Nome do *template*;
- **eixo** – Pino de conexão através do qual são fornecidos o torque e velocidade;
- **e1** – Pino de conexão do sistema de excitação;
- **e2** – Pino de conexão do sistema de excitação;
- **n1** – Pino de conexão do neutro das fases *a*, *b* e *c* do gerador;
- **n2** – Pino de conexão do neutro das fases *x*, *y* e *z* do gerador;
- **p1a, p1b, p1c** – Terminais de saída do gerador síncrono, fases *a*, *b* e *c*, respectivamente;
- **p1x, p1y, p1z** – Terminais de saída do gerador síncrono, fases *x*, *y* e *z*, respectivamente;
- **Xd, Xq, Xl, Xtd, Xsq, Xsd, Ttdo, Tsdo, Tsqo, Rs, inercia, f, p, ic1, Snom, Vnom, I_rotor** – Parâmetros;

D) PARÂMETROS DE ENTRADA

A tabela 3.2 apresenta os parâmetros externos que devem ser fornecidos para a simulação da máquina em pauta.

Tabela 3.2 – Variáveis de entrada para o gerador síncrono

Nome	Default	Unidade	Descrição
Xd	<i>undef</i>	pu ou Ohm	Reatância síncrona de eixo direto
Xq	<i>undef</i>	pu ou Ohm	Reatância síncrona de eixo em quadratura
Xl	<i>undef</i>	pu ou Ohm	Reatância de dispersão de uma fase do estator
Xtd	<i>undef</i>	pu	Reatância transitória de eixo direto
Xsd	<i>undef</i>	pu	Reatância subtransitória de eixo direto
Xsq	<i>undef</i>	pu	Reatância subtransitória de eixo em quadratura
Ttdo	<i>undef</i>	s	Constante de tempo transitória de eixo direto e circuito aberto
Tsdo	<i>undef</i>	s	Constante de tempo subtransitória de eixo direto e circuito aberto
Tsqo	<i>undef</i>	s	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura e circuito aberto
Rs	<i>undef</i>	pu	Resistência por fase do estator
inercia	<i>undef</i>	Kg.m ² ou kW.s	Momento ou constante de inércia das partes girantes
p	<i>undef</i>	-	Número de pólos
f	<i>undef</i>	Hz	Frequência
ic1[11]	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	pu	Vetor de condições iniciais ic=[ia1,ib1,ic1,ix1,iy1,iz1,w,id,iq,ir,teta]
Snom	<i>undef</i>	MVA	Potência nominal
Vnom	<i>undef</i>	kV	Tensão nominal
I_rotor	<i>undef</i>	A	Valor da corrente de campo para gerar tensão nominal com a máquina a vazio

E) VARIÁVEIS DE SAÍDA

As variáveis de saída geradas pelo módulo do gerador síncrono estão descritas na tabela

3.3.

Tabela 3.3 – Variáveis de saída para o gerador

Nome	Tipo	Unidade	Descrição
Va, Vb, Vc, Vx, Vy, Vz	var	V	Tensão fase-neutro de cada uma das fases do estator
Flux_a	var	Wb	Fluxo magnético associado com a fase <i>a</i> do estator
Flux_b	var	Wb	Fluxo magnético associado com a fase <i>b</i> do estator
Flux_c	var	Wb	Fluxo magnético associado com a fase <i>c</i> do estator
Flux_x	var	Wb	Fluxo magnético associado com a fase <i>x</i> do estator
Flux_y	var	Wb	Fluxo magnético associado com a fase <i>y</i> do estator
Flux_z	var	Wb	Fluxo magnético associado com a fase <i>z</i> do estator
Flux_r	var	Wb	Fluxo magnético associado ao enrolamento <i>r</i> do rotor
Flux_d	var	Wb	Fluxo magnético associado ao enrolamento de eixo direto <i>d</i> do rotor
Flux_q	var	Wb	Fluxo magnético associado ao enrolamento de eixo em quadratura <i>q</i> do rotor
ia	var	A	Corrente de fase do estator - fase <i>a</i>
ib	var	A	Corrente de fase do estator - fase <i>b</i>
ic	var	A	Corrente de fase do estator - fase <i>c</i>
ix	var	A	Corrente de fase do estator - fase <i>x</i>
iy	var	A	Corrente de fase do estator - fase <i>y</i>
iz	var	A	Corrente de fase do estator - fase <i>z</i>
Con_elemag n	var	N.m	Conjugado eletromagnético do gerador
Con_mecanic	var	N.m	Conjugado mecânico do gerador
Vel_gerador	var	rad/s	Velocidade angular do gerador
Vel_eletric	var	rad/s	Velocidade angular do campo girante do gerador
teta	var	rad	Ângulo de deslocamento
ir	var	A	Corrente do rotor
in1	var	A	Corrente do neutro do arranjo trifásico <i>abc</i>
in2	var	A	Corrente do neutro do arranjo trifásico <i>xyz</i>
id	var	A	Corrente do eixo direto do enrolamento amortecedor
iq	var	A	Corrente do eixo em quadratura do enrolamento amortecedor

3.4 – SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO SIMULADO

Para a realização das simulações propostas, utilizou-se, nesta etapa, de dois sistemas que reproduzem, simplificadaamente, parques eólicos. Conforme destacado, muito embora a

semelhança entre os mesmos, a diferença está nos tipos de geradores empregados. Um deles opera com uma máquina síncrona convencional (trifásica) e outro com uma máquina síncrona hexafásica. Estes dois parques eólicos são caracterizados na seqüência e mostram que a topologia é fiel aos sistemas reais até a saída do retificador. No barramento CC deste foi inserida uma impedância representativa da carga. Esta adoção visou, acima de tudo, oferecer uma estratégia para uma melhor caracterização das formas de onda a serem avaliadas, evitando, assim, influências dos chaveamentos associados com o funcionamento dos inversores. Posteriormente, no Capítulo IV, os estudos contemplarão um complexo mais realístico para as unidades eólicas contendo todas suas partes constituintes.

3.4.1 – SISTEMA COM GERAÇÃO HEXAFÁSICA

O arranjo em pauta é composto pelos elementos abaixo identificados. Maiores detalhes sobre a estrutura e suas unidades básicas podem ser encontradas em [12], [13].

- Vento – que é a fonte primária de energia;
- Rotor – é o mecanismo que capta o vento e converte a energia obtida através dele em energia mecânica rotacional;
- Gerador – que é um gerador síncrono hexafásico;
- Retificador – trata-se de um retificador de 12 pulsos formado por dois retificadores trifásicos de 6 pulsos ligados em série;
- Carga – carga do tipo impedância constante ligada ao retificador.

A figura 3.2 ilustra o sistema hexafásico utilizado nas simulações.

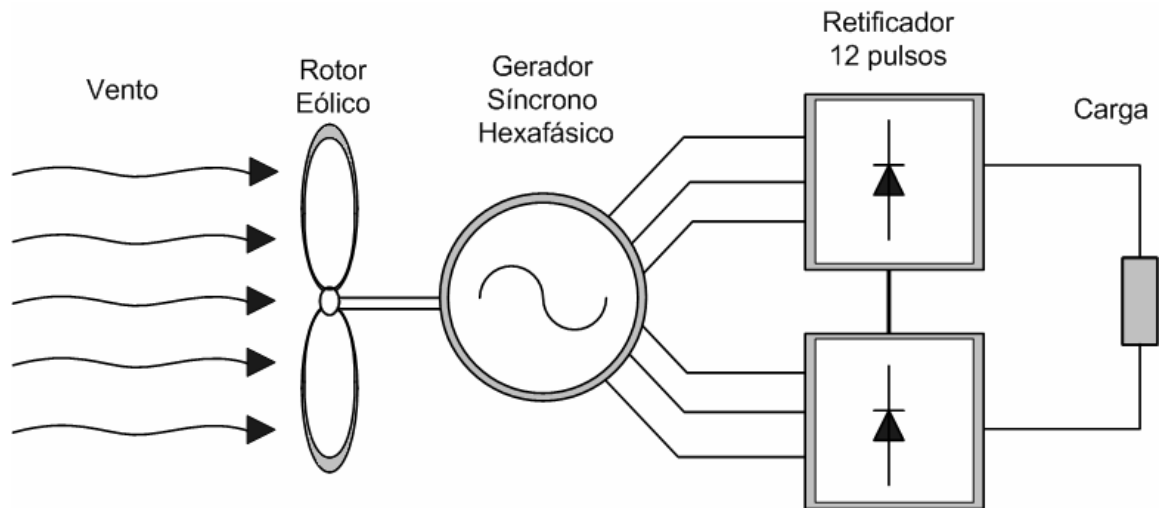


Figura 3.2 – Sistema Hexafásico.

No que tange aos dados das partes indicadas na figura e demais informações próprias à modelagem computacional, ressalta-se que foram utilizados valores típicos encontrados em sistemas de geração eólica, conforme [12], [13].

Quanto ao gerador hexafásico, não se encontrou qualquer referência que permitisse extrair os parâmetros necessários à sua modelagem. Por tal motivo, optou-se pelo emprego de dados associados com geradores convencionais típicos, de potências nominais compatíveis com a do sistema em questão.

As tabelas 3.4 a 3.7 fornecem as características/parâmetros dos componentes: máquina, regulador de tensão, rotor e vento.

Tabela 3.4 – Dados do gerador hexafásico.

Descrição	Simbologia	Valor
Potência nominal - (MVA)	S_{nom}	1
Tensão nominal - (kV)	V_{nom}	0,6
Reatância síncrona de eixo direto - (pu)	X_d	1,225
Reatância síncrona de eixo em quadratura - (pu)	X_q	1,133
Reatância de dispersão de uma fase do estator - (pu)	X_l	0,15
Reatância transitória de eixo direto - (pu)	X'_d	0,248
Reatância subtransitória de eixo direto - (pu)	X''_d	0,184
Reatância subtransitória de eixo em quadratura – (pu)	X''_q	0,212
Resistência por fase do estator - (pu)	R_s	0,013
Constante de tempo transitória de eixo direto de circuito aberto - (s)	T'_{d0}	0,108
Constante de tempo subtransitória de eixo direto de circuito aberto - (s)	T''_{d0}	0,044
Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura de circuito aberto - (s)	T''_{q0}	0,0017
Momento de inércia das partes girantes - (s)	Inercia	50000
Corrente do campo a vazio – (A)	I_{rotor}	200
Velocidade – (rad/s)	ω	3,65
Frequência - (Hz)	f	17
Número de pólos	p	60

Tabela 3.5 – Dados do regulador de tensão.

Descrição	Simbologia	Valor
Constante de tempo da referência - (s)	Tref	0,5
Ganho do circuito de estabilização - (pu)	Kf	0,01
Constante de tempo de estabilização - (s)	Tf1	1,5
Constante de tempo de estabilização - (s)	Tf2	0,34
Constante de tempo do regulador - (s)	Ta	0,01
Ganho de malha aberta do regulador - (pu)	Ka	100
Constante de tempo da excitatriz - (s)	Te	0,33
Constante da excitatriz - (pu)	Ke	1
Constante de tempo do filtro de entrada - (s)	Tr	0,0023
Tensão máxima do regulador - (pu)	Vmax	7,9
Tensão mínima do regulador - (pu)	Vmin	-7,9
Tensão mínima da excitação - (pu)	Emin	0
Tensão nominal da excitação - (V)	Enom	400
Tensão nominal do barramento a ser controlado - (V)	Vnom	600
Fator de saturação para 100% Emax - (pu)	SEmax	0,95
Fator de saturação para 75% Emax - (pu)	SEpmax	0,93

Tabela 3.6 – Dados do rotor eólico.

Descrição	Valor
Número de pás	3
Raio (m)	21
Controle	<i>pitch</i>
Tipo de eixo	horizontal, <i>upwind</i>

Tabela 3.7 – Dados do vento.

Descrição	Valor
Vento médio (m/s)	8
Rampa de vento (m/s)	0
Rajada de vento (m/s)	0

3.4.2 – SISTEMA COM GERAÇÃO TRIFÁSICA CONVENCIONAL

O sistema eólico alternativo avaliado, como esclarecido nos objetivos deste capítulo, compreende uma estrutura idêntica a da figura 3.2, à exceção do fato que o gerador passa a ser do tipo síncrono convencional. Devido ao fato que o mesmo produz apenas um complexo trifásico de tensões, o retificador de 12 pulsos foi substituído por uma unidade de 6 pulsos. A figura 3.3 identifica as partes que compõem este sistema.

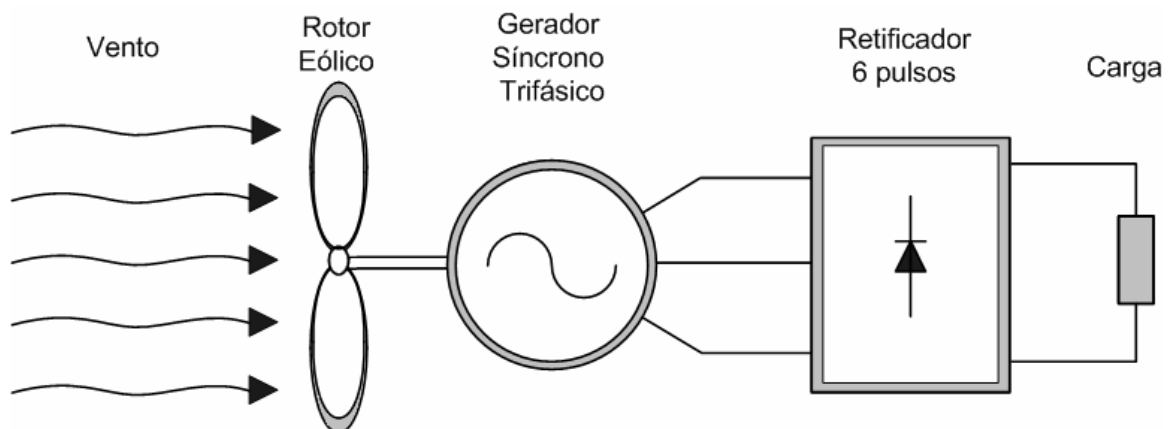


Figura 3.3 – Sistema Trifásico.

Os parâmetros utilizados para simulações do caso trifásico são os mesmos que aqueles fornecidos para o caso anterior.

3.5 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR HEXAFÁSICO

Os estudos computacionais foram realizados com o objetivo principal de estabelecer termos comparativos entre as grandezas de desempenho, em especial quanto às formas de onda, para as seguintes variáveis de operação:

- Tensões trifásicas nos terminais do gerador;
- Correntes trifásicas de suprimento do retificador;
- Fluxos magnéticos no interior da máquina;
- Conjugados eletromagnéticos;
- Correntes de campo;
- Correntes nos enrolamentos amortecedores;
- Tensão retificada e;
- Corrente retificada.

No que diz respeito à fonte primária de energia, ou seja, o vento, admitiu-se o sistema operando em regime permanente, sem qualquer turbulência.

Dentro das condições postuladas, as figuras 3.4 e 3.5 fornecem as tensões nos terminais do gerador hexafásico. Tendo em vista que a máquina em questão possui dois conjuntos trifásicos de enrolamentos do estator, defasados entre si de 30°, apresenta-se as tensões associadas com o primeiro conjunto, designadas por *abc*, e o outro, identificado por *xyz*. O valor eficaz para estas tensões é de aproximadamente 582 V. Para maior clareza na visualização, optou-se por subdividir o resultado em duas figuras, cada qual associada com um dos sistemas trifásicos acima mencionados.

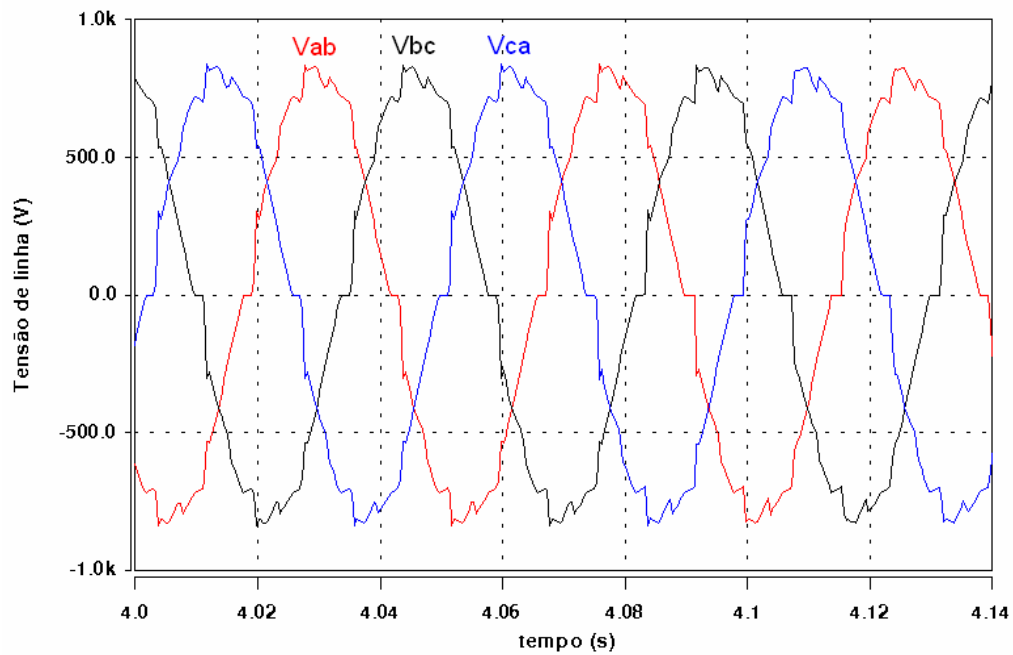


Figura 3.4 – Tensões trifásicas *abc* nos terminais de saída do gerador hexafásico.

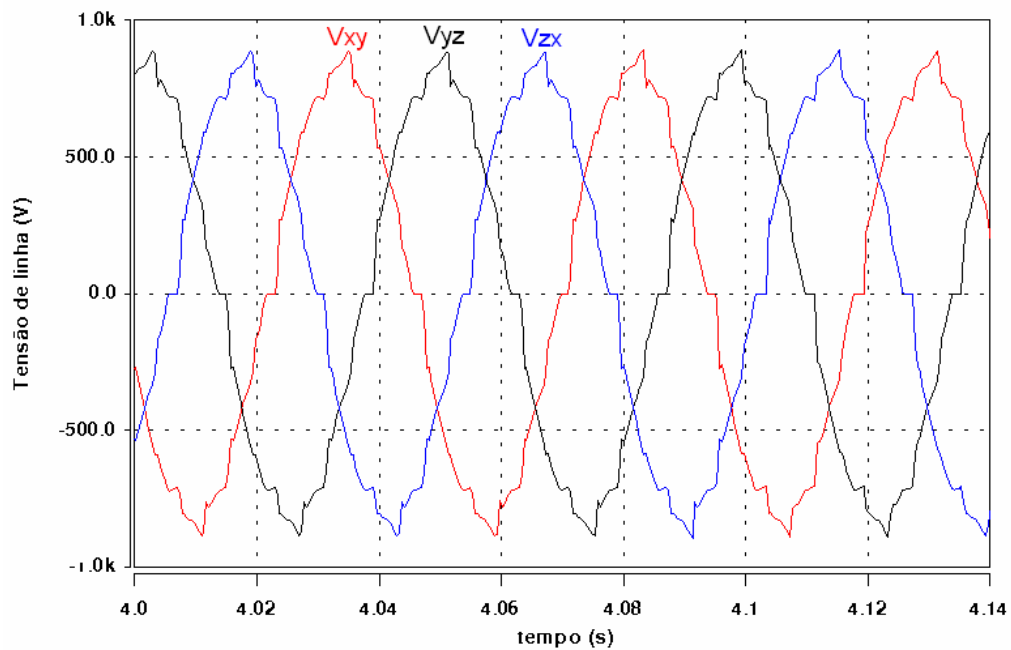


Figura 3.5 – Tensões trifásicas *xyz* nos terminais de saída do gerador hexafásico.

Para possibilitar uma melhor visualização da defasagem de 30° entre os dois conjuntos de enrolamentos trifásicos, mostra-se, através da figura 3.6, as tensões *Vab* e *Vxy* em maiores detalhes.

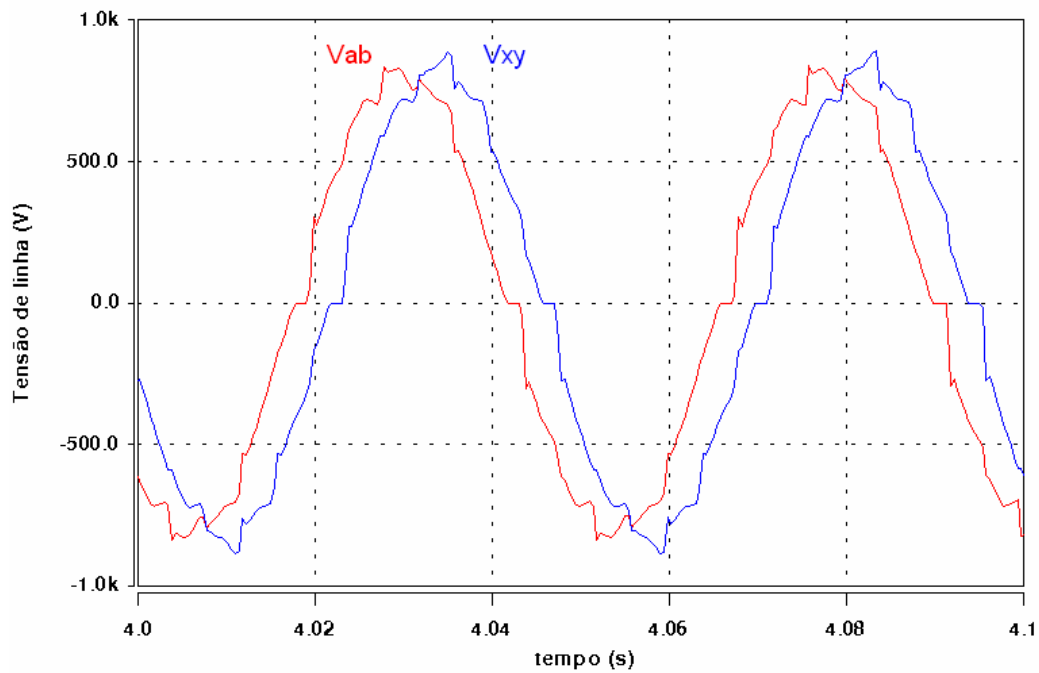


Figura 3.6 – Defasagem de 30° entre as tensões.

Como se constata através das formas de onda, as tensões se apresentam com expressivo conteúdo harmônico, fato este esperado devido ao tipo de carga suprida pela máquina, a qual consiste numa unidade retificadora de 12 pulsos. O histograma das componentes harmônicas de tensão nos terminais do gerador é mostrado na figura 3.7. Este revela que a forma de onda em pauta contém uma distorção harmônica total da ordem de 5,6%. A frequência fundamental para as condições estabelecidas para o vento é de 20 Hz. No que tange às componentes harmônicas individuais, como cada rede trifásica alimenta um retificador de 6 pulsos (12 pulsos corresponde ao conjunto), é de se esperar as componentes de ordem $6k \pm 1$, o que está em consonância com o espectro de frequências.

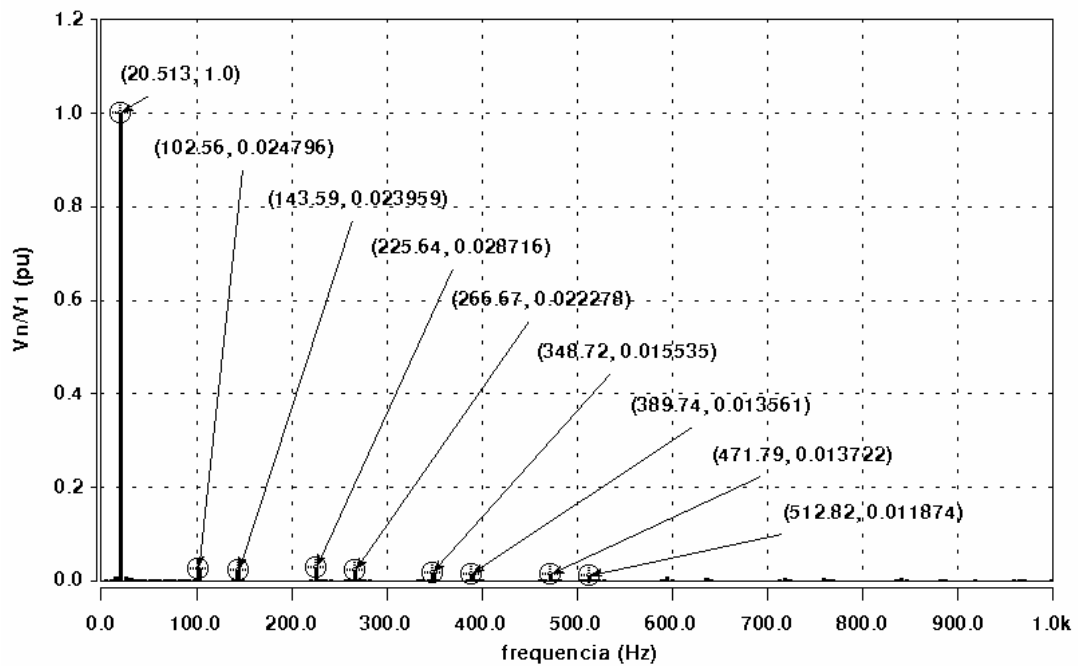


Figura 3.7 – Espectro harmônico de tensão nos terminais do gerador hexafásico.

As correntes de alimentação da carga retificadora, designadas por *abc* e *xyz*, são fornecidas nas figuras 3.8 e 3.9. Constata-se que, semelhantemente às tensões, as formas de onda para as correntes também se encontram bastante distorcidas e obedecem aos padrões clássicos de suprimento de retificadores de 6 pulsos. Objetivando evidenciar a defasagem de 30° entre os dois conjuntos de correntes, a figura 3.10 detalha o desempenho das correntes das linhas *a* e *x*. As correntes se apresentam com um valor eficaz de aproximadamente 125 A.

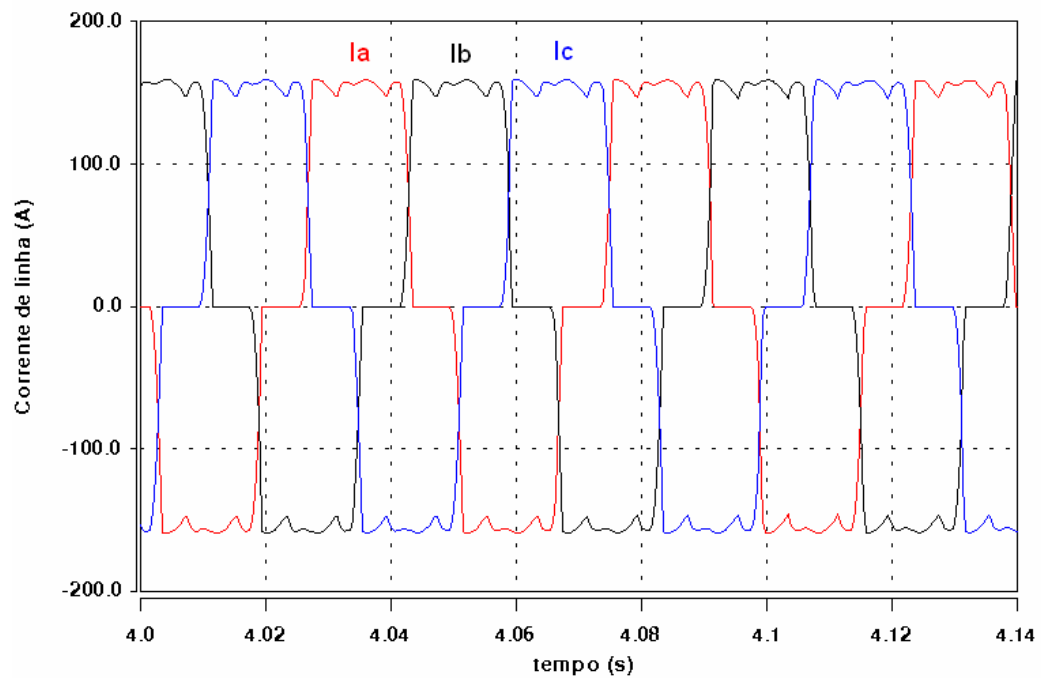


Figura 3.8 – Correntes nas linhas abc do gerador hexafásico.

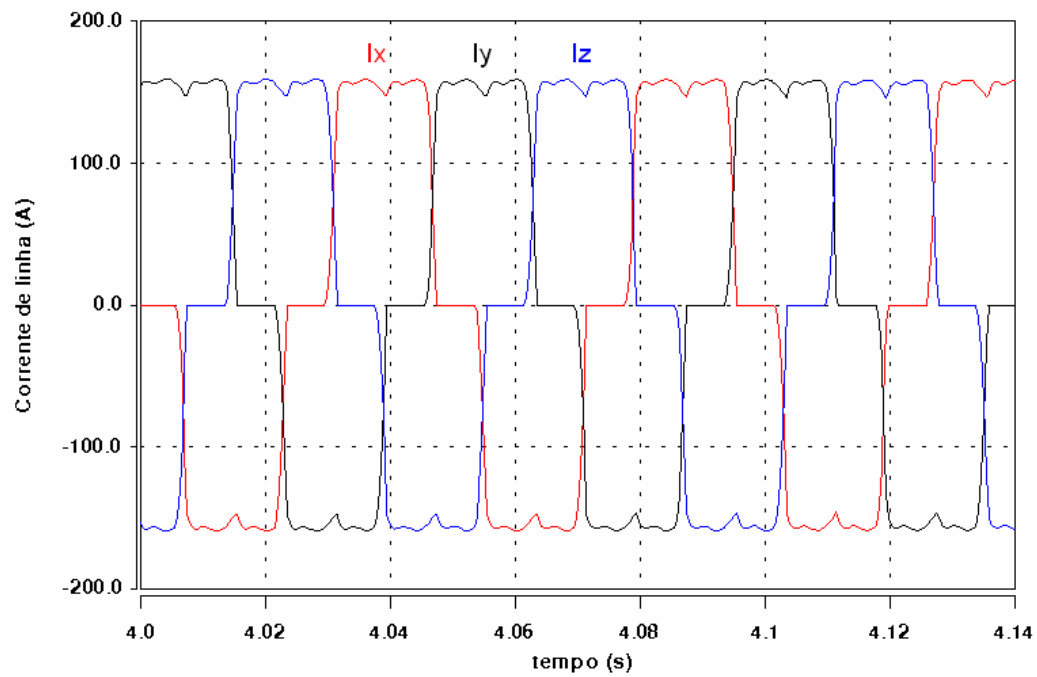


Figura 3.9 – Correntes nas linhas xyz do gerador hexafásico.

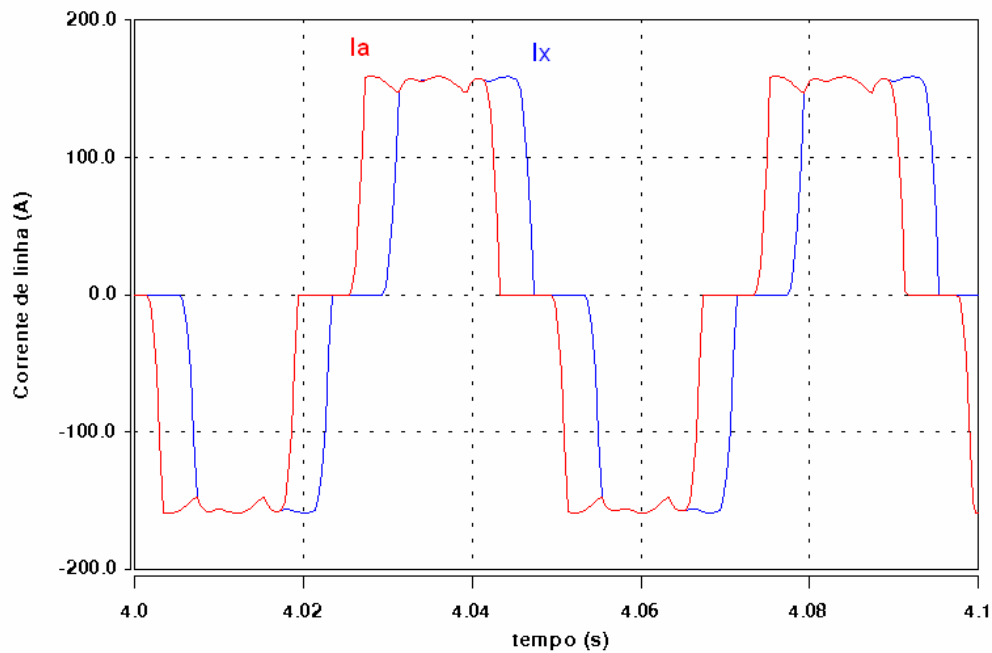


Figura 3.10 – Defasagem de 30° para as correntes.

A figura 3.11 corresponde ao espectro harmônico das correntes apresentadas nas figuras anteriores. O valor aproximado da distorção harmônica total é de 25 %, o que está em consonância com operações típicas de retificadores de 6 pulsos. As componentes individuais também ratificam a operação deste tipo de retificador.

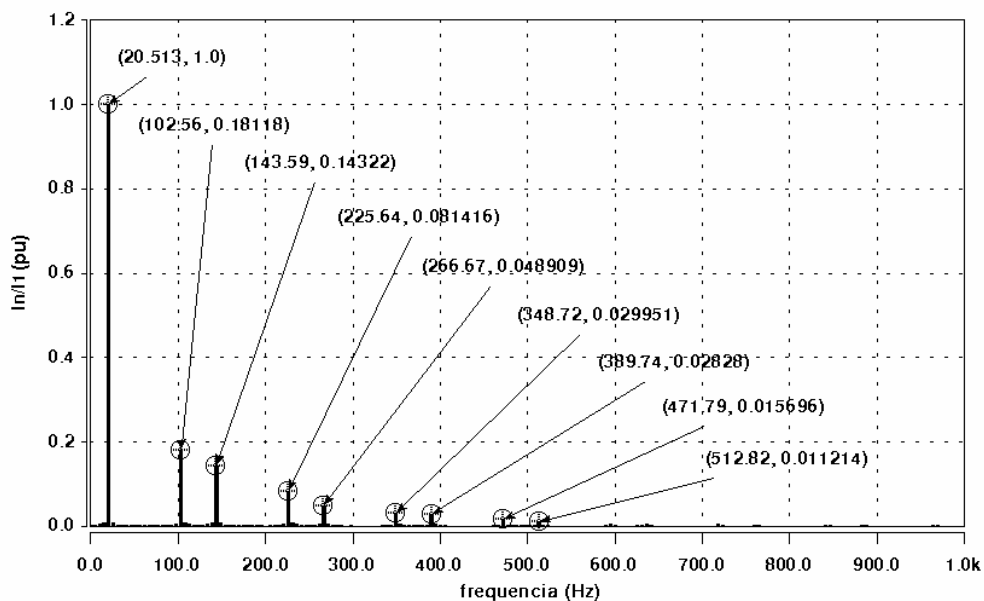


Figura 3.11 – Espectro harmônico para a corrente nos terminais do gerador hexafásico.

Os fluxos magnéticos associados com cada fase são mostrados nas figuras 3.12 e 3.13, para os conjuntos *abc* e *xyz*, respectivamente. Como se constata, suas formas de onda são bastante próximas à forma senoidal, evidenciando pois que, no âmbito interno da máquina, não se manifesta impactos significativos quanto a presença de componentes harmônicos de fluxos.

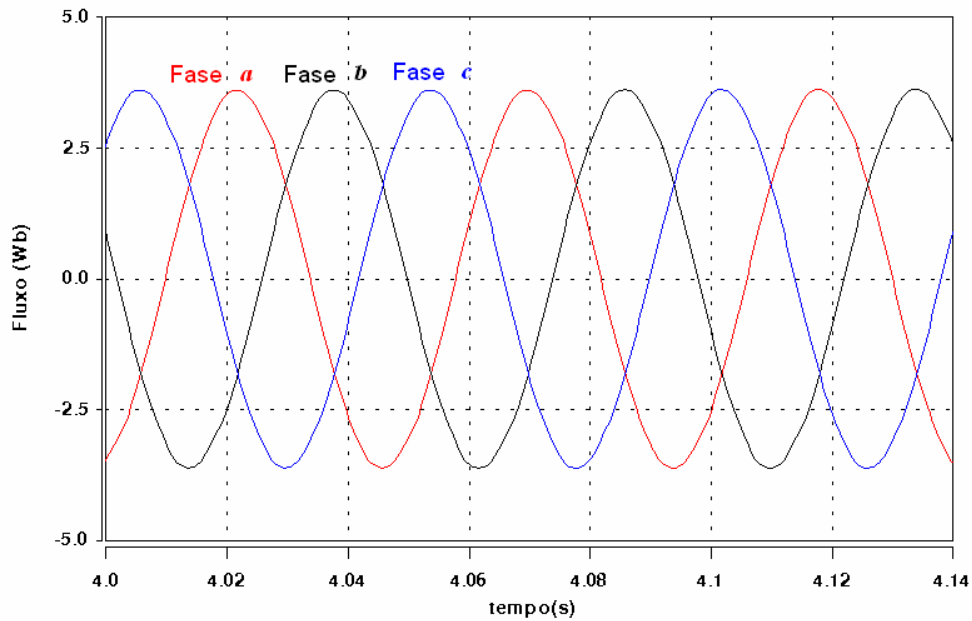


Figura 3.12 – Fluxos para as fases *abc* do gerador hexafásico.

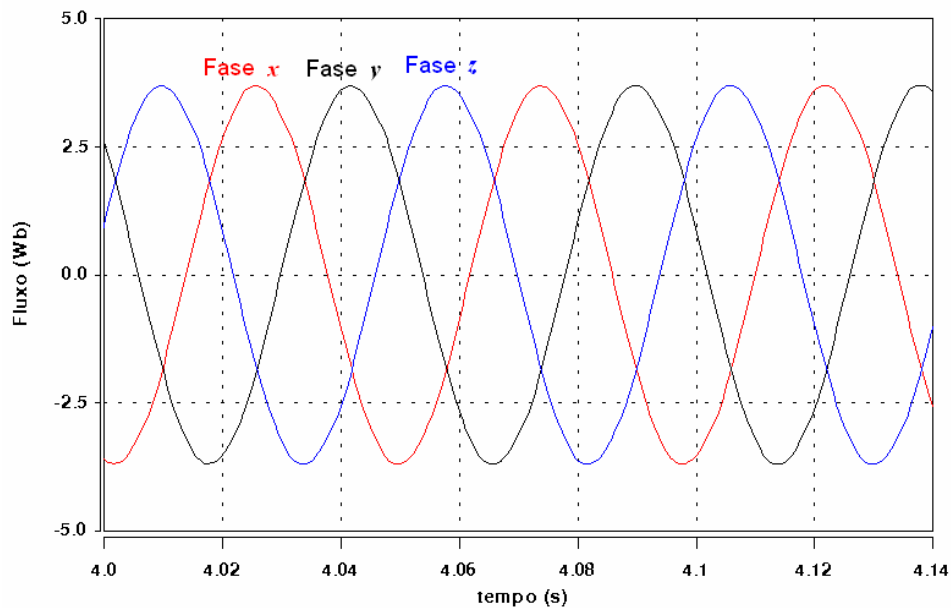


Figura 3.13 – Fluxos para as fases *xyz* do gerador hexafásico.

A figura 3.14 é indicativa do comportamento do conjugado eletromagnético produzido pelo gerador hexafásico e evidencia as oscilações presentes no conjugado. A distorção harmônica total é de 13,5 %.

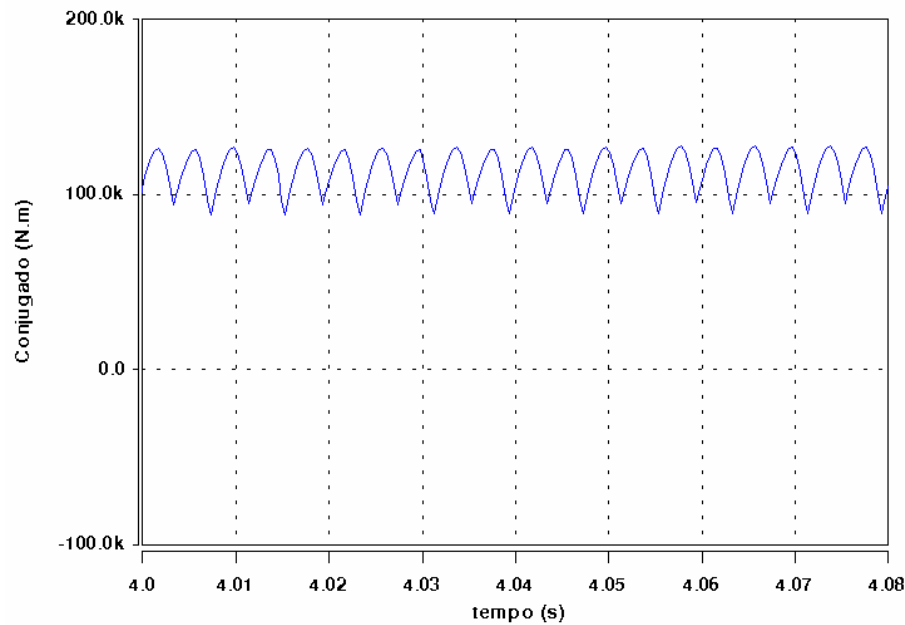


Figura 3.14 – Conjugado eletromagnético produzido pelo gerador hexafásico.

A figura 3.15 corresponde ao espectro de frequências do conjugado eletromagnético. Em vista de princípios bastante conhecidos, a presença de harmônicos de ordem par no conjugado está em concordância com as expectativas. A exemplo do surgimento de uma componente de ordem 6, ressalta-se que esta é produto da interação entre um campo girante associado com a componente de ordem 5 produzida no estator e a velocidade síncrona fundamental do rotor.

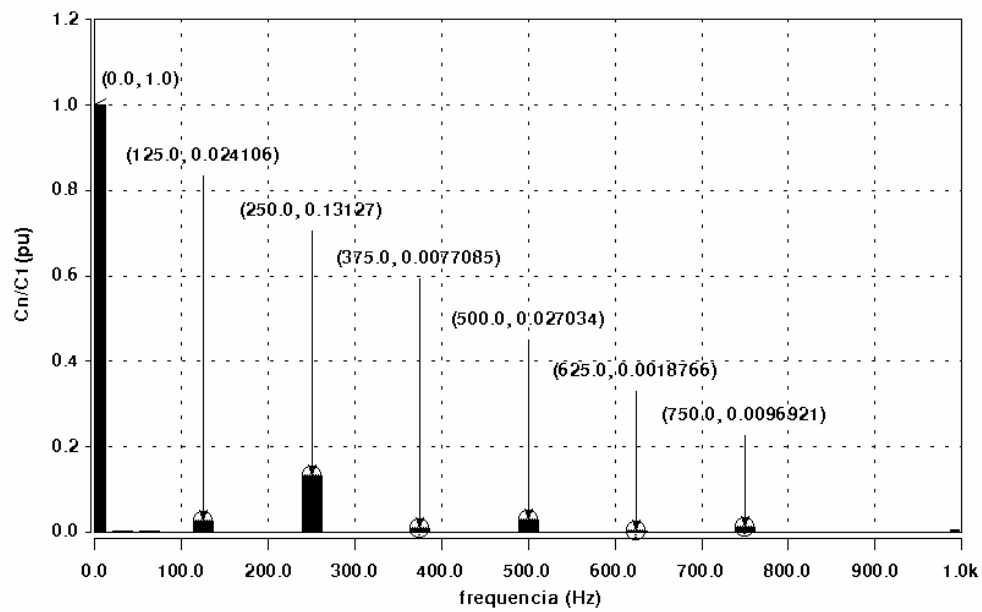


Figura 3.15 – Espectro harmônico do conjugado produzido pelo gerador hexafásico.

A corrente de campo, i_r , no rotor do gerador, pode ser observada na figura 3.16. Novamente, seu comportamento é similar ao do conjugado e a presença das componentes harmônicas pares, como ilustrado na figura 3.17, está relacionada com a mesma justificativa anteriormente apresentada. A distorção total para tal corrente é de aproximadamente 28%.

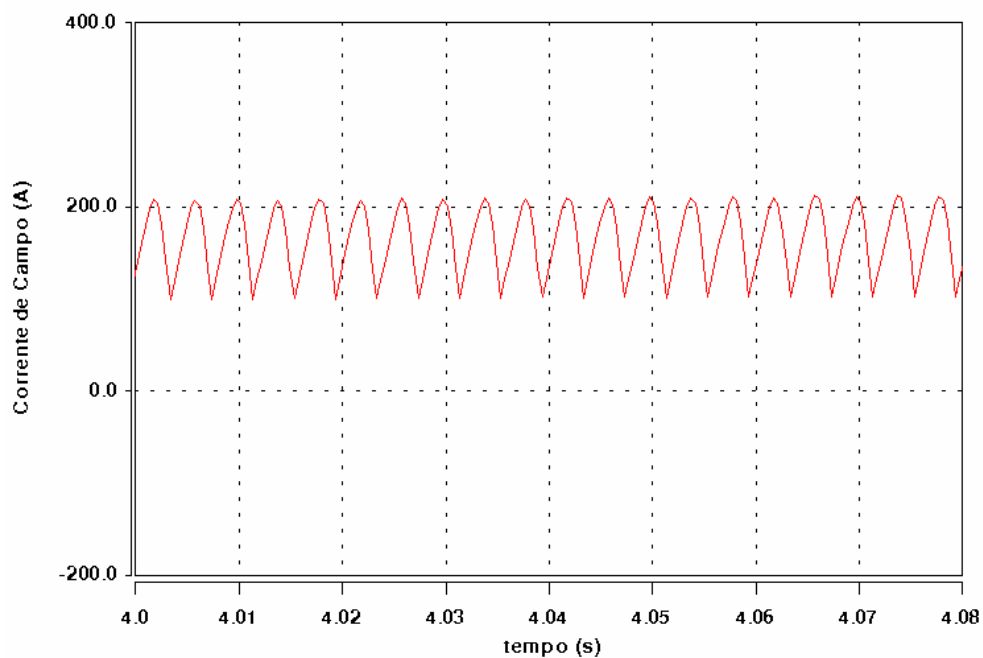


Figura 3.16 – Corrente do campo de excitação do gerador hexafásico.

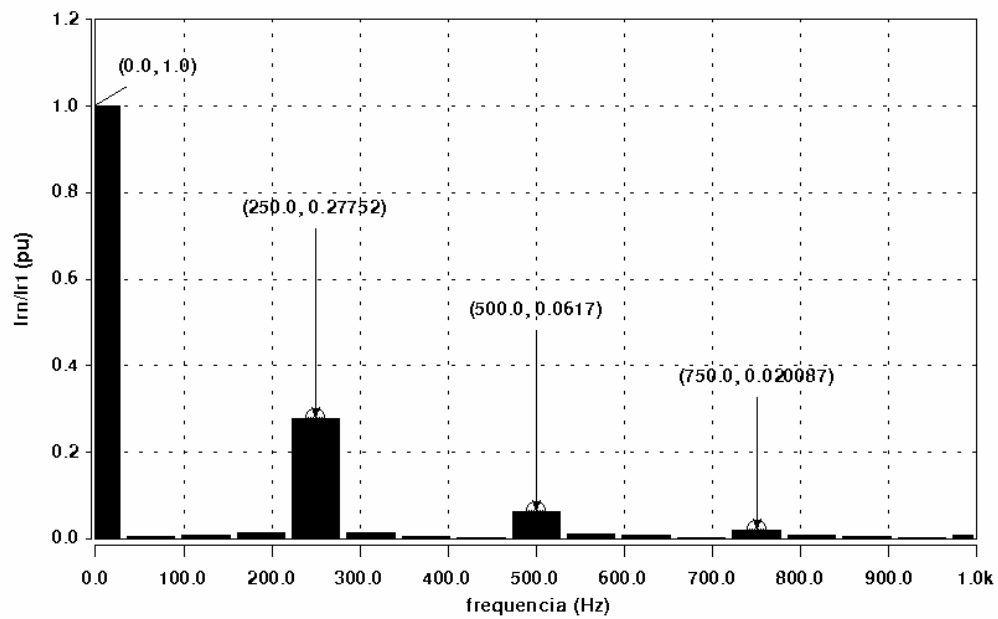


Figura 3.17 – Espectro harmônico da corrente de campo para o gerador hexafásico.

Nas figuras 3.18 e 3.19 são mostradas, respectivamente, a corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto e o seu espectro de frequências. A distorção harmônica total é de aproximadamente 29 %. Também, é conhecido que tal corrente, sob condições ideais, deveria ser nula, todavia, devido às formas de onda não senoidais presentes no processo, em especial as correntes estatóricas, tal não ocorre. Isto evidencia um dos problemas operacionais para as máquinas geradoras associadas com sistemas eólicos.

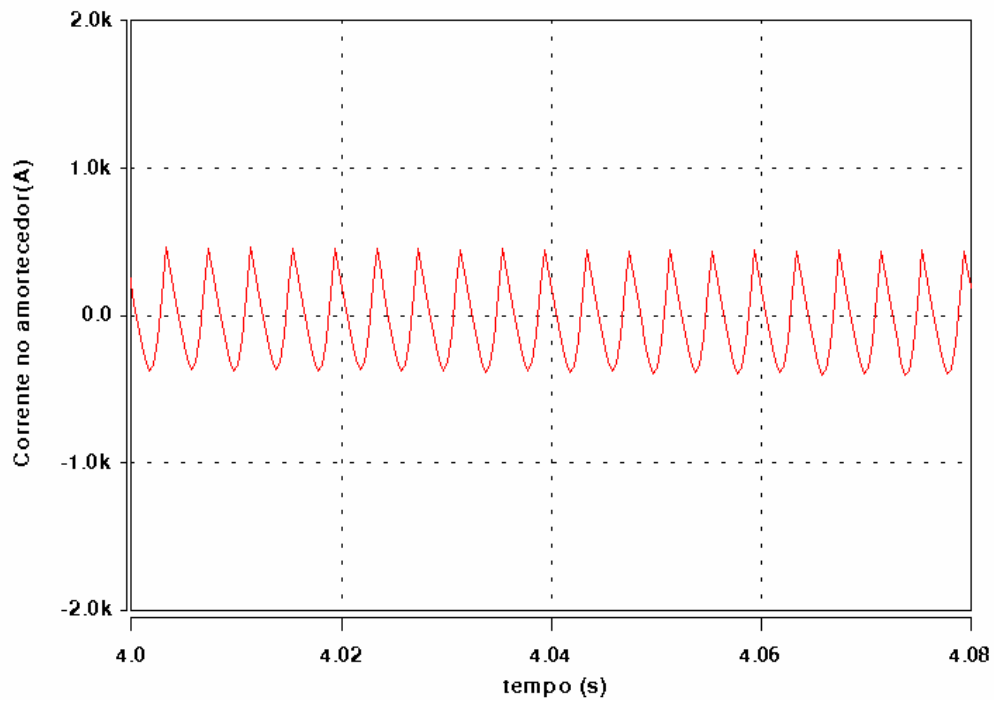


Figura 3.18 – Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador hexafásico.

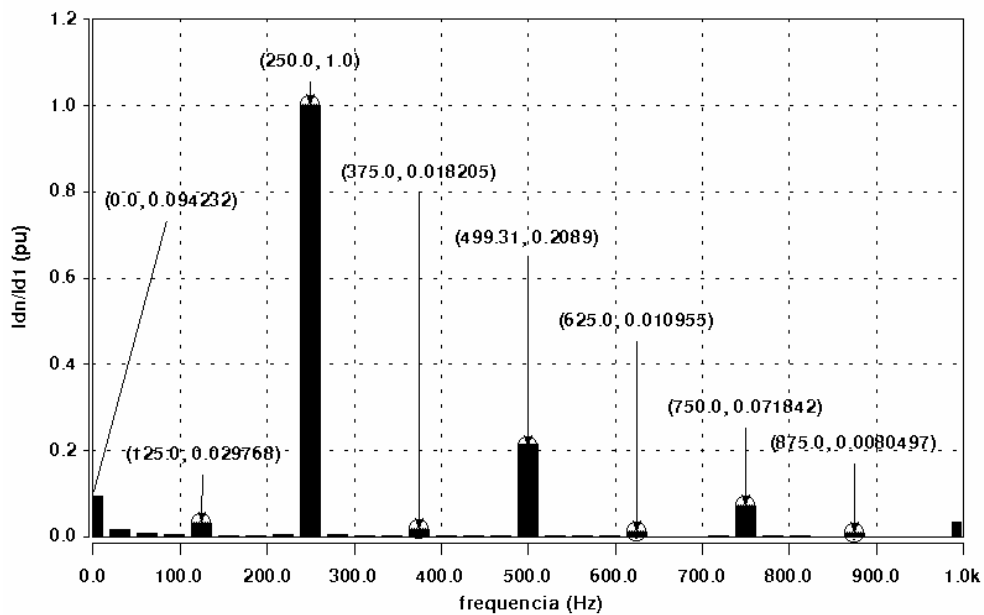


Figura 3.19 – Espectro harmônico corrente do enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador hexafásico.

A tensão contínua na saída do retificador é ilustrada na figura 3.20. O seu valor eficaz é de 1564,3 V e, de acordo com as informações da figura 3.21, a sua distorção harmônica total está em torno de 3%.

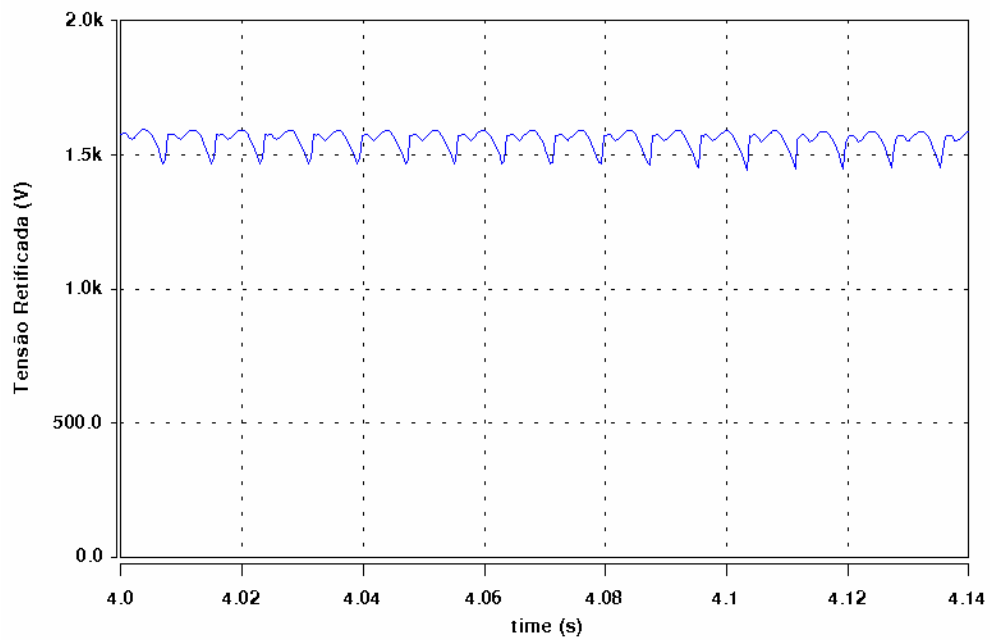


Figura 3.20 – Tensão retificada para o sistema hexafásico.

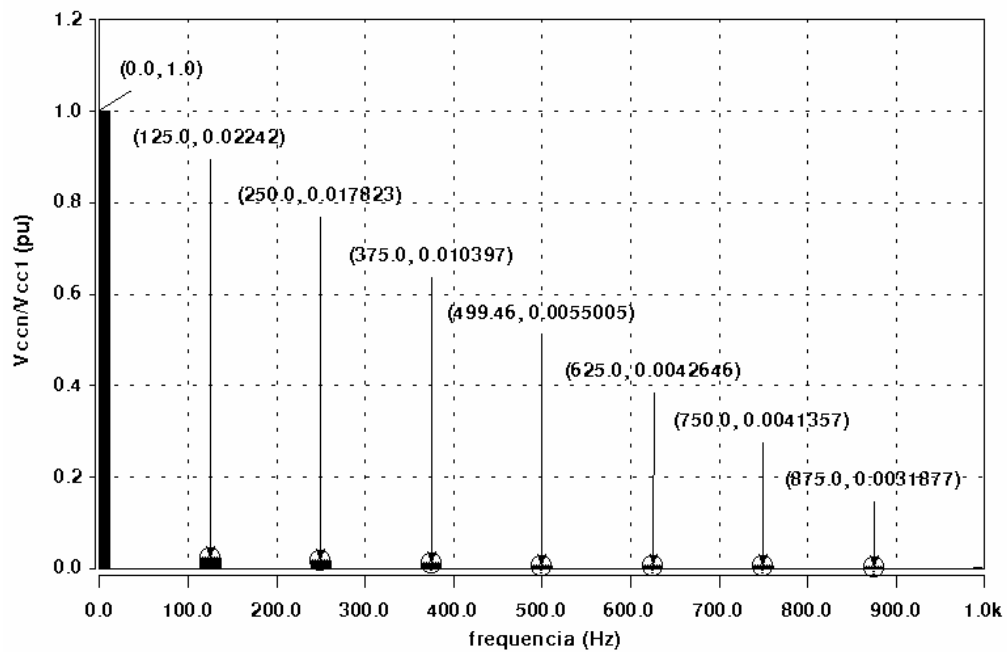


Figura 3.21 – Espectro harmônico da tensão retificada para o sistema hexafásico.

A corrente na saída do retificador, bem como o seu espectro harmônico, encontram-se ilustrados nas figuras 3.22 e 3.23, respectivamente. O valor médio da corrente é de aproximadamente 155 A, e a distorção harmônica total de 2,85%.

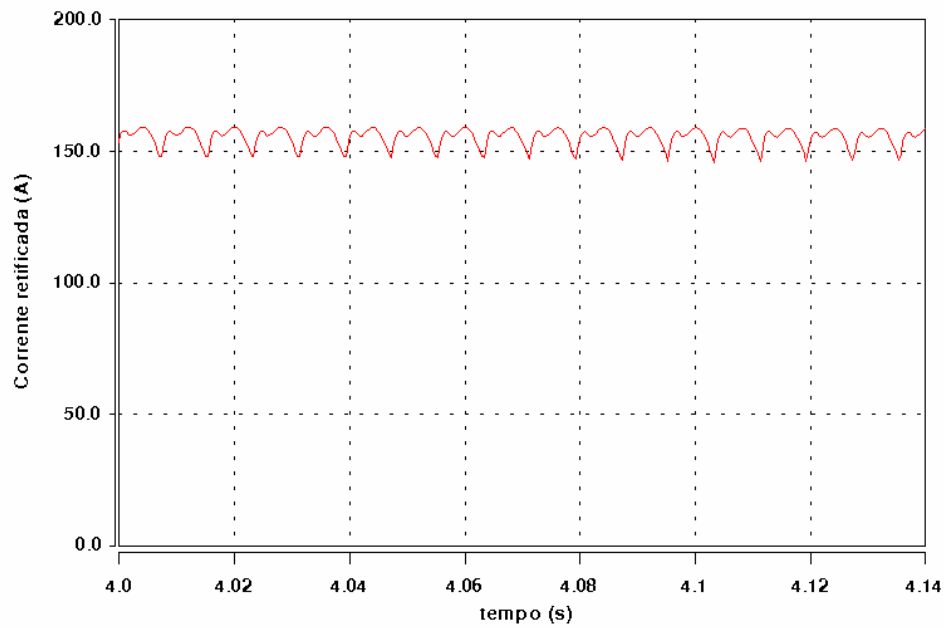


Figura 3.22 – Corrente retificada para o sistema hexafásico.

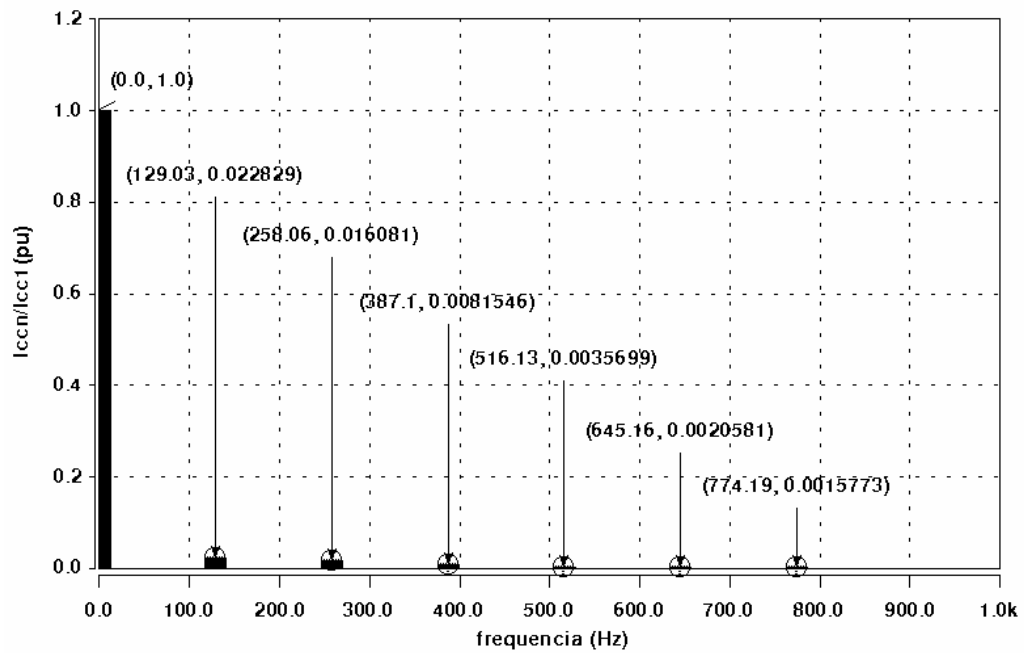


Figura 3.23 – Espectro harmônico da corrente retificada para o sistema hexafásico.

3.6 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR TRIFÁSICO CONVENCIONAL

Dentro das mesmas condições postuladas para os estudos conduzidos para o gerador hexafásico, procede-se, na sequência, aos estudos investigativos do desempenho da máquina trifásica convencional.

Neste contexto, a figura 3.24 mostra, inicialmente as formas de onda das tensões de linha nos terminais do gerador trifásico.

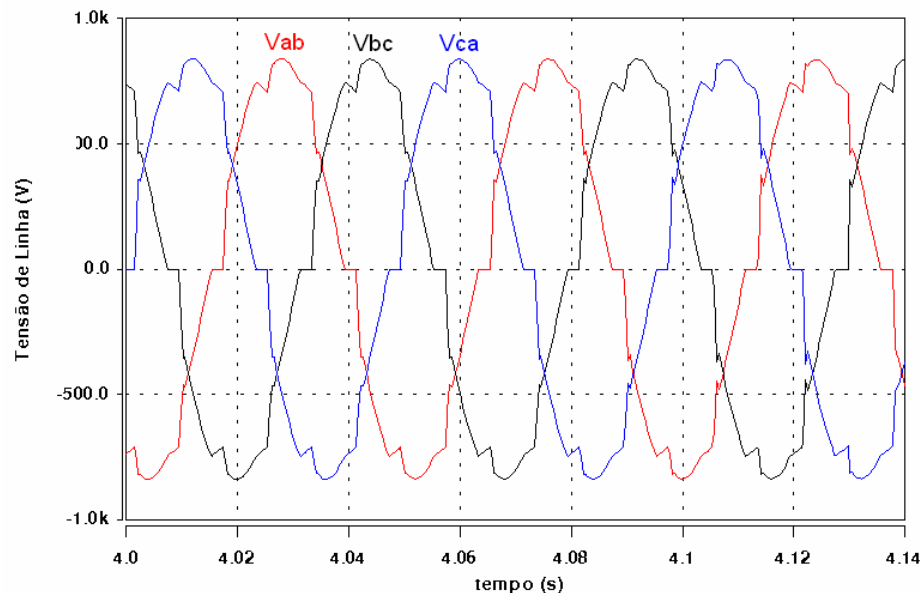


Figura 3.24 – Tensões trifásicas nos terminais de saída do gerador trifásico.

A figura mostra o formato não senoidal das tensões, o que se deve, como já comentado, pelo suprimento de uma carga não linear, no caso, uma unidade retificadora de 6 pulsos. É importante ressaltar neste ponto que, para o presente caso, o retificador de 12 pulsos suprido pelo gerador especial foi, nesta fase, substituído pela mencionada unidade de 6 pulsos. Isto, como se sabe, não modifica em nada as componentes harmônicas individuais de cada ponte, porém, no contexto global da operação da máquina, há de se observar expressas

diferenças. O valor eficaz das tensões de linha é de 586 V, portanto, praticamente, o mesmo nível anterior.

Na figura 3.25 encontra-se o respectivo histograma das componentes harmônicas de tensão, nota-se a presença de componentes individuais de ordem $6k \pm 1$. A distorção total possui valor de 8,42%.

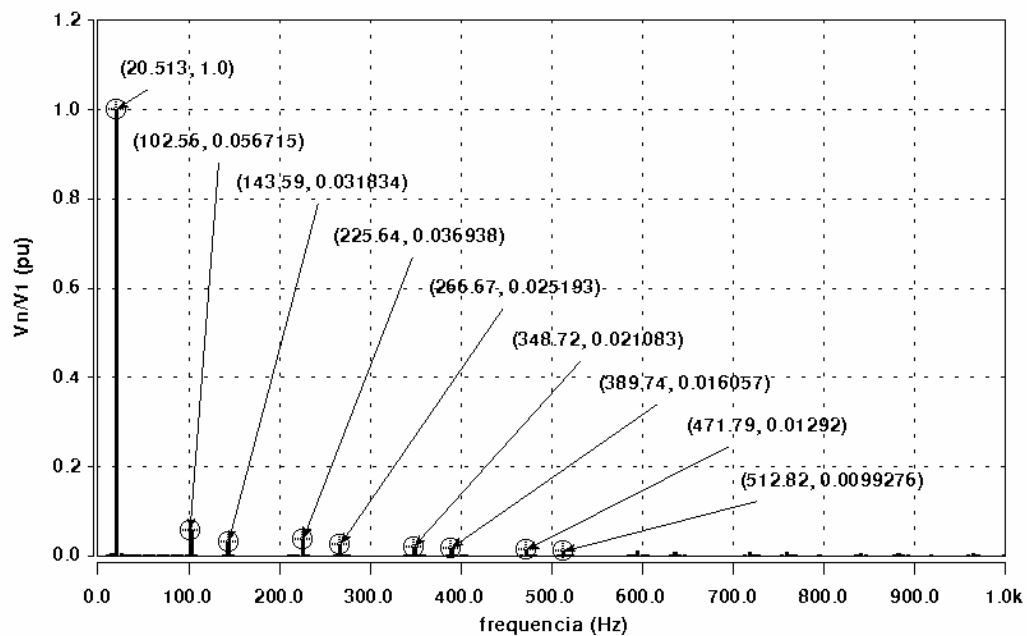


Figura 3.25 – Espectro harmônico de tensão nos terminais do gerador trifásico.

As correntes de linha nos terminais do gerador podem ser vistas na figura 3.26. Constata-se que, semelhantemente às tensões, as formas de onda para as correntes também encontram-se distorcidas, efeito este, como amplamente conhecido, deve-se à carga retificadora alimentada. O valor eficaz destas correntes é aproximadamente 255 A.

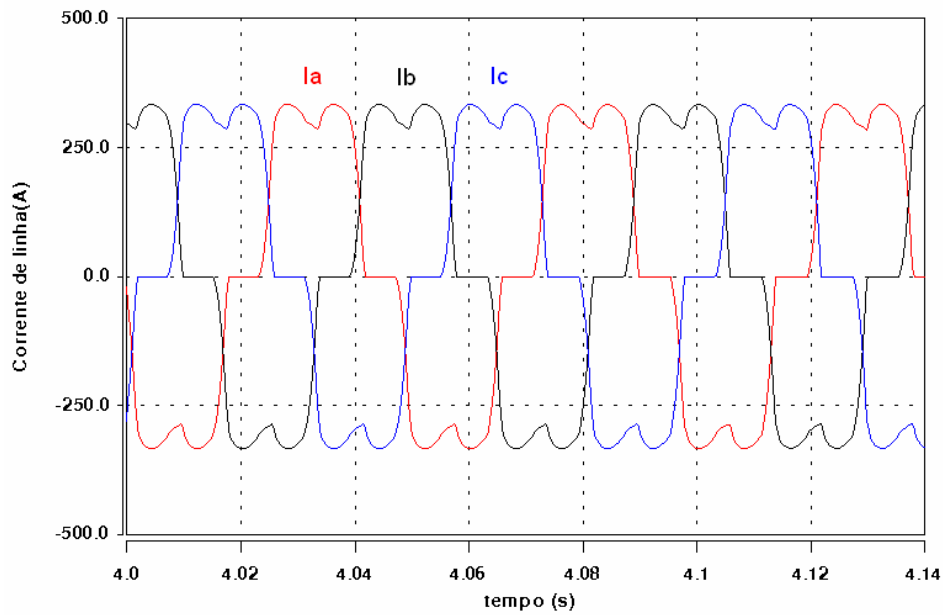


Figura 3.26 – Correntes nos terminais do gerador trifásico.

Na figura 3.27 estão representadas as componentes harmônicas individuais para as correntes de linha, o valor da distorção harmônica total calculada a partir deste espectro de corrente é da ordem de 25%. Este nível de distorção e as frequências harmônicas individuais estão em consonância com as expectativas para tal tipo de carga.

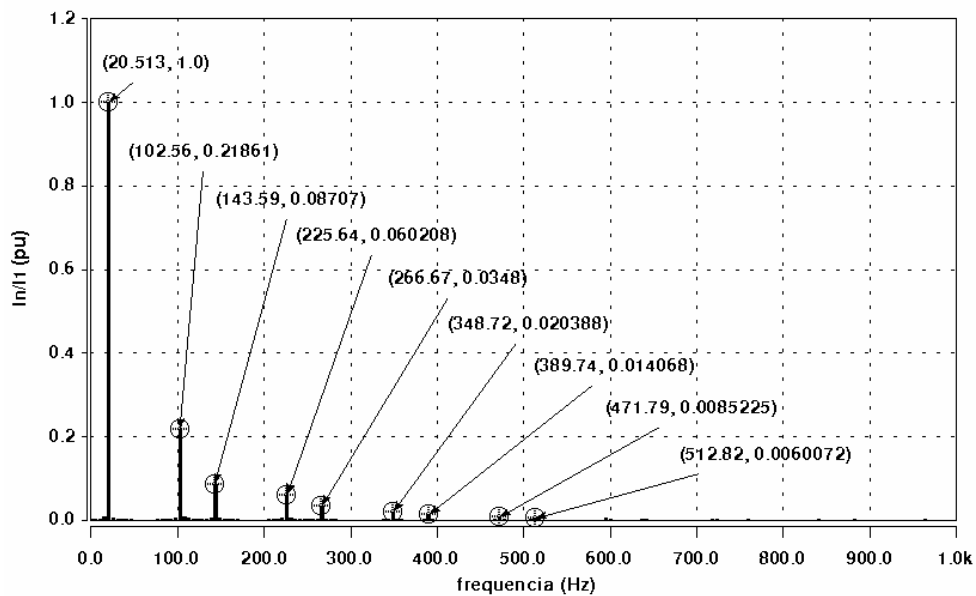


Figura 3.27 – Espectro harmônico da corrente nos terminais do gerador trifásico.

Os fluxos para as fases a , b e c da máquina síncrona trifásica são mostrados na figura 3.28. Novamente fica constatada a característica senoidal dos fluxos no interior da máquina, assim como ocorrido anteriormente para o caso hexafásico.

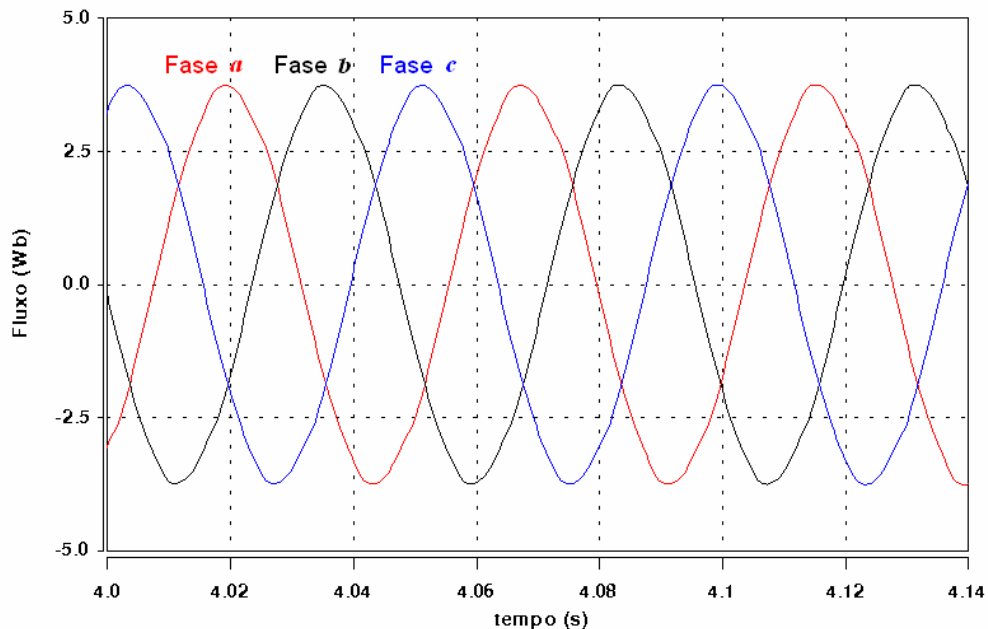


Figura 3.28 – Fluxos nas fases do gerador trifásico.

A figura 3.29 destaca o comportamento do conjugado eletromagnético produzido pelo gerador síncrono trifásico. As oscilações presentes no mesmo são mais uma vez notórias, porém, distintamente da situação anterior, a componente de ordem 6 se mostra dominante. Para o caso do gerador hexafásico, a predominância observada estava centrada na componentes de ordem 12.

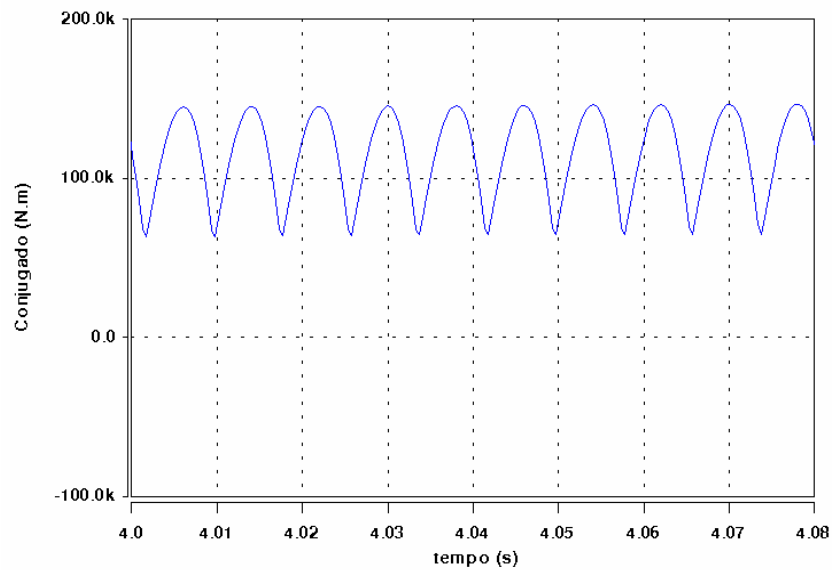


Figura 3.29 – Conjugado eletromagnético produzido pelo gerador trifásico.

O espectro das frequências para o conjugado, ilustrado na figura 3.30, revela a presença de harmônicos de ordem par, o que, como comentado para o caso do gerador hexafásico, seria esperado. O valor da distorção total é de aproximadamente 33 %.

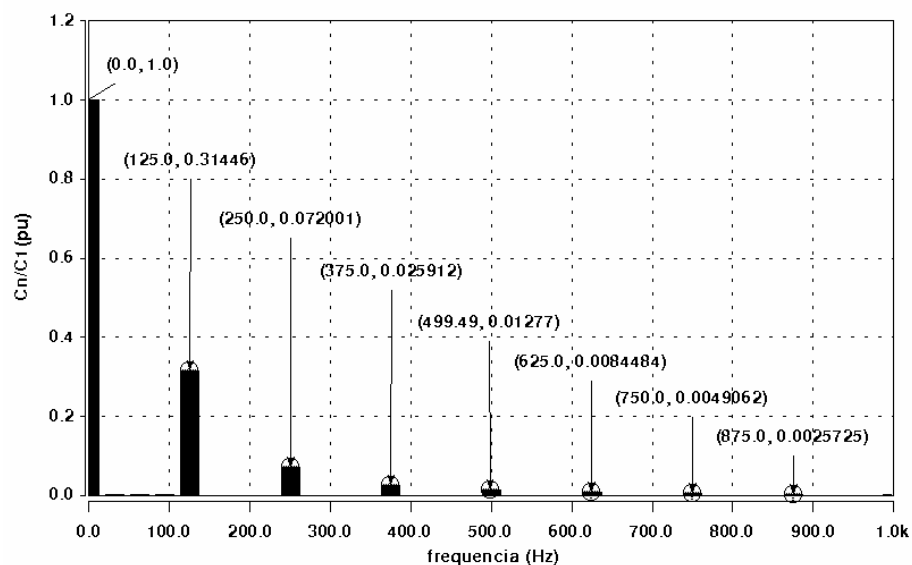


Figura 3.30 – Espectro harmônico do conjugado produzido pelo gerador trifásico.

A corrente de campo e seu espectro de frequências encontram-se nas figuras 3.31 e 3.32, respectivamente. Observa-se um forte caráter oscilatório da corrente e, novamente,

como ocorrido para o conjugado, componentes harmônicas de ordem par estão presentes. Estas se devem ao já mencionado fenômeno iterativo entre uma componente de ordem ímpar no estator e a velocidade síncrona fundamental da máquina. A distorção harmônica total apresentada é de aproximadamente 68%.

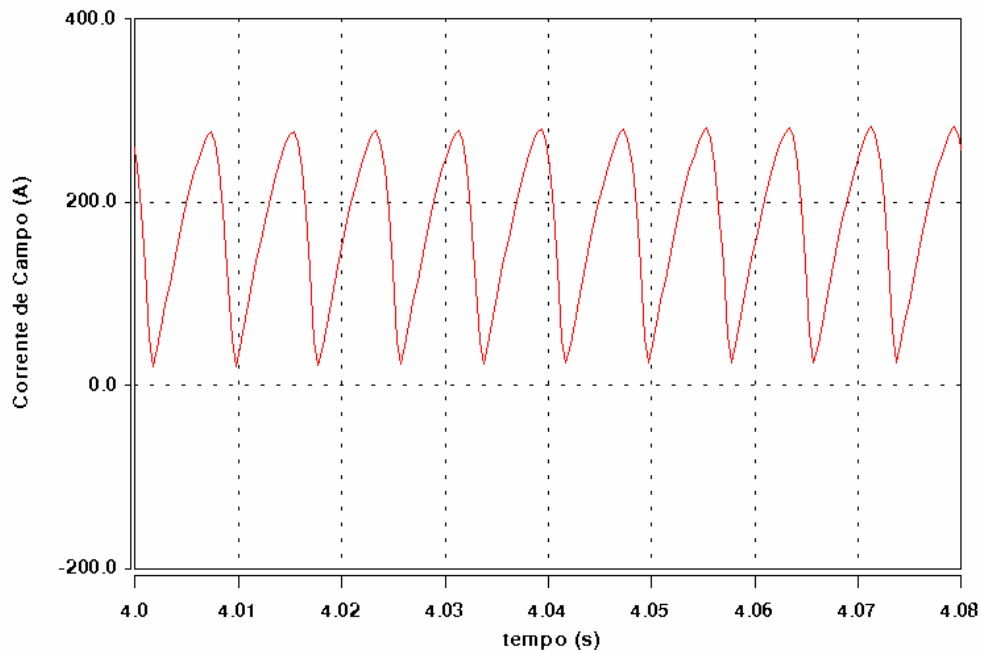


Figura 3.31 – Corrente no enrolamento de campo do gerador trifásico.

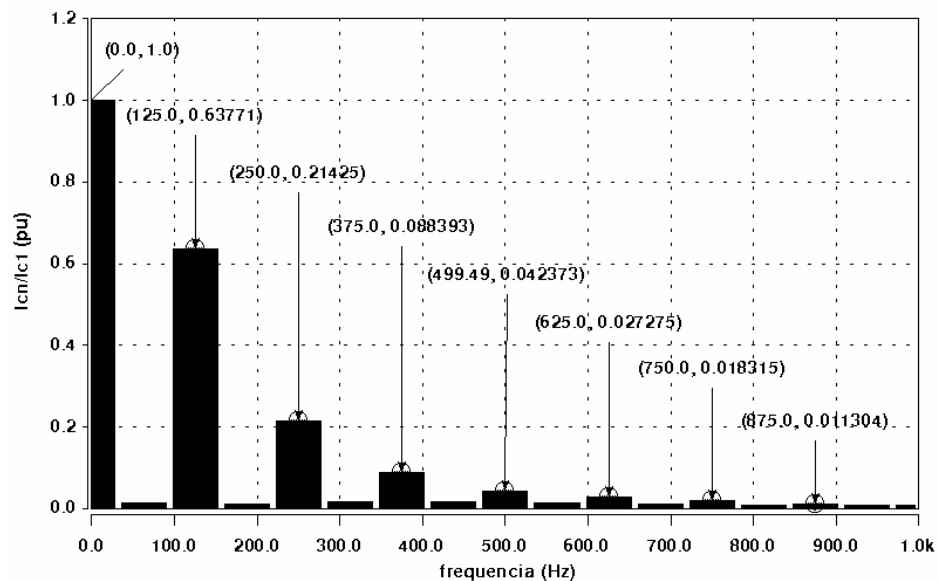


Figura 3.32 – Espectro harmônico da corrente de campo do gerador trifásico.

Encontram-se ilustrados nas figuras 3.33 e 3.34, a corrente do enrolamento amortecedor de eixo direto e o seu espectro de frequências. Como já destacado, sob condições ideais de operação, esta corrente deveria ser nula, porém isto não ocorre devido à influência, sobretudo, das correntes estatóricas não senoidais envolvidas no processo. O valor encontrado para a distorção harmônica total é da ordem de 35 %.

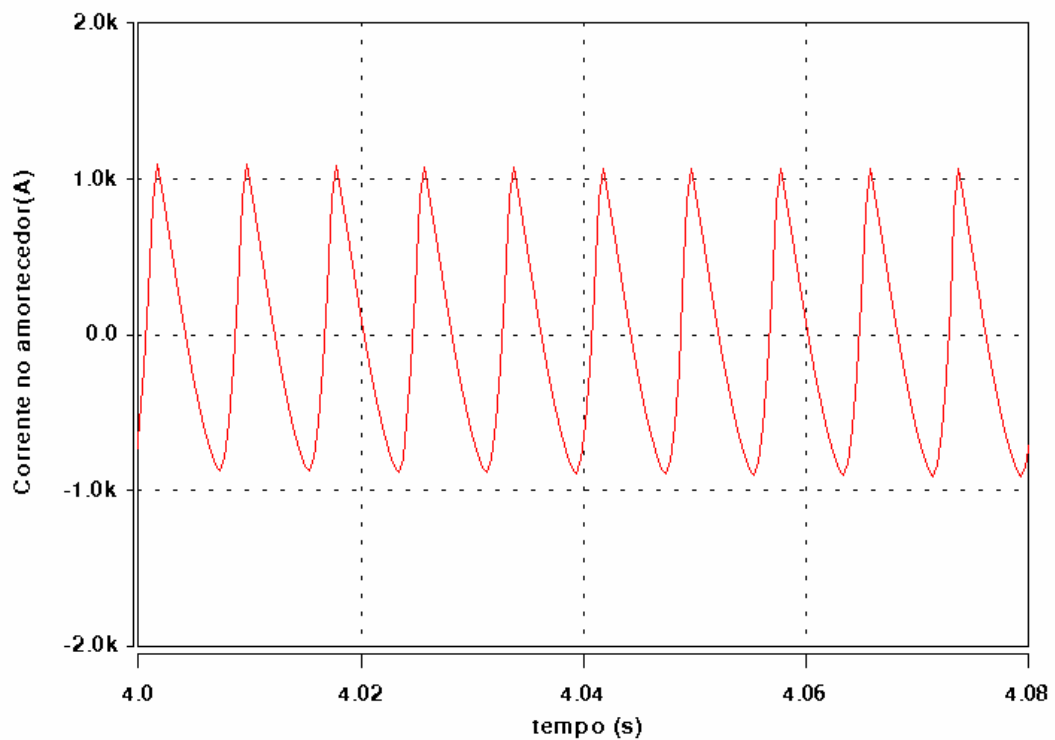


Figura 3.33 – Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador trifásico.

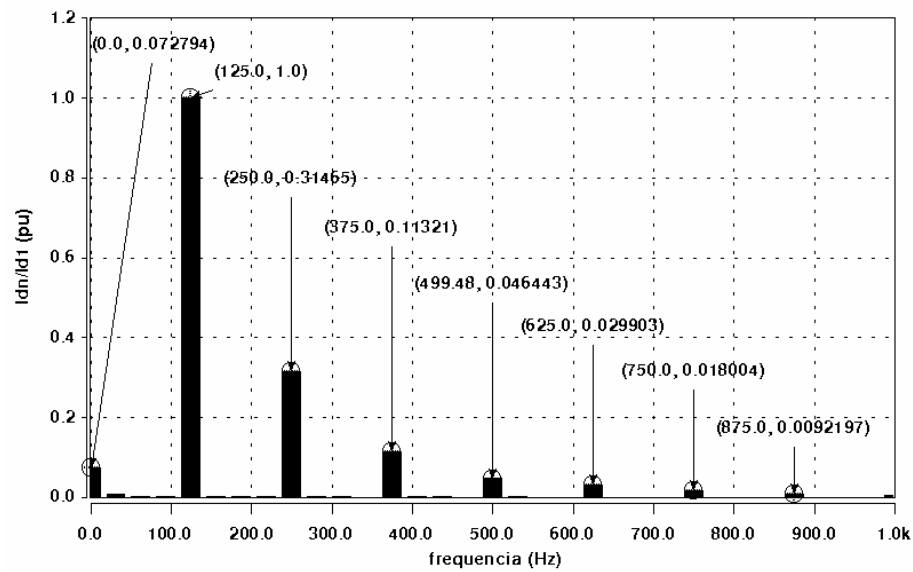


Figura 3.34 – Espectro harmônico da corrente do enrolamento amortecedor de eixo direto do gerador trifásico.

A figura 3.35 ilustra a forma de onda da tensão retificada nos terminais CC do retificador. Esta possui um valor eficaz de 784 V. Como é de se esperar, componentes de ordem par são observadas no espectro de frequências, tal fato está atrelado com as propriedades operacionais dos retificadores de 6 pulsos. A distorção harmônica total é aproximadamente de 8%.

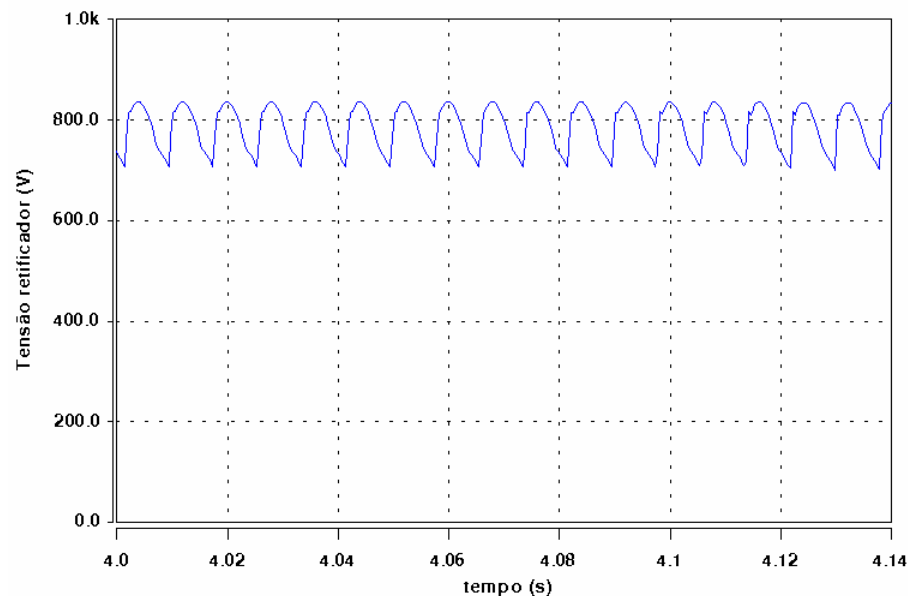


Figura 3.35 – Tensão retificada para o sistema trifásico.

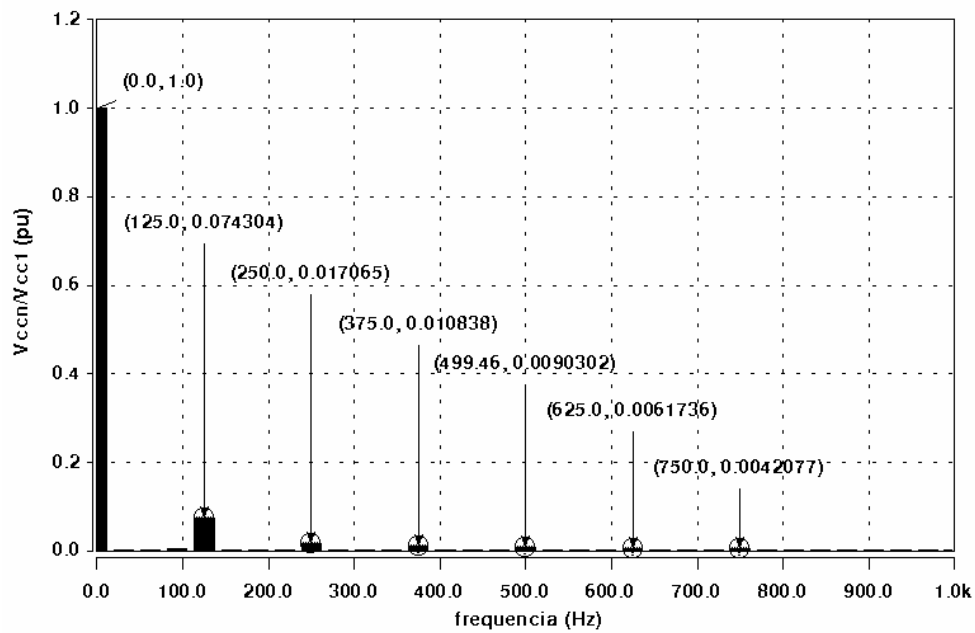


Figura 3.36 – Espectro harmônico da tensão retificada para o sistema trifásico.

A corrente contínua obtida na saída do retificador é mostrada na figura 3.37. Esta apresenta um valor médio de 313,5 A. Como ocorrido para a tensão retificada, a corrente também apresenta componentes harmônicas de mesma ordem, conforme destacado na figura 3.38. A distorção harmônica total calculada é de 7,26%.

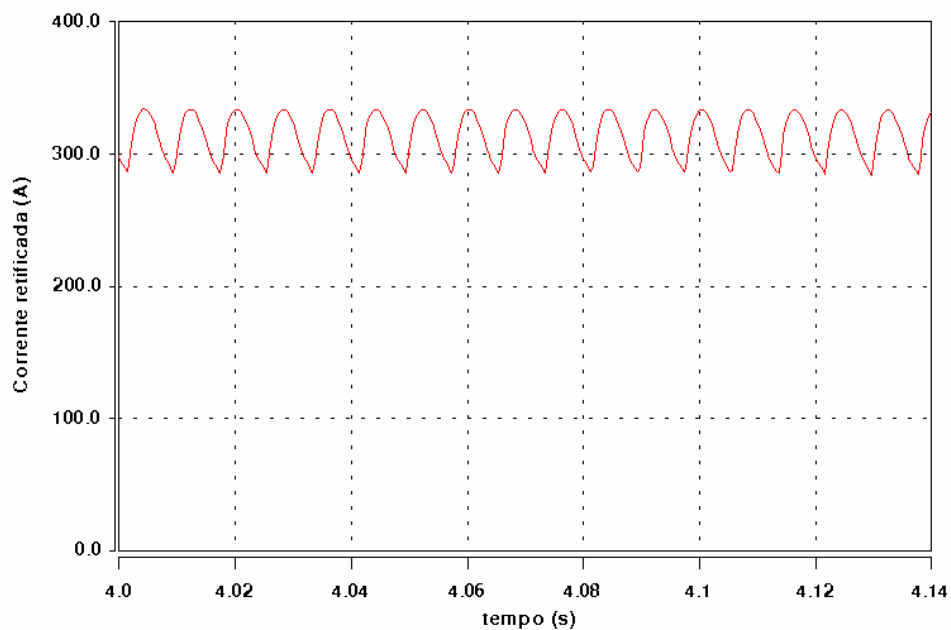


Figura 3.37 – Corrente retificada para o sistema trifásico.

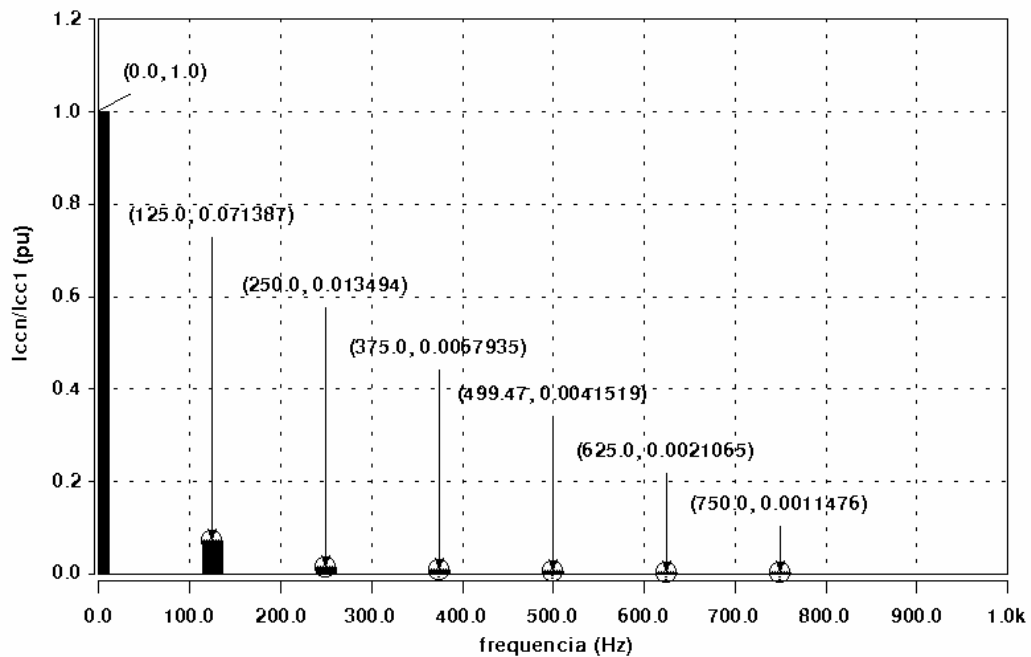


Figura 3.38 – Espectro harmônico da corrente retificada para o sistema trifásico.

3.7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Esta etapa contempla a comparação entre os resultados obtidos por meio dos estudos computacionais realizados nas seções anteriores.

A estratégia utilizada para a apresentação e discussão dos resultados obedece a seguinte lógica:

- Para a avaliação comparativa dos valores de tensão e correntes nas saídas dos geradores, sempre será feita uma correlação entre as grandezas das fases *abc* do gerador trifásico e as correspondentes grandezas das fases *abc* do gerador hexafásico. O motivo disto está no fato que os desempenhos dos conjuntos de enrolamentos *abc* e *xyz*, como destacado anteriormente, são bastante semelhantes, diferindo apenas pela defasagem de 30°;

- Nas figuras serão utilizados os índices (6 Φ) e (3 Φ) para diferenciar as formas de onda dos geradores hexafásico e convencional (trifásico), respectivamente;
- As formas de onda correlatas serão apresentadas num único gráfico para uma melhor visualização das mesmas.

A figura 3.39 mostra, em detalhes, as tensões nos terminais de cada um dos geradores estudados. Observa-se que apenas as tensões entre as fases a e b, para ambas as máquinas, são inseridas no gráfico. O valor da distorção harmônica total de tensão de linha do gerador hexafásico foi menor do que para a máquina convencional. O valor de 8,43% (convencional) foi reduzido para 5,6% (hexafásica).

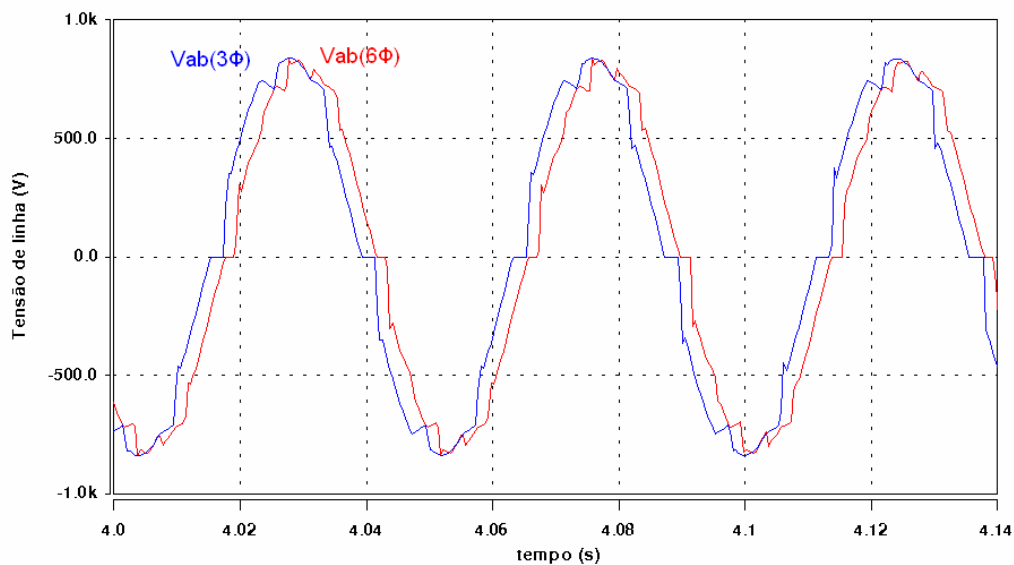


Figura 3.39 – Tensão de linha para os dois sistemas.

A figura 3.40 ilustra as correntes de linha fornecidas por cada uma das máquinas focadas no estudo. Um dos pontos meritórios de destaque está na amplitude das correntes, pois para o caso do gerador hexafásico constata-se que a corrente se apresenta com 50% do outro gerador. Isto é uma consequência direta do fato que a máquina especial possui dois enrolamentos supridores por fase, portanto, a correspondente corrente total encontra-se

dividida por 2. Os respectivos conteúdos harmônicos são praticamente os mesmos para ambas, o que seria esperado pois ambas estão relacionados com o suprimento de retificadores de 6 pulsos.

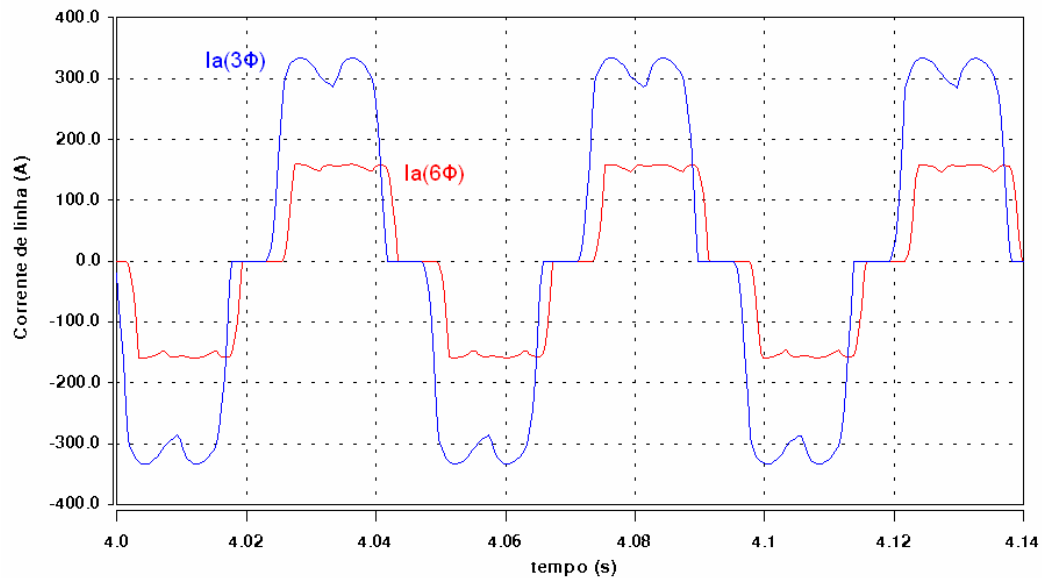


Figura 3.40 – Corrente de linha para os dois sistemas.

Os fluxos magnéticos associados com cada fase, indicados na figura 3.41, são também bastante semelhantes para ambos geradores e não apresentam distorções apreciáveis.

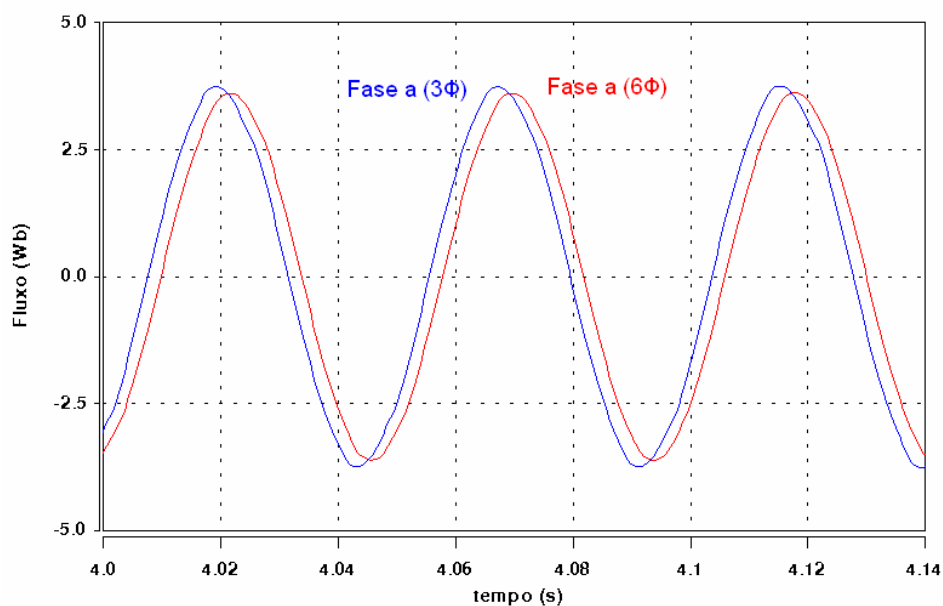


Figura 3.41 – Fluxo magnético na fase *a* para os dois sistemas.

A figura 3.42 é indicativa do comportamento conjugado eletromagnético produzido por cada um dos geradores. Fica evidente pela figura, a redução obtida na amplitude de oscilação pela utilização da configuração hexafásica. O valor da distorção harmônica total também foi reduzido consideravelmente. Constata-se que a distorção total para a máquina hexafásica é de cerca de 40% do valor encontrado para a convencional. A componente harmônica decisiva para a redução corresponde a eliminação daquela de ordem 6.

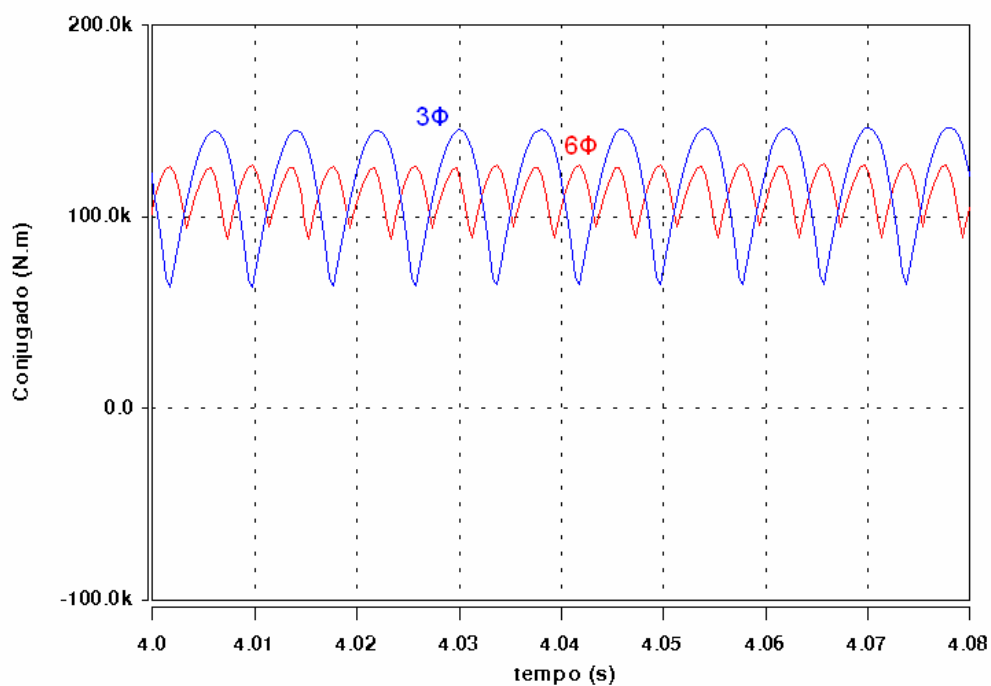


Figura 3.42 – Conjugado produzido pelos geradores: trifásico e hexafásico.

Comparando as formas de onda obtidas para as correntes de campo de cada máquina, nota-se, também, grandes reduções das oscilações presentes quando do emprego da geração hexafásica. A figura 3.43 destaca este fato e permite concluir que a distorção harmônica total foi reduzida para cerca de 40% do valor encontrado para a máquina trifásica convencional.

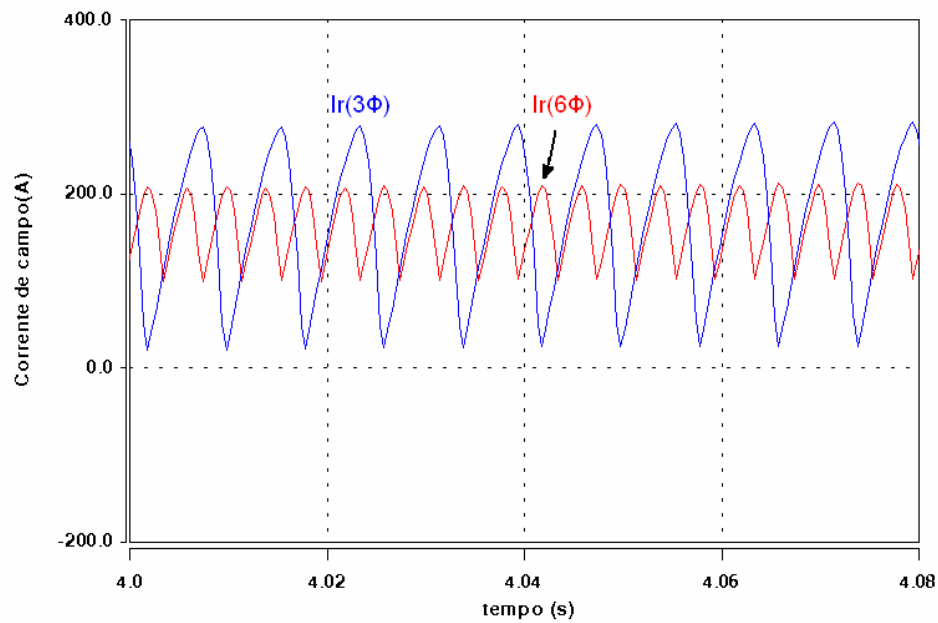


Figura 3.43 – Corrente do campo de excitação para os dois sistemas.

Somado às propriedades positivas anteriormente observadas, vale ainda ressaltar que o emprego da geração hexafásica traz expressivos ganhos quanto à redução das correntes que se manifestam no enrolamento amortecedor. Neste particular a figura 3.44 permite uma pronta comparação entre as situações encontradas com um e outro gerador. Conforme já mencionado, sob condições ideais de funcionamento esta corrente deveria ser nula, entretanto, devido a características não senoidais envolvidas no processo, tal situação não se manifesta. Contudo, o arranjo hexafásico possibilitou a redução de cerca de 60% no valor eficaz dessa corrente, amenizando os problemas associados à circulação indevida da mesma, para este tipo de aplicação.

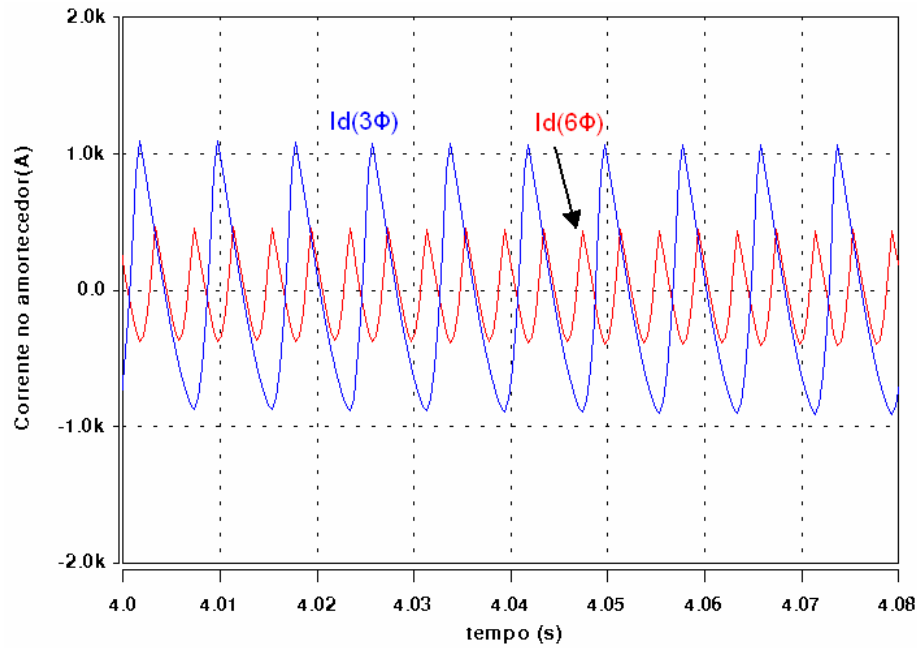


Figura 3.44 – Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto para os dois sistemas.

Uma outra importante característica apontada associada com o emprego do arranjo hexafásico e utilização de uma unidade retificadora de 12 pulsos está na possibilidade de se dobrar o valor da tensão retificada, sem a necessidade do uso de uma máquina de classe de tensão superior. Ainda somando aos aspectos positivos, fica também reconhecido que, o emprego de retificadores de 12 pulso conduz a uma tensão CC com menor nível de distorção. Estas propriedades podem ser facilmente vistas na figura 3.45.

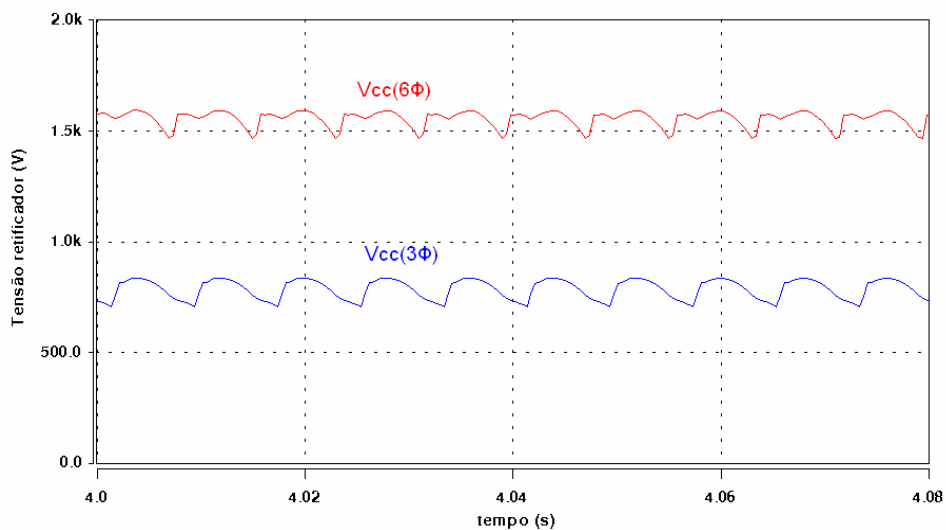


Figura 3.45 – Tensão retificada para os dois sistemas.

A corrente contínua obtida na saída do retificador também sofre melhorias com a utilização do sistema hexafásico, conforme evidencia a figura 3.46. Esta passa a apresentar uma forma de onda com menor conteúdo harmônico, sendo que a distorção total de corrente foi reduzida em cerca de 60%. Quanto ao nível da corrente, este se apresenta com 50% do valor relacionado com o gerador convencional, porém, como já observado, a tensão CC é dobrada para a máquina hexafásica.

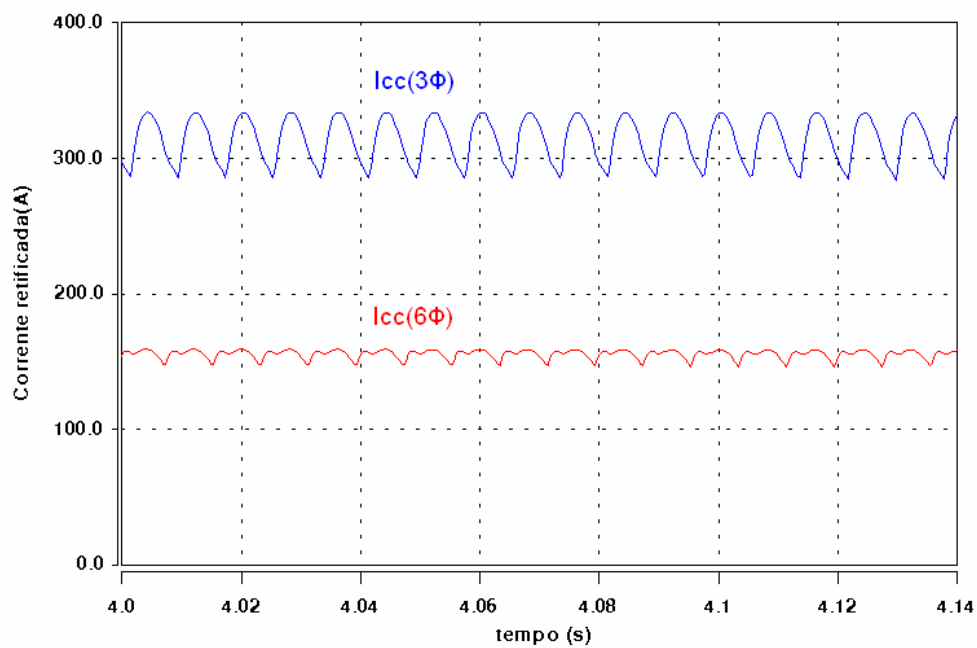


Figura 3.46 – Corrente retificada para os dois sistemas.

3.8 – SÍNTESE DOS RESULTADOS

Uma vez visualizado e comentado diversos aspectos relacionados com as principais grandezas que expressam a operação dos geradores, realiza-se, na sequência, uma síntese dos principais resultados, focando, de modo especial, os valores das mesmas.

Tabela 3.8 – Síntese comparativa entre os resultados obtidos para as duas máquinas

Grandeza	Gerador Hexafásico		Gerador Trifásico	
	Valor Eficaz	Distorção Harmônica Total [%]	Valor Eficaz	Distorção Harmônica Total [%]
Tensão de linha (V)	582	5,6	586	8,43
Corrente de linha (A)	125	25	256	25
Fluxo (Wb)	2.58	0,62	2.65	1,13
Conjugado (N.m)	91502	13,5	91651	33
Corrente de campo ou excitação(A)	183	28	186	68
Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto (A)	275	28	643	35
Tensão retificada (V)	1564	3,06	784	7,7
Corrente retificada (A)	155	2,85	313	7,26

Ressalta-se que os valores eficazes mostrados na tabela 3.5 para a tensão retificada e para corrente retificada apresentam-se com seus valores numéricos diferenciados em 50%. O motivo disto foi objeto de esclarecimentos anteriores e não serão repetidos neste etapa dos trabalhos.

Objetivando uma visualização gráfica dos valores das grandezas obtidas das simulações, a figura 3.46 correlaciona os resultados das distorções já apresentados na tabela anterior.

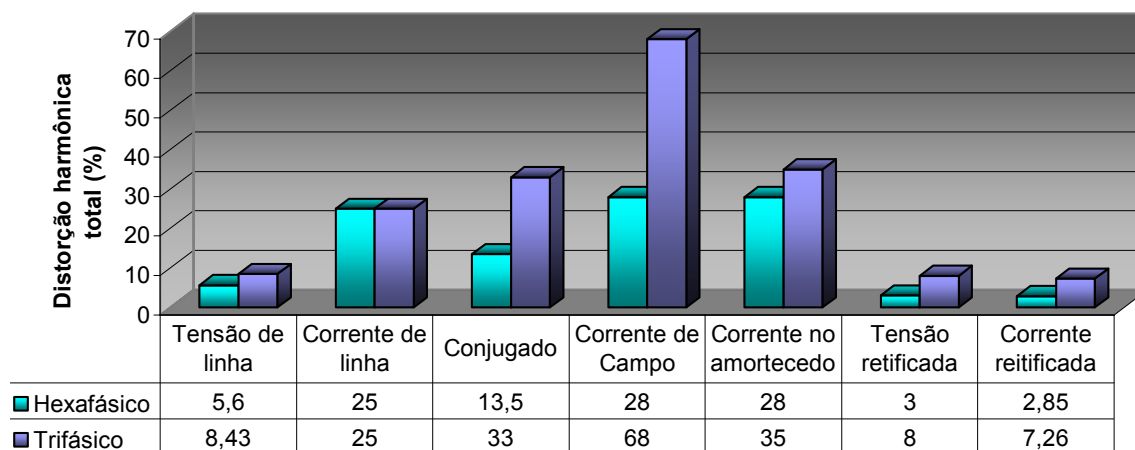


Figura 3.47 – Gráfico comparativo das distorções harmônicas totais para diversas grandezas.

3.9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo em pauta foi iniciado através da caracterização da plataforma computacional utilizada para os trabalhos. Como informado, trata-se de um software que emprega técnicas de modelagem no domínio do tempo, fato este que está em consonância com as metas desta dissertação.

Fundamentado na modelagem proposta no Capítulo II, onde foram tecidos os comentários e estabelecidas as expressões representativas da máquina síncrona hexafásica, elaborou-se um programa correspondente, o qual foi implementado no simulador selecionado. Este recurso adicionado ao programa base recebeu o nome de **template – gerador especial**. Detalhes sobre o programa desenvolvido, com a identificação das grandezas de entrada, de saída e parâmetros exigidos foram discutidos no texto.

Através da seleção de uma situação prática, compreendendo desde a definição das características do vento, passando pelo rotor e gerador e, culminando pelo suprimento de uma unidade retificadora com carga modelada por impedância constante, foi então estabelecida a

topologia e parâmetros de um complexo eólico resumido. Este foi utilizado para fins dos estudos de avaliação de desempenho do complexo considerando-se duas possibilidades quanto à máquina geradora. Utilizando inicialmente o gerador hexafásico e um vento ideal, procedeu-se os trabalhos de simulação culminando pelo oferecimento de informações relativas às grandezas operativas do sistema. Na sequência, repetiu-se os estudos substituindo a mencionada máquina por um gerador trifásico convencional. Assim procedendo obteve-se resultados comparáveis entre si, visto que as condições de funcionamento do complexo estudado foram similares.

Dentre as possibilidades de seleção das grandezas a serem focadas para o trabalho optou-se pela análise das: tensões, correntes, conjugados, fluxos, corrente de campo, corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto, tensão retificada e corrente retificada. Comparando-se as formas de onda, distorções, valores, etc, foi então possível correlacionar o desempenho dos dois sistemas, um constituído pela máquina especial e outro pela convencional, e assim, concluir sobre as vantagens de uma sobre a outra.

De um modo geral, as vantagens oferecidas pela geração hexafásica podem ser sintetizadas nos seguintes pontos:

- Menor distorção nas formas de onda das tensões, conjugados, corrente de campo, etc;
- Obtenção de uma tensão CC de valor duplicado;
- Redução da corrente do enrolamento amortecedor;
- Redução da corrente de linha.

No que tange aos pontos negativos, naturalmente, um aspecto que não pode ser ignorado está atrelado com os custos e maiores dificuldades de reposição de peças.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO GERADOR HEXAFÁSICO INSERIDO EM UM COMPLEXO EÓLICO

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez constatadas as vantagens individuais oferecidas pelo emprego dos geradores hexafásicos em relação aos tradicionais, os trabalhos seqüenciais primaram pela inserção da modelagem feita num simulador já existente para estudos computacionais de sistemas eólicos do domínio do tempo.

Assim procedendo, passou-se a dispor de uma plataforma computacional que simula um complexo eólico com todas as suas particularidades construtivas, conforme descrito em [12]. Exceção se faz ao tipo de gerador, o qual passa a ser a máquina especial focada nesta dissertação.

Com tal base de estudos, a exemplo do realizado na referência supra identificada, procedeu-se a um conjunto de avaliações de desempenho do sistema completo, com destaque

às formas de onda e parâmetros de operação do complexo eólico. Os resultados obtidos, para uma situação particular em que o vento se apresenta com turbulências, são apresentados e discutidos nesta seção e objetivam, dentre outros aspectos, mostrar a consistência física do funcionamento do modelo inserido na plataforma computacional utilizada.

4.2 – SISTEMA EÓLICO UTILIZADO E CARACTERÍSTICAS

O sistema utilizado para os estudos computacionais corresponde ao mesmo empregado em[12], [13], diferindo apenas pelo emprego do gerador hexafásico em substituição à máquina convencional.

A figura 4.1 ilustra os diversos componentes do sistema de conversão eólica utilizado.

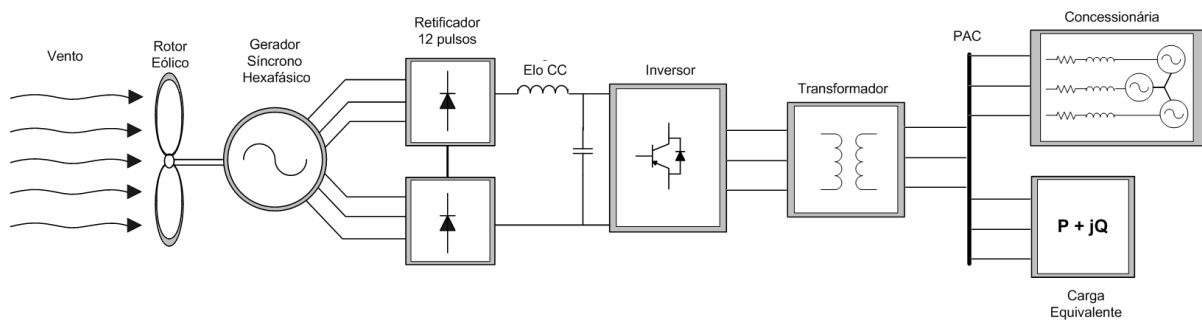


Figura 4.1 – Sistema eólico investigado.

A tabela 4.1 sintetiza as características/parâmetros dos principais componentes que conformam a unidade eólica sob avaliação, qual seja: o sistema de conversão eólico, a concessionária e a carga conectada ao PAC. Nesta tabela estão indicadas, também, as três velocidades que caracterizam a operação do aerogerador, a saber: velocidade nominal, velocidade de acionamento (*cut-in*) e velocidade de corte ou saída (*cut-out*). Maiores detalhes

dos parâmetros das partes envolvidas no processo podem ser encontrados nas referências acima mencionadas.

Tabela 4.1 – Dados utilizados nos estudos computacionais

Rotor Eólico	Nº. de Pás	Raio [m]	Controle	Eixo
	3	21	Pitch	Horizontal
	Velocidade nominal (m/s)	Velocidade <i>cut-in</i> (m/s)	Velocidade <i>cut-out</i> (m/s)	
	12	3	25	
Gerador Elétrico	Velocidade [rpm]	P [pólos]	V_n [V]	S_n [kW]
	34	60	600	1000
Conversor de Frequência	Controle	$f_{chav.}$ [kHz]	V_{in} [V]	
	PWM	5	1200	
	L_{cc} [mH]	C_{cc} [mF]	V_{out} [V]	
	0,2	800	400	
Transformador	R [%]	S_n [kVA]	V_p [V]	
	0,5	1000	400	
	X [%]	f_n [Hz]	V_{scc} [kV]	
	5	60	13,8	
Concessionária	S_{cc} [MVA]	V_n [kV]	f_n [Hz]	
	10	13,8	60	
Carga	P [kW]	Q [kVAr]	V_n [kV]	f_n [Hz]
	650	50	13,8	60

A tabela 4.2 apresenta as características do vento para o caso escolhido como representativo do desempenho do sistema.

Tabela 4.2 – Características do caso simulado.

Características do Vento
$V_{base} = 8 \text{ m/s}$ $V_{rampa} = 0 \text{ m/s}$ $V_{rajada} = 3 \text{ m/s}$

No que tange aos pontos físicos que perfazem a rede e que serão alvo das análises posteriores, este são identificados na figura 4.2.

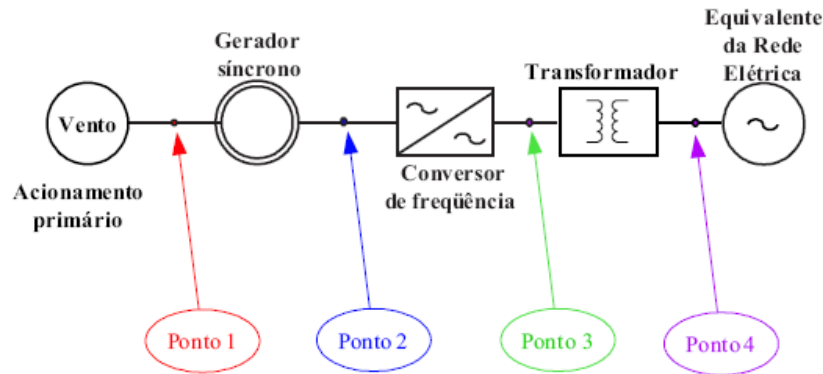


Figura 4.2 – Pontos monitorados.

As grandezas utilizadas para avaliar o desempenho do sistema eólico, para cada um dos pontos identificados na figura anterior, encontram-se descritas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Pontos de monitoramento e grandezas monitoradas.

Ponto	Grandezas Analisadas
<i>Ponto 1</i>	• Vento • Velocidade rotacional • Coeficiente de potência • Potência aerodinâmica
<i>Ponto 2</i>	• Tensões CA • Correntes CA
<i>Ponto 3</i>	• Tensões CA • Correntes CA • Tensão no elo CC
<i>Ponto 4</i>	• Tensões CA • Correntes CA • Potências ativa e reativa

Tendo em mente que o estudo realizado aborda um sistema trifásico, as tensões apresentadas ao longo deste documento são aquelas medidas entre fases e as correntes correspondentes de linha.

4.3 – RESULTADOS OBTIDOS

(A) – PONTO 1

A figura 4.3 mostra o sinal de vento gerado e aplicado à turbina eólica. O vento apresenta, além da componente base igual a 8 m/s e o “ruído”, duas rajadas de vento, ambas com duração de 3 segundos e valor máximo de 3 m/s.

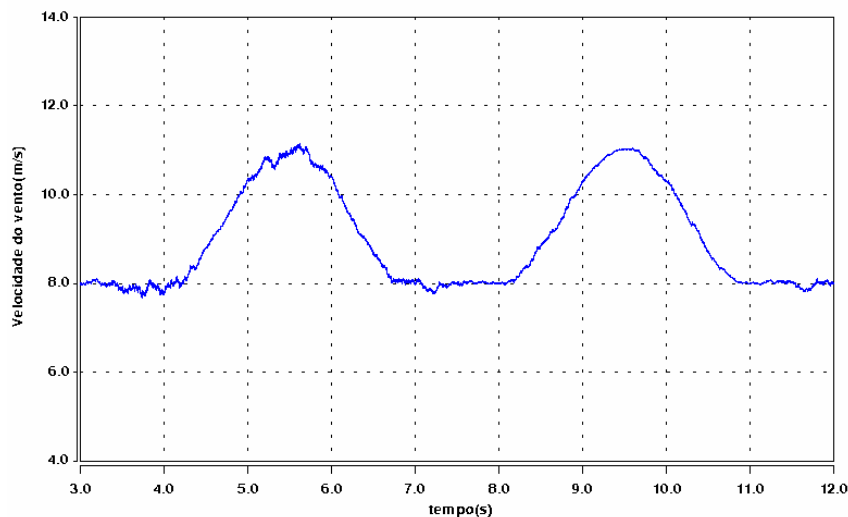


Figura 4.3 – Velocidade do vento.

A figura 4.4 mostra a velocidade mecânica do eixo do rotor, e do próprio gerador elétrico, como resultado do vento aplicado. A figura evidencia a sensibilidade da velocidade do rotor devido a mudanças de comportamento da fonte primária. Neste caso, constata-se que, a velocidade do eixo do rotor apresenta pequenas variações, isto ocorre devido ao valor da inércia da máquina, que contribui para amenizar as variações de velocidade impostas pelas mudanças no sinal do vento. Entre uma e outra turbulência, e depois de extintos os dois fenômenos, a velocidade do eixo tende para o seu valor de regime ou de pré-evento.

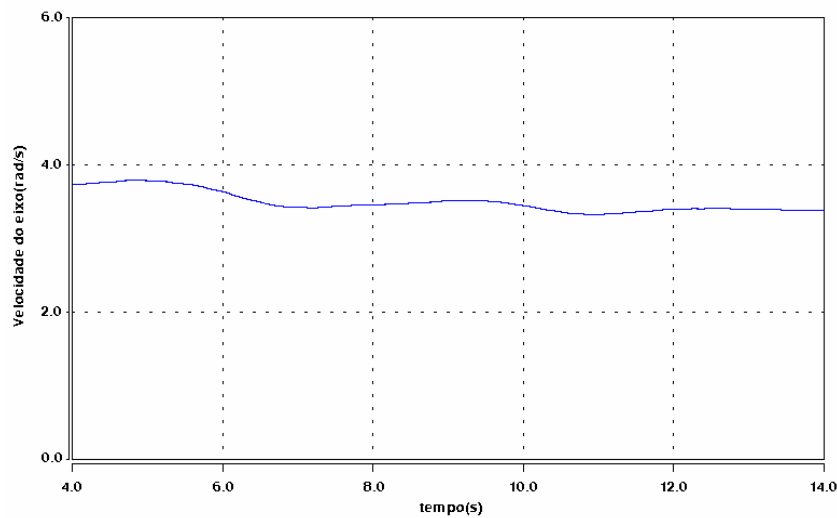


Figura 4.4 – Velocidade mecânica no eixo do rotor.

O desempenho do coeficiente de potência C_p ou eficiência da turbina está mostrado na figura 4.5. Este coeficiente se mantém num valor em torno de 0,4, dentro da faixa esperada para turbinas eólicas deste tipo. Destaca-se que o valor máximo teórico que pode ser atingido por este coeficiente, conhecido como limite de Betz, é igual a 16/27 ou 59,26%. Em situações reais, no entanto, os valores alcançados pelo C_p normalmente não são superiores a 45%. O valor do coeficiente de potência sofre pequenas variações transitórias durante o tempo em que as rajadas estão presentes, reduzindo ligeiramente o seu valor e, em consequência, a potência extraível do vento.

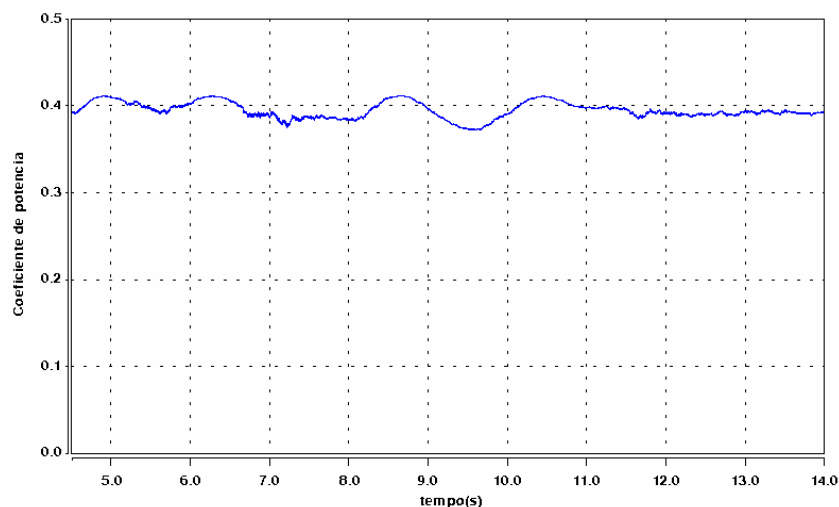


Figura 4.5 – Coeficiente de potência.

A potência aerodinâmica extraída do vento, e que é aplicada ao eixo do gerador, está ilustrada na figura 4.6. A potência aerodinâmica antes da imposição das rajadas alcança um valor próximo a 170 kW, enquanto que no pico da perturbação atinge um valor em torno de 450 kW. Salienta-se, que o forte incremento desta potência, e em consequência da potência ativa, deve-se ao fato de a mesma ser proporcional ao cubo da velocidade [12].

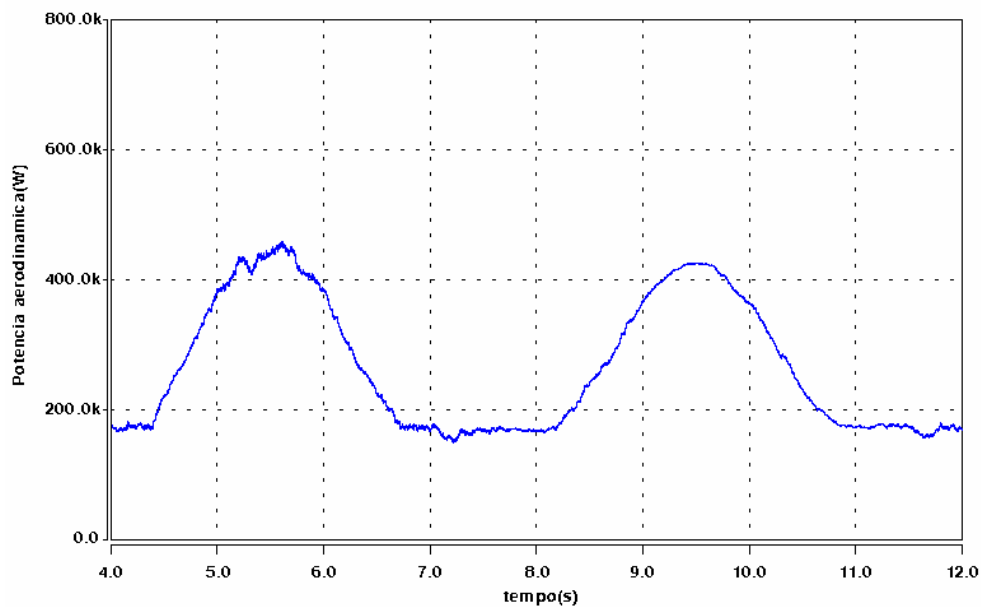


Figura 4.6 – Potência aerodinâmica.

(B) – PONTO 2

As variáveis observadas neste ponto referem-se aos terminais de saída do gerador elétrico. Nesse sentido, as figuras 4.7 e 4.8 mostram os perfis das tensões trifásicas em cada um dos dois conjuntos de enrolamentos, *abc* e *xyz*, nos terminais de saída do gerador síncrono hexafásico.

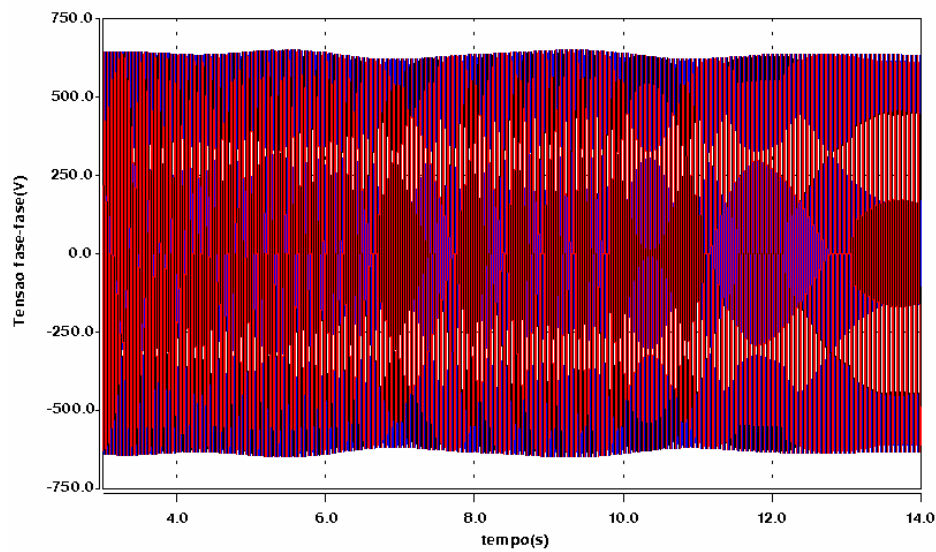


Figura 4.7 – Perfil das tensões trifásicas *abc* nos terminais de saída do gerador elétrico.

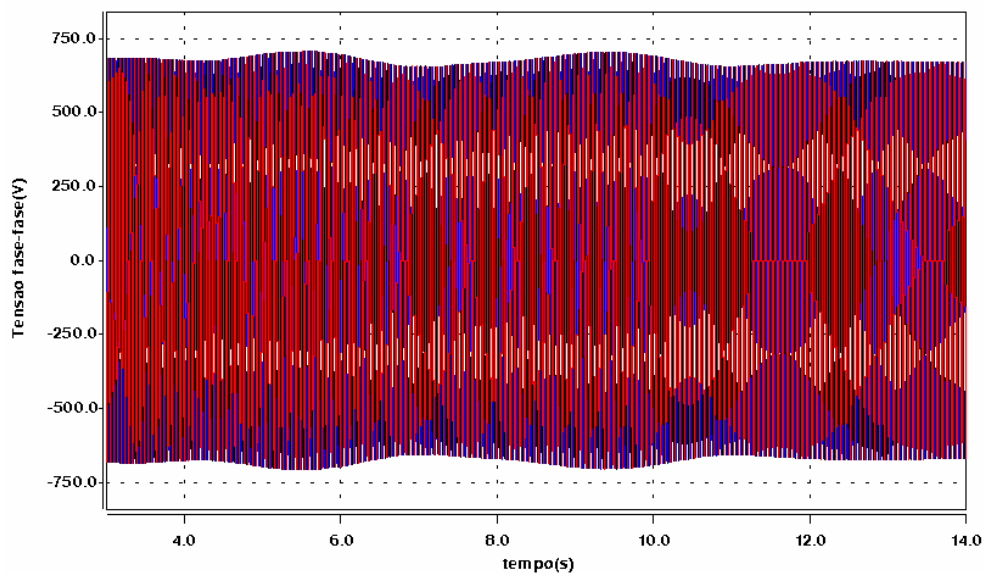


Figura 4.8 – Perfil das tensões trifásicas *xyz* nos terminais de saída do gerador elétrico.

Observa-se na figura que estas grandezas experimentam, embora de forma mais leve, as variações que se processam no vento. É importante salientar que o sistema sob estudo é do tipo velocidade variável. Dessa forma, a velocidade do rotor, e consequentemente a frequência dos sinais gerados também são alteradas quando ocorrem variações da velocidade do vento.

Para possibilitar uma melhor visualização do sinal, um detalhe das tensões *abc* mostradas na figura anterior está ilustrado na figura 4.9. Devido ao comportamento análogo das tensões *xyz*, estas serão omitidas nesse ponto. Este desenho evidencia o formato não senoidal das tensões, em decorrência do efeito da ponte retificadora do conversor de frequência, que consiste num retificador de 12 pulsos.

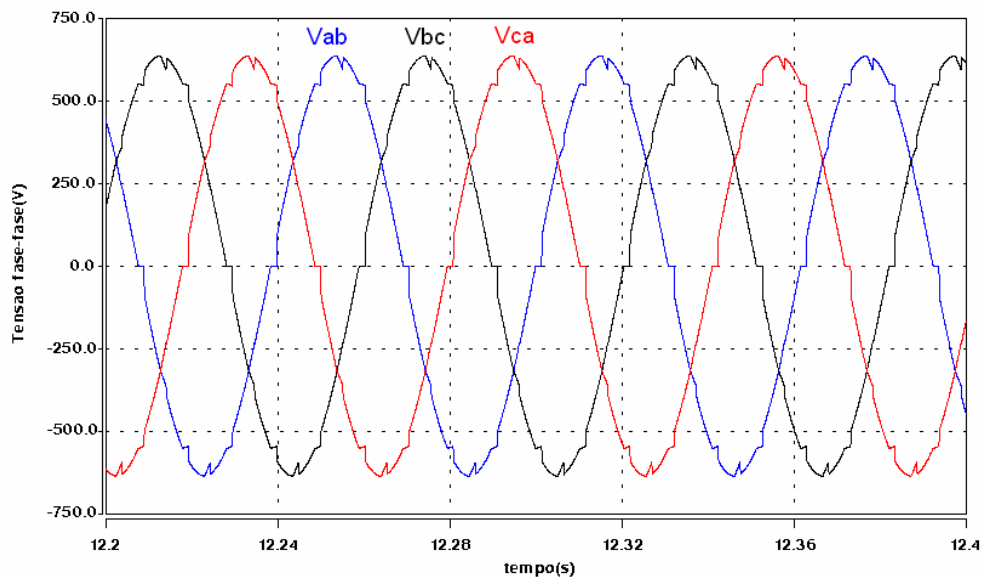


Figura 4.9 – Zoom das tensões na saída do gerador elétrico.

As figuras 4.10 e 4.11 apresentam os oscilogramas de corrente nos terminais do gerador elétrico, em regime permanente, e com duas turbulências impostas ao acionamento primário, para os conjuntos *abc* e *xyz*, respectivamente. Em decorrência das duas rajadas de vento, a corrente também passa por dois transitórios, coincidentes no tempo com os verificados no vento. As observações feitas anteriormente para a frequência das tensões geradas aplicam-se também para as correntes, que, de fato, apresentam uma frequência maior durante esses períodos. De outro lado, a maior disponibilização de energia, devido às turbulências, resulta em maior potência extraída do vento e, portanto, em corrente elétrica maior, como mostram as figuras sob análise.

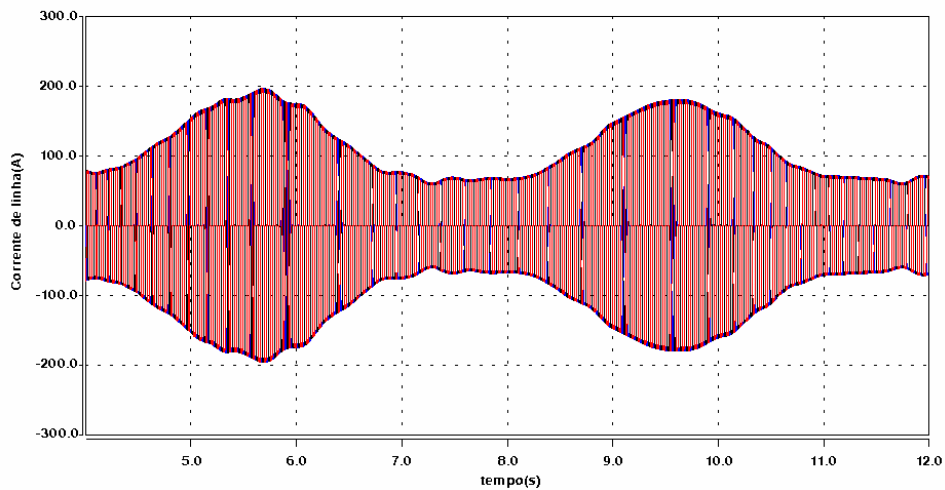


Figura 4.10 – Perfil das correntes nos terminais *abc* de saída do gerador elétrico.

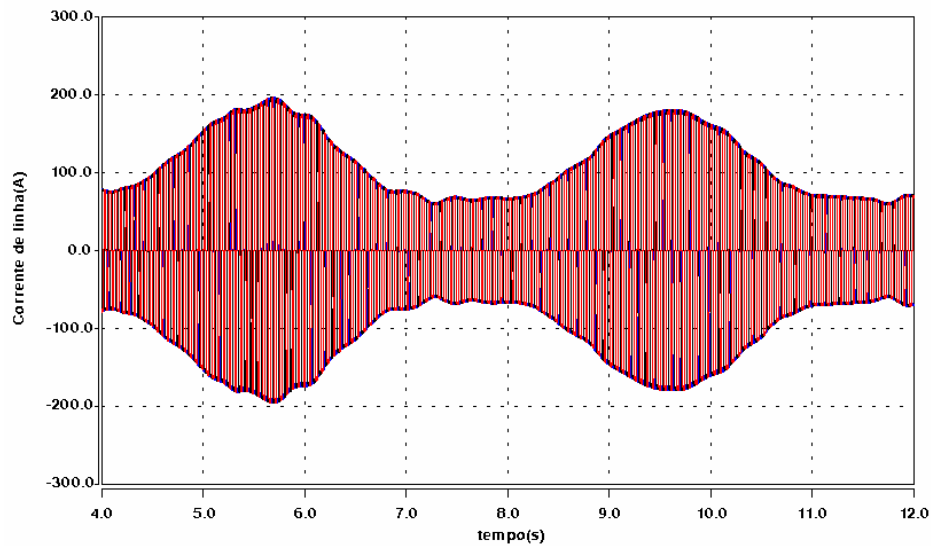


Figura 4.11 – Perfil das correntes nos terminais *xyz* de saída do gerador elétrico.

Detalhes das correntes nos terminais *abc* do gerador estão ilustrados nas figuras 4.12 e 4.13, em regime permanente e durante a segunda turbulência, respectivamente. O valor eficaz de tais grandezas sem turbulências é de 60 A, atingindo um valor eficaz máximo de 145 A, no período em que se verifica o pico da segunda rajada. Mais uma vez constata-se a distorção das formas de onda, como já dito, devido aos componentes eletrônicos utilizados no conversor estático.

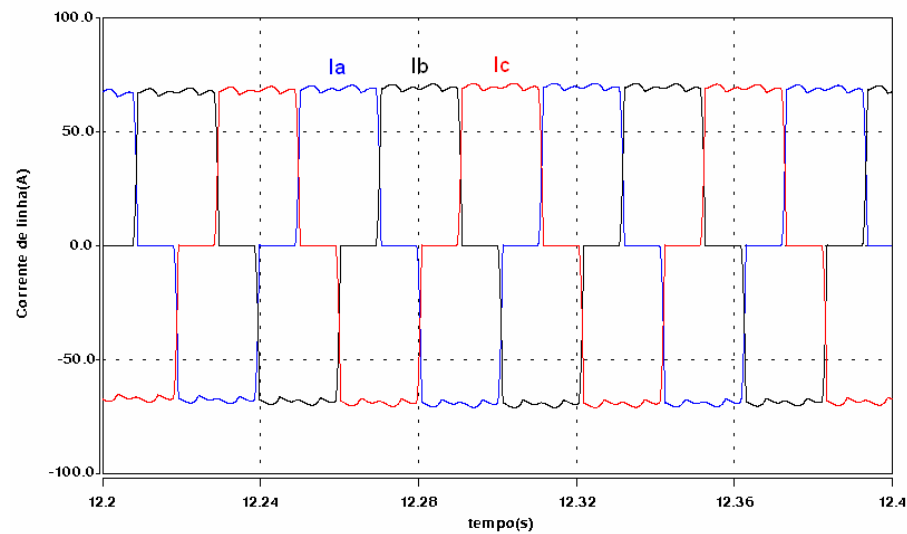


Figura 4.12 – Zoom das correntes nos terminais de saída do gerador elétrico em regime.

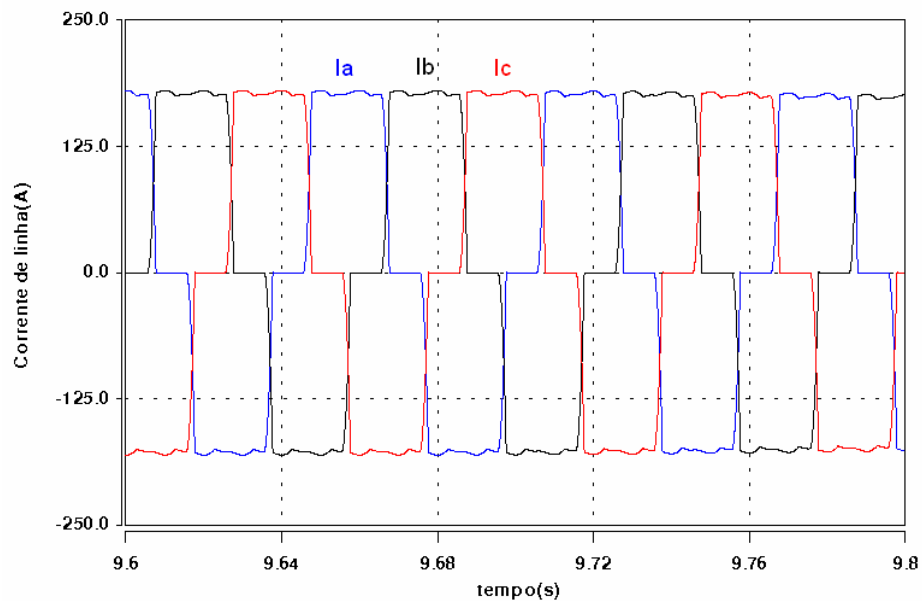


Figura 4.13 – Zoom das correntes nos terminais de saída do gerador elétrico durante o cume da turbulência.

(C) – PONTO 3

Os registros obtidos para este ponto englobam tanto as grandezas alternadas na saída do inversor como também a tensão contínua do elo CC. O desempenho desta última grandeza está exibido na figura 4.14, apresentando um valor praticamente constante em torno de 1 pu, resultado do controle utilizado, o qual propicia a absorção de toda a potência proveniente do

gerador. A pequena variação transitória observada justifica-se pelo fato de não ter sido implementada a otimização do C_p , dessa forma, uma pequena parte da energia adicional disponibilizada durante a ocorrência das rajadas carrega o capacitor do elo CC. Na sequência, essa energia é transferida para o sistema elétrico e a tensão, após uma oscilação, retorna ao seu valor pré-definido. Estes transitórios provocam variações momentâneas de grandezas tais como correntes e potência ativa, conforme mostram os resultados a seguir.

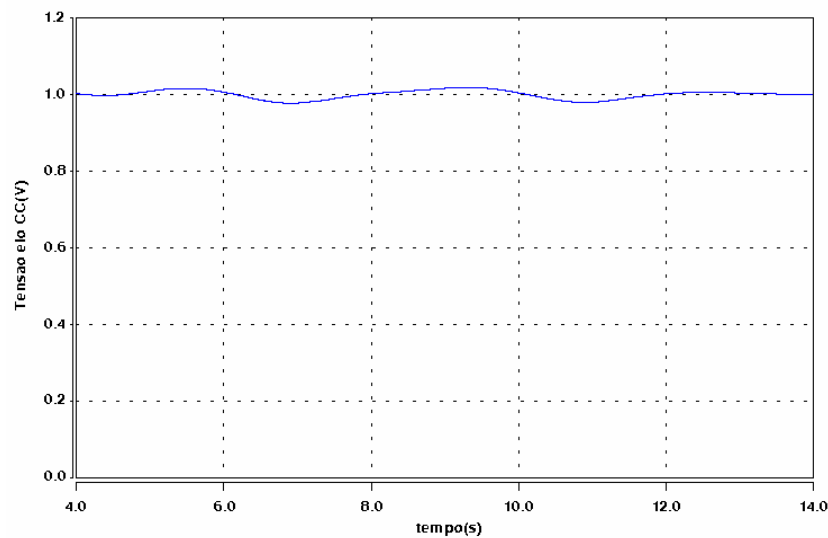


Figura 4.14 – Tensão no elo CC.

O perfil das tensões trifásicas nos terminais de saída do inversor está mostrado na figura 4.15. Detalhes destas formas de onda podem ser observados na figura 4.16, que evidenciam um formato senoidal com valor *rms* igual a 401 V. Esta situação é corroborada pelo espectro harmônico ilustrado na figura 4.17, que mostra apenas a componente fundamental.

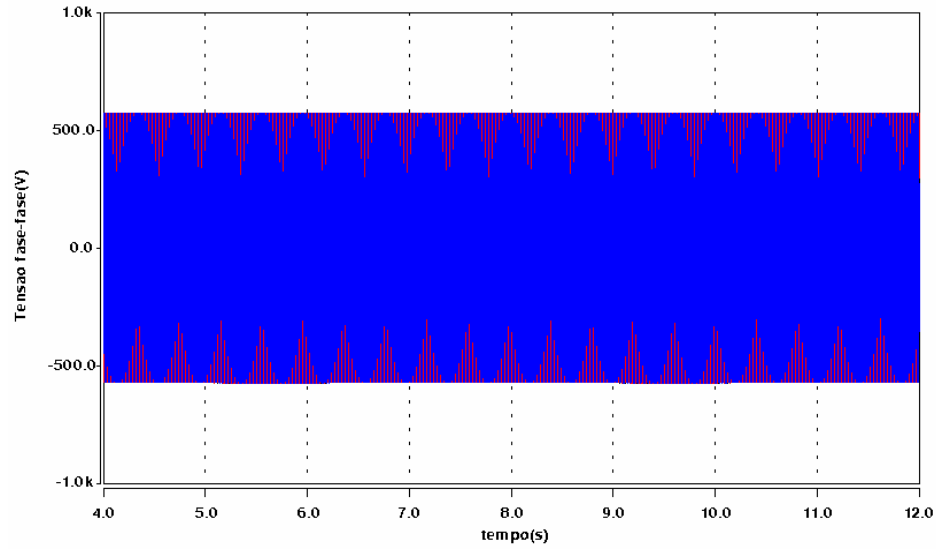


Figura 4.15 – Tensão nos terminais de saída do inversor.

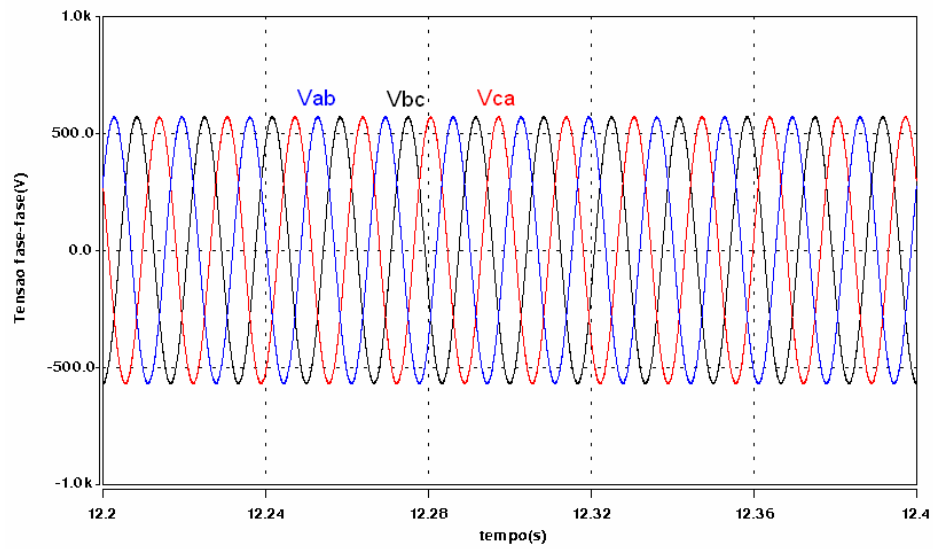


Figura 4.16 – Zoom das tensões nos terminais de saída do inversor.

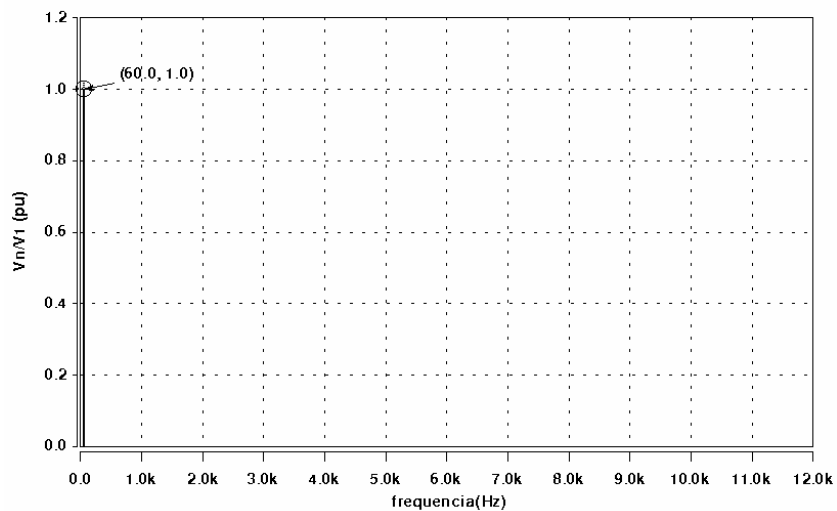


Figura 4.17 – Espectro harmônico de tensão nos terminais de saída do conversor de frequência.

A figura 4.18 ilustra o perfil das correntes trifásicas correspondentes às tensões nos terminais de saída do inversor. Observa-se que as correntes acompanham as variações da fonte primária de energia, conforme destacado anteriormente.

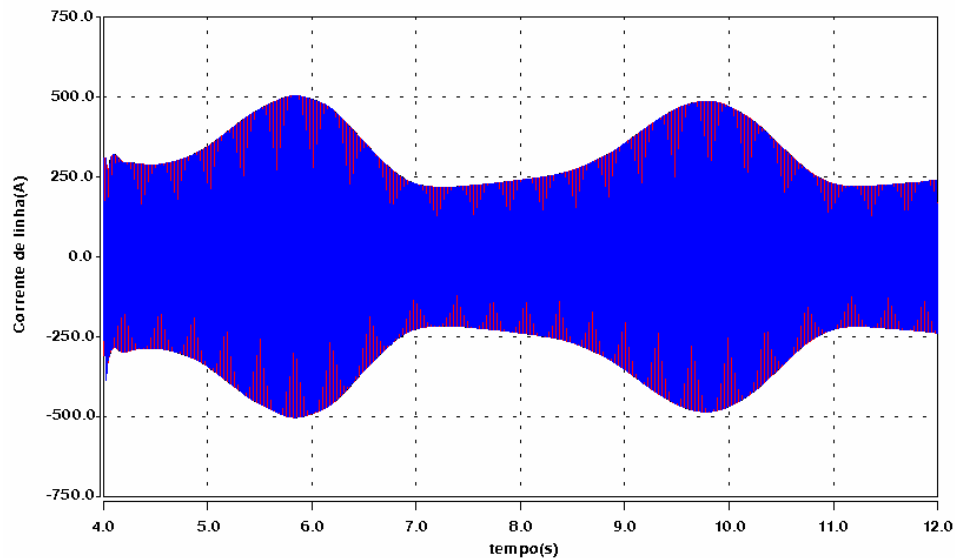


Figura 4.18 – Correntes nos terminais de saída do inversor.

As figuras 4.19 e 4.20 mostram detalhes das correntes da figura anterior, em regime permanente e durante a segunda turbulência. Das formas de onda constata-se a existência de componentes harmônicas de frequência elevada, característico deste tipo de dispositivo. O valor *rms* da corrente é da ordem de 175 A em regime e 328 A na região onde se processou a rajada.

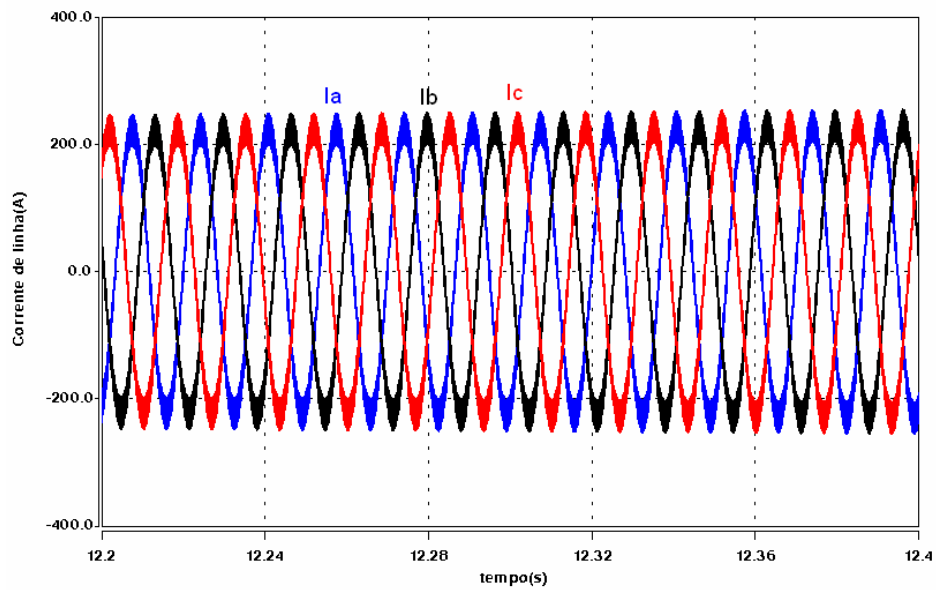


Figura 4.19 – Zoom das correntes nos terminais de saída do inversor em regime.

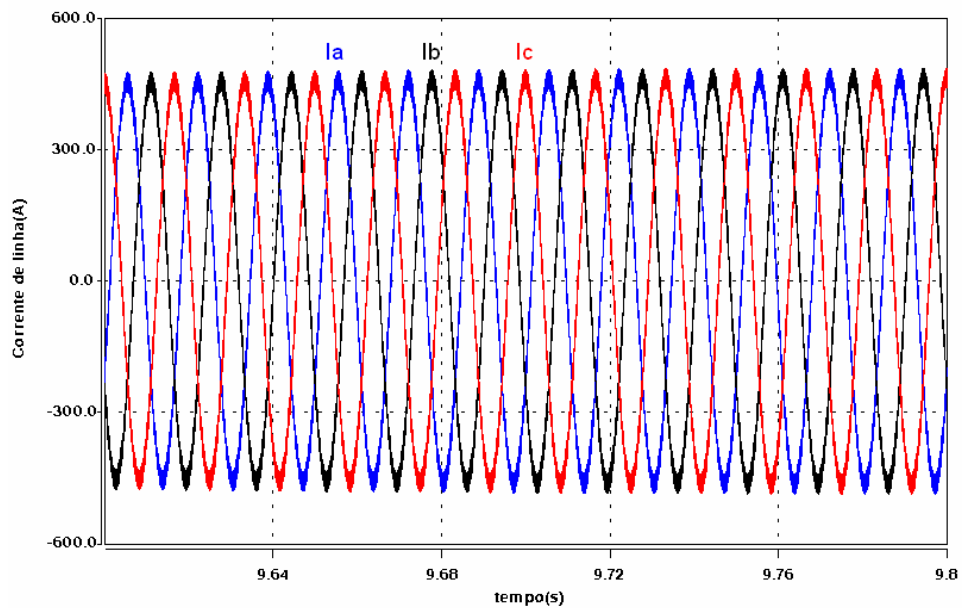


Figura 4.20 – Zoom das correntes nos terminais de saída do inversor no pico do transitório.

A figura 4.21 corresponde ao espectro das correntes harmônicas nos terminais do conversor de frequência. A figura permite constatar a existência de uma componente harmônica de valor mais significativo de cerca de 10% da fundamental, com frequência igual à de chaveamento, ou seja, 5kHz.

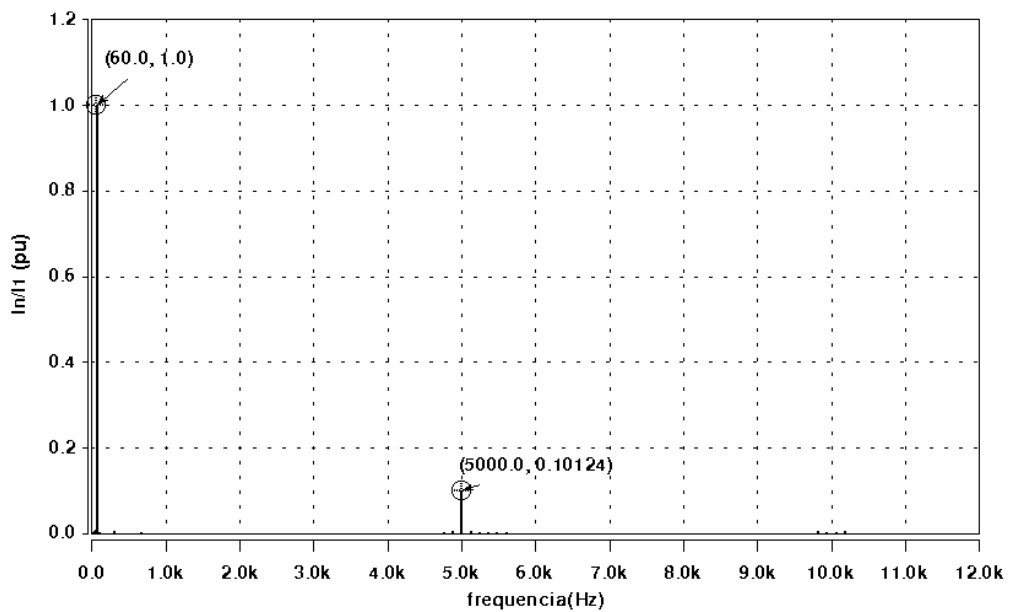


Figura 4.21 – Espectro harmônico de corrente nos terminais do conversor de frequência.

(D) – PONTO 4

Os resultados obtidos para este ponto, onde ocorre o acoplamento entre o WECS e o sistema elétrico (PAC), são de grande relevância à determinação de alguns indicadores utilizados para aferir a qualidade da energia elétrica. Nesse sentido, são determinados para as tensões e correntes, indicadores que permitem diagnosticar o grau de degradação da energia elétrica, seja devido às condições operativas do sistema eólico ou ao próprio sistema de potência[12].

A figura 4.22 ilustra o perfil das tensões de linha no ponto de acoplamento comum - PAC. No detalhe destas tensões, mostrado na figura 4.23, nota-se que os oscilogramas apresentam-se praticamente senoidais. O valor eficaz das tensões, em regime permanente é igual a 13.778 V.

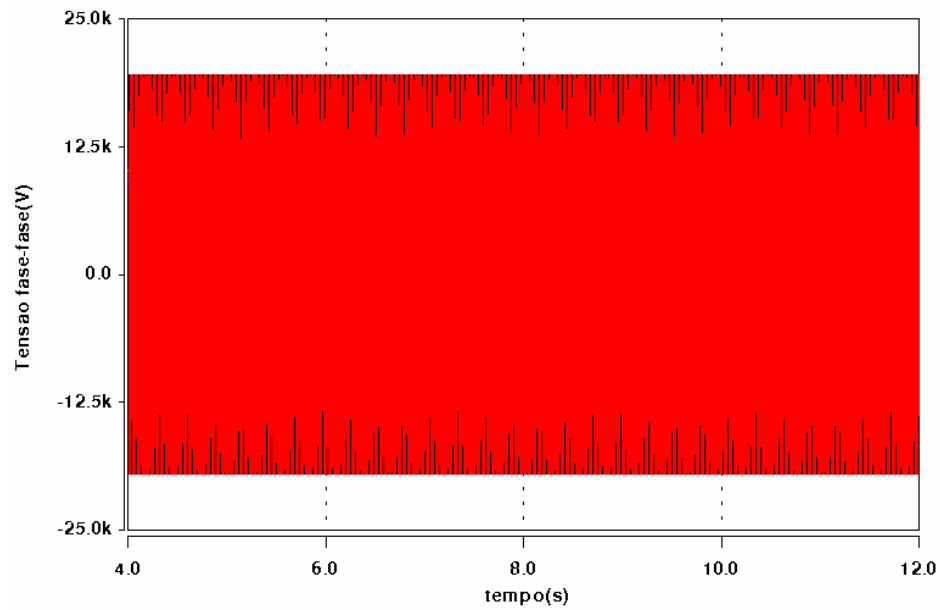


Figura 4.22 – Tensões no ponto de acoplamento comum (PAC).

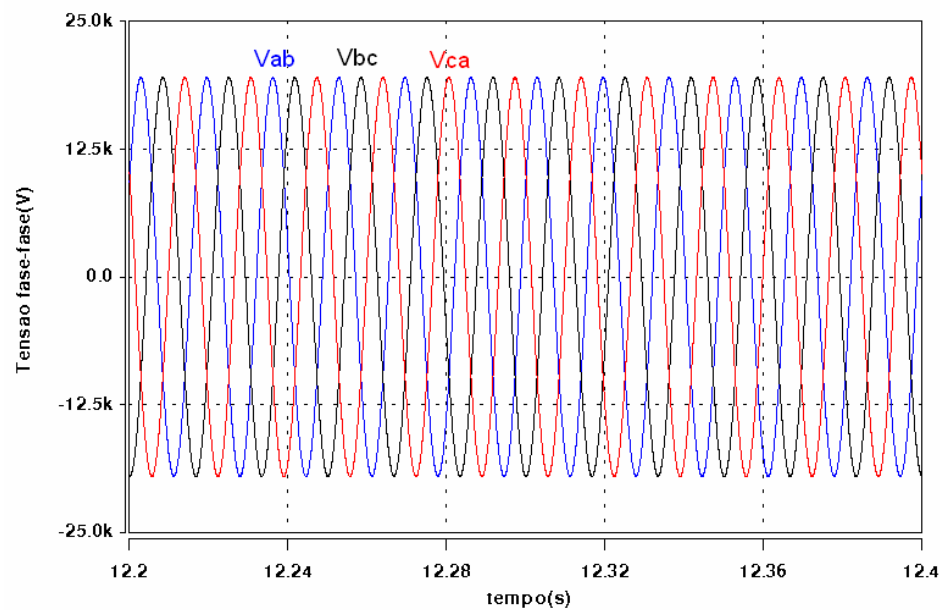


Figura 4.23 – Zoom das tensões no PAC.

O perfil *rms* das tensões trifásicas no PAC pode ser observado na figura 4.24. Nota-se que estas não são afetadas pelas rajadas impostas. O valor *rms* encontrado para as três tensões de linha é igual a 13.775 V.

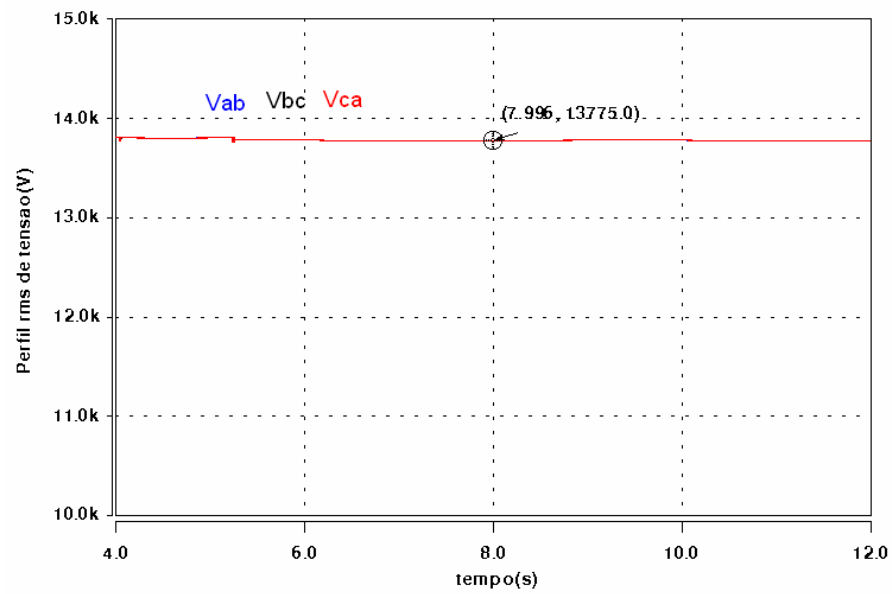


Figura 4.24 – Perfil *rms* das tensões no ponto de acoplamento comum (PAC).

O espectro harmônico da tensão, mostrado na figura 4.25, atesta a inexistência de componentes harmônicas, apresentando, portanto, somente a componente fundamental.

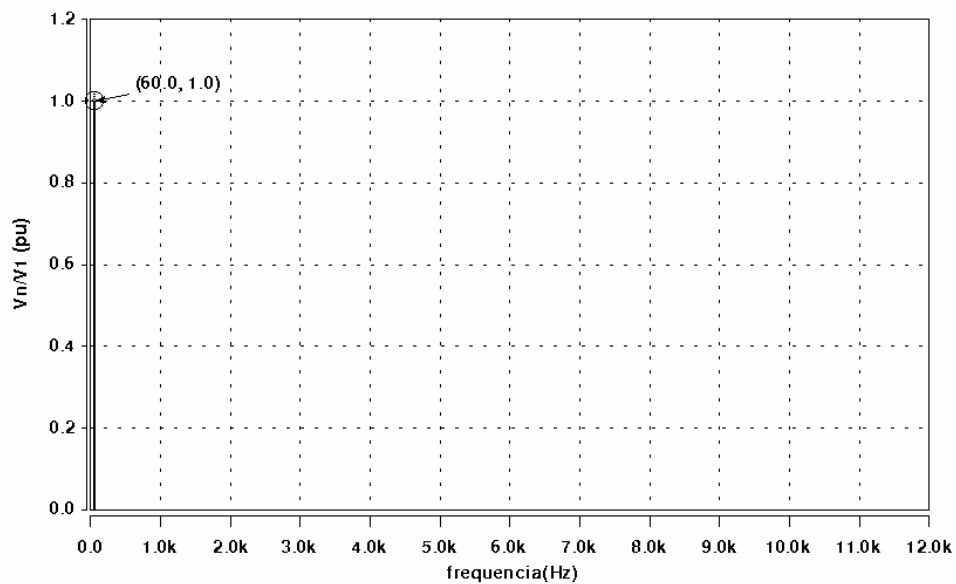
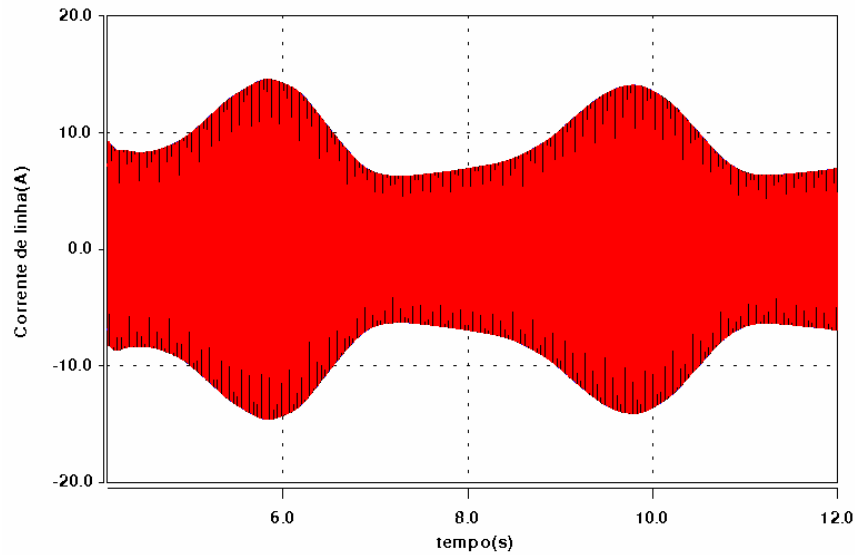


Figura 4.25 – Espectro harmônico da tensão no PAC.

A figura 4.26 mostra o perfil das correntes no PAC. Conforme já comentado, estas grandezas mostram-se bastante sensíveis a variações do vento, pois este tem reflexo direto sobre a potência gerada e, conseqüentemente, na corrente. Em particular, aponta-se para os

tempos em torno de $t=5,5$ s e $t=9,5$ s, onde se observam acréscimos transitórios significativos das correntes do PAC, com comportamento que acompanha as variações do vento.



Figuras 4.26 – Correntes no ponto de acoplamento comum (PAC).

Detalhes das correntes no PAC estão exibidos nas figuras 4.27 e 4.28. Como já dito, as componentes harmônicas mais significativas no sinal de corrente encontram-se na faixa da frequência de chaveamento do inversor tipo PWM. A grandeza em questão sai de um valor de regime de 6,5 A *rms* e alcança, no ápice da turbulência, um valor eficaz de 9,5 A.

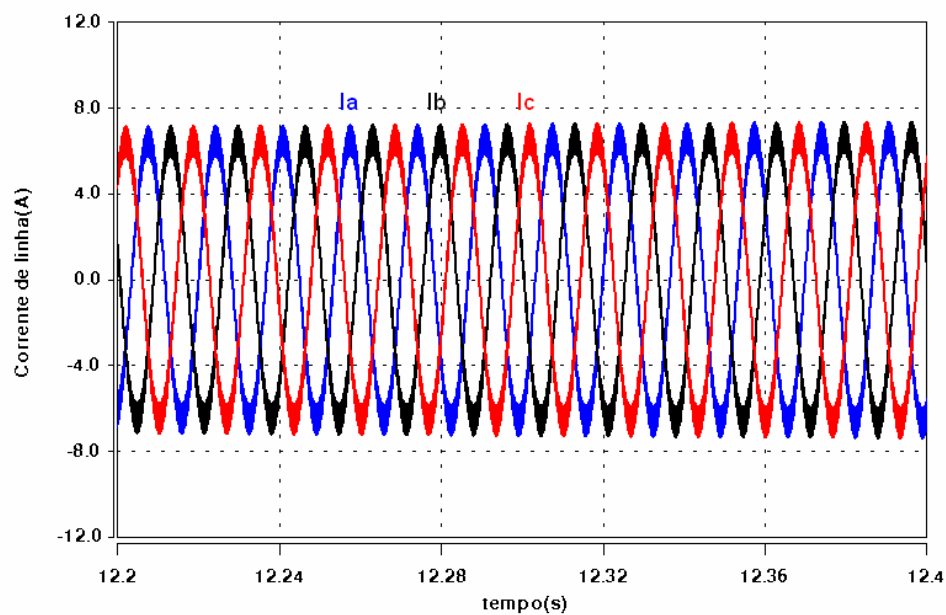


Figura 4.27 – Zoom das correntes no PAC em regime.

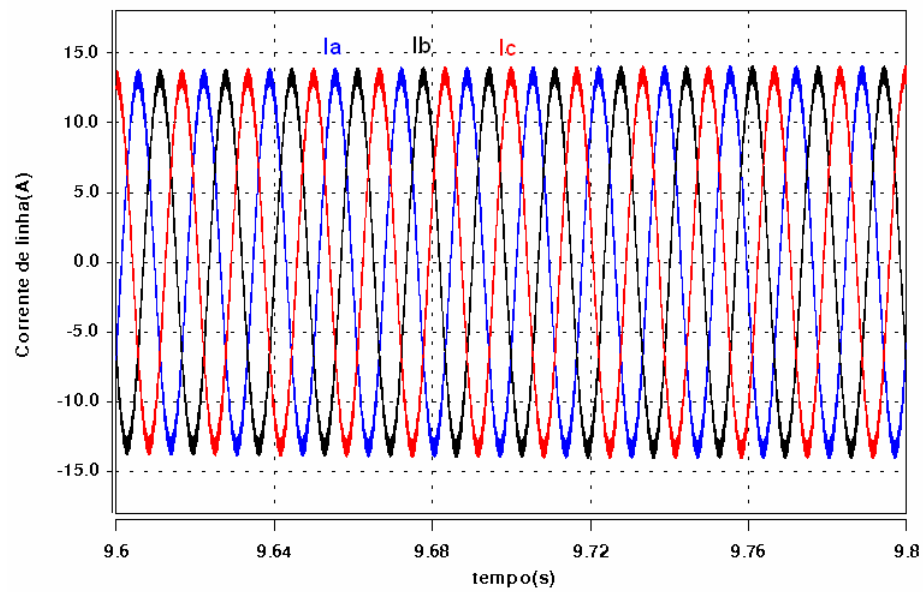


Figura 4.28 – Zoom das correntes mostradas no PAC durante a rajada.

As componentes harmônicas mais significativas no sinal de corrente encontram-se na faixa da frequência de chaveamento do inversor, no presente caso de 5 kHz, constatado pelo espectro harmônico mostrado na figura 4.29. Outras componentes características, com frequência de $5\text{kHz} \pm 2 \times 60\text{ Hz}$, embora não visíveis na figura, encontram-se presentes e com amplitude aproximada de 0,3%.

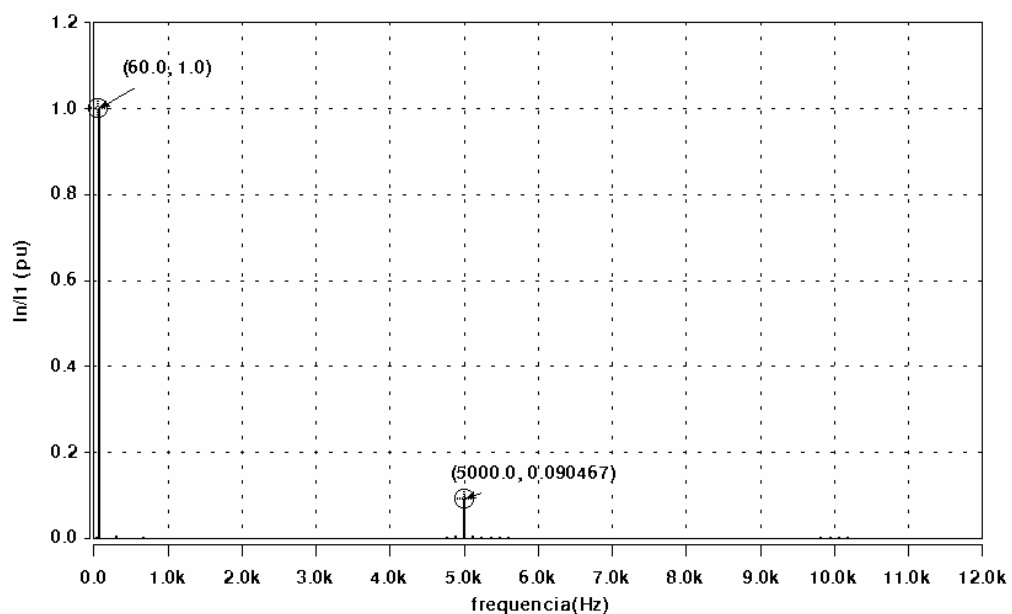


Figura 4.29 – Espectro harmônico da corrente no PAC.

A distorção harmônica total de corrente encontrada para as correntes no ponto de acoplamento é de 9%.

A figura 4.30 exibe a curva da potência ativa gerada pelo WECS como resposta ao vento incidente. Esta grandeza também passa por duas situações transitórias, o acréscimo transitório verificado na potência gerada segue a filosofia estabelecida para o controle, ou seja, no sentido da extração máxima da potência disponível na fonte primária.

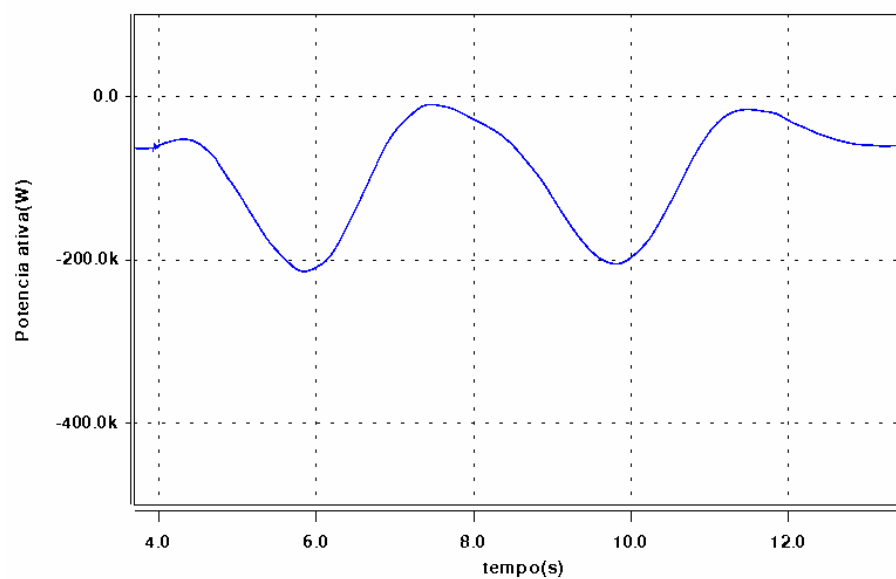


Figura 4.30 – Potência ativa gerada pela turbina eólica.

O desempenho da potência reativa intercambiada entre o WECS e a rede elétrica está mostrado na figura 4.31. Salienta-se que a tensão no PAC é mantida no valor pré-definido através do controle do fluxo de potência reativa do/para o sistema elétrico de potência. Todavia, é importante salientar que no PAC encontra-se conectada uma carga do tipo $P+jQ$, que é suprida pela rede e pela turbina elétrica.

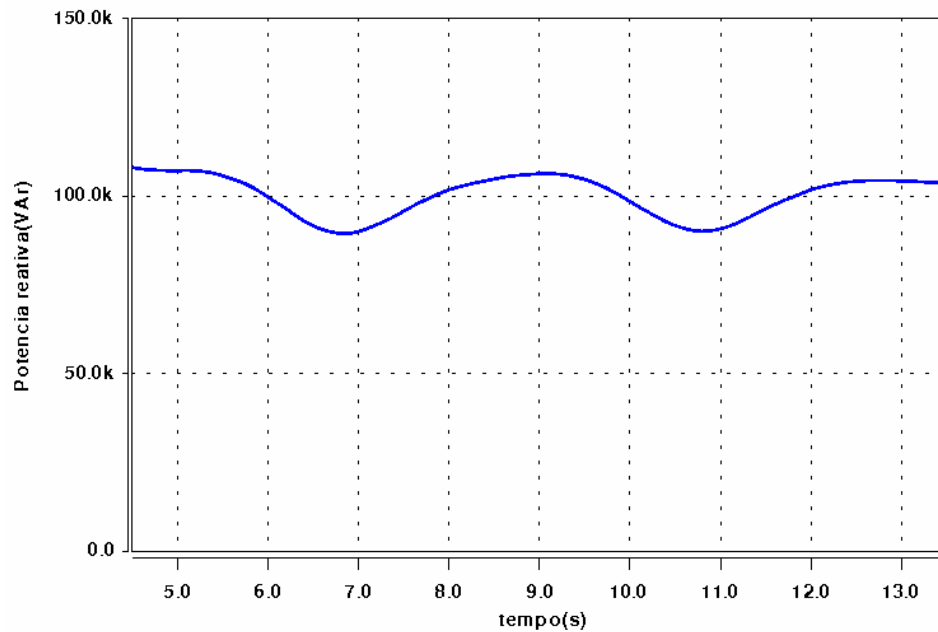


Figura 4.31 – Potência relativa fornecida pelo gerador eólico.

4.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente neste capítulo foi definida a topologia do sistema eólico/concessionária a ser utilizada para realização dos estudos computacionais. Foi adotado o mesmo sistema desenvolvido e utilizado por [12], [13], por se tratar de uma configuração consagrada, apresentando características bastante realísticas. O sistema contempla desde a definição das características do vento, passando pelo rotor e gerador, o qual está ligado ao conjunto retificador-inversor, possuindo um transformador elevador, e culminando pelo acoplamento ao PAC, onde está ligado o modelo representativo do sistema elétrico, representado pelo equivalente da geração (concessionária) e da carga agregada. A principal mudança feita neste sistema foi a substituição da máquina geradora, adotando o gerador síncrono hexafásico especial, desenvolvido e implementado nos capítulos anteriores. A partir daí, foi escolhida

uma condição de operação que retratasse de maneira mais completa a fonte primária em condições mais próximas possíveis das manifestadas em um sistema real.

Frente ao complexo eólico em estudo, optou-se pela escolha de pontos estratégicos à operação deste, e na definição das grandezas a serem monitoradas nestes locais, para que fosse possível a análise do comportamento do complexo com vista aos objetivos almejados. Desta forma, foram definidos os pontos e respectivas grandezas de interesse, conforme foi apresentado no desenho da figura 4.2 e na tabela 4.3.

Pelo estudo das respostas obtidas para as grandezas estudadas, foi possível correlacionar as variações impostas à fonte primária de energia e os impactos causados por estas ao longo do complexo eólico. De acordo com o ponto sob foco de análise, foram verificadas variações: na velocidade, no coeficiente de potência, nas tensões, correntes, potências e espectro das componentes harmônicas. Notadamente, as maiores variações observadas ocorreram para as correntes geradas, que acompanha de maneira similar às variações impostas pelo vento.

Pelo exposto acima, fica clara uma característica de operação para sistemas de geração eólica de velocidade variável, que é a variação da potência entregue ao sistema. Como mencionado, as variações se dão nas correntes de linha envolvidas, sendo que as tensões no PAC permanecem com seus valores constantes ao longo de todo o processo, devido à característica dominante do equivalente do sistema elétrico.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Muito embora a estrutura do trabalho tenha primado por análises e discussões dos principais pontos relacionados com as atividades desenvolvidas em cada capítulo, considera-se relevante, nesta fase final da dissertação, sintetizar os principais aspectos, contribuições e avanços obtidos ao longo da pesquisa.

Neste sentido, focando o conteúdo do Capítulo I, este foi centrado na caracterização do tema escolhido para o presente projeto, ressaltando que, no que tange à literatura disponível sobre a correlação: geradores hexafásicos especiais e complexos eólicos; o número de publicações nacionais e internacionais é extremamente pequeno. De fato, a única referência diretamente afeita ao tema corresponde àquela identificada como [11] e, mesmo assim, há expressivas simplificações no processo avaliativo. Desta forma, fica reconhecido que, no âmbito mais completo da modelagem e estudos avaliativos de desempenho do gerador especial, e ainda, o estabelecimento de comparações com a operação de máquinas síncronas convencionais, o presente trabalho se apresenta como uma contribuição significativa para a melhoria da modelagem de unidades eólicas. A afirmativa fica ainda fortalecida pelo fato que, no cenário brasileiro, o único fabricante atualmente instalado no país, oferece complexos eólicos que utilizam tal gerador hexafásico especial.

Uma vez compreendida a importância de uma pesquisa na direção apontada, as atividades seguintes, descritas no Capítulo II, focaram a modelagem matemática do gerador síncrono em pauta. Neste sentido, iniciando pelos aspectos básicos relacionados com a constituição física do gerador hexafásico, com destaque aos enrolamentos presentes no estator da máquina, procedeu-se ao estabelecimento de um conjunto de equações que descrevem, no domínio do tempo, a operação do gerador objeto dos estudos. A modelagem realizada utilizou de princípios bastante difundidos sobre a modelagem de máquinas síncronas, empregando a formulação “a,b,c”. Os resultados obtidos pelas formulações desenvolvidas foram uma contribuição importante deste trabalho, uma vez que, como já destacado, a literatura é bastante carente neste tópico de pesquisa. Somado aos trabalhos de cunho mais teórico, o capítulo também destacou aspectos relacionados com a origem dos dados exigidos pelos modelos e suas origens. Neste particular, além do detalhamento das expressões envolvendo a grande diversidade de grandezas relevantes à caracterização da operação dos geradores, foram também tecidos esclarecimentos sobre a questão dos dados de entrada, com ênfase a correlação entre aqueles normalmente disponibilizados e aqueles necessários aos modelos matemáticos.

Uma vez definida modelagem, nos termos esclarecidos, esta foi sequencialmente implementada na plataforma computacional utilizada para os trabalhos. Como informado, trata-se de um software que emprega técnicas de modelagem no domínio do tempo, fato este que está em consonância com as metas desta dissertação. Este recurso, adicionado ao programa base, recebeu o nome de ***template*** – **gerador especial**. Detalhes sobre o programa desenvolvido, como a identificação das grandezas de entrada, de saída e parâmetros exigidos foram discutidos no texto.

Através da seleção de uma situação prática, compreendendo as características do vento, passando pelo rotor e gerador e, culminando pelo suprimento de uma unidade

retificadora com carga modelada por impedância constante, foi então estabelecida a topologia e parâmetros de um complexo eólico resumido. Este foi utilizado para fins dos estudos de avaliação de desempenho do complexo considerando-se duas possibilidades quanto à máquina geradora. Utilizando inicialmente o gerador hexafásico e um vento ideal, procedeu-se os trabalhos de simulação culminando pelo oferecimento de informações relativas às grandezas operativas do sistema. Na sequência, repetiu-se os estudos substituindo a mencionada máquina por um gerador trifásico convencional. Assim procedendo obteve-se resultados comparáveis entre si, visto que as condições de funcionamento do complexo estudado foram similares. De um modo geral, as vantagens oferecidas pela geração hexafásica e constatadas nos estudos computacionais foram: reduções das distorções harmônicas das formas de onda das tensões, conjugados, corrente de campo, etc; duplicação da tensão CC e redução de seu nível de distorções; redução das correntes do enrolamento amortecedor, etc.

Na sequência dos trabalhos procedeu-se a um conjunto de estudos envolvendo, agora, o gerador hexafásico operando como parte de um sistema eólico mais completo. Para tanto foi estabelecido a topologia do complexo até o ponto de conexão com a rede CA de interligação e definidos os principais parâmetros do parque eólico selecionado para os estudos. Selecionando-se, para apresentação e discussão nesta dissertação, uma situação típica de operação que retratasse de modo mais realístico a fonte primária, procedeu-se aos estudos, apresentação dos resultados e discussões pertinentes sobre os desempenhos das grandezas obtidas nos mais distintos pontos físicos que compõem o complexo elétrico sob análise. As respostas obtidas e devidamente comentadas foram esclarecedoras sobre a potencialidade do programa obtido e também sobre a consistência física dos desempenhos obtidos. Vale ressaltar que a ausência de informações obtidas de um sistema real similar e mesmo a inexistência de resultados publicados (a não ser pela referência [11]), não permitiram uma pronta correlação entre as respostas obtidas e outras esperadas. Não obstante a esta

dificuldade, pôde-se constatar que há uma boa correlação e compatibilidade entre as formas de onda e desempenhos físicos relatados em [12], [13].

Como última observação, fica reconhecido que o trabalho aqui apresentado constitui-se numa primeira contribuição ao tema e, certamente, desenvolvimentos futuros deverão complementar e aprimorar o assunto até sua consolidação como ferramenta de análise para estudos de desempenho de parques eólicos equipados com geradores síncronos hexafásicos especiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sudhoff, S.D., *Analysis and average-value modeling of a dual line-commutated converter – 6-phase synchronous machine systems*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 3, Setembro 1993.
- [2] Hegner, H.J., Krause, P.C., Wasynczuk, O., Water, E., Pekarek, S., *Parameter measurement of a six-phase synchronous machine for simulation of machine/converter systems*, Energy Conversion Engineering Conference, 1996.IECEC96. Proceedings of the 31st Intersociety, Agosto 1996, páginas 1792 – 1797 vol.3.
- [3] Zhang, K., Kojabadi, H.M., Wang,P.Z., Chang, L., *Modeling of a Converter-Connected Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator*, Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on Volume 2, 28-01 Novembro, 2005 páginas:1096 – 1100.
- [4] Tucker, W. L., Krause, P. C., Wasynczuk, O., Pekarek, S. D., Walters, E. A., *Analysis And Simulation Of A Six-Phase Generator/Rectifier System*, Energy Conversion Engineering Conference, 1996. IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Volume 3, 11-16 Agosto, 1996 páginas:1804 - 1808 vol.3.
- [5] Jatskevich, J., Pekarek, S.D., *Six-phase synchronous generator-rectifier parametric average value modeling considering operational modes*, HAIT Journal of Science and Engineering B, Volume 2, Issues 3-4, páginas. 365-385 Copyright 2005 Holon Academic Institute of Technology.

- [6] 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*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Agosto 1983, páginas 2685 – 2693.
- [7] Schiferl, R.F., Ong, C.M., *Six Phase Synchronous Machine with AC and DC Stator Connections, Part II: Harmonic Studies and a Proposed Uninterruptible Power Supply Scheme*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Agosto 1983, páginas 2694 – 2701.
- [8] Z. Chen, A. C. Williamson, *Simulation Study of A Double Three Phase Electric Machine*, International Conference On Electric Machine ICEM'98, 1998, Vol.1, páginas 215-220.
- [9] Fuchs, E. F. and L. T. Rosenberg, *Analysis of an Alternator with Two Displaced Stator Windings*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 93, No. 6, 1974, pp. 1776-1786.
- [10] Touma-Holmberg, Kailash Srivastava, *Double Winding, High-Voltage Cable Wound Generator: Steady-State and Fault Analysis* Marguerite, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 2, June 2004.
- [11] Kato, S., Inui, Y., Michihira, M., Tsuyoshi A., *Low-Cost Wind Generator System with a Permanent Magnet Synchronous Generator and Diode Rectifiers*, ICREPQ'06 International Conference on Renewable Energy and Power Quality, 2006.
- [12] Carvalho, B., C., *Desenvolvimento de Modelo computacional de Sistemas Eólicos Utilizando Geradores Síncronos para Estudos de Desempenho no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica*, Novembro de 2006, tese Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- [13] Pinto, A., C., *Modelagem e Análise de Desempenho Dinâmico de Complexos Elétricos Contendo Centrais Eólicas Dotadas de Geradores Síncronos*, Março de 2007, tese Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

- [14] NETO, A. S., *Análise e Controle de Centrais Eólicas a Velocidade Variável Utilizando o ATPDraw*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Março, 2005.
- [15] MME. *Ministério da Minas e Energia* (Página da Web). Outubro 2007. www.mme.gov.br/programs_display.do?chn=905.
- [16] EWEA. *European Wind Energy Association* (Página da Web). Outubro 2007. www.ewea.org.
- [17] AWEA. *American Wind Energy Association* (Página da Web). Outubro 2007. www.awea.org.
- [18] HEIER, S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. [S.l.]: John Wiley and Sons, England, 1998.
- [19] Ackermann, T., *Wind Power in Power Systems*, 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, USA, 2005.
- [20] Hilloowala, R. M.; Sharaf, A. M., *Modelling simulation and analysis of variable speed constant frequency wind energy conversion scheme using self excited induction generator*, Proceedings, Twenty-Third Southeastern Symposium on System Theory, 1991.
- [21] Bansal, R.; Bhatti, T.; Kothari, D., On some of the design aspect of wind energy conversion system, ELSEVIER, Energy Conversion and Management, v. 3, 2002.
- [22] Sloomweg, J. G., Polinder, H., Kling, W. L., *Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations*, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 18, n. 4, p. 516 - 524, Dezembro. 2003.
- [23] Sloomweg, J. G., Polinder, H., Kling, W. L., *Modeling of large wind farms in power systems Simulations*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, v.1, 2002.
- [24] Slemon, G. R., Straughen, A., *Electric Machines*, Addison Wesley Publishing Co. Inc. Philippines, 1980.

- [25] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc, 1994 – ISBN 0-07-035958-X
- [26] Anderson and Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa State University Press -1977, Vol 1 – ISBN 0-8138-1245-3
- [27] Slemon, G.R., *Magnetoelctronic Devices - Transducers , Transformers, and Machines*, Ed. John Wiley - New York , 1966.
- [28] Ong, Chee-Mun, *Dynamic simulation of electric machinery*, Ed. Prentice Hall. Inc., 1998 – ISBN 0-13-723785-5
- [29] Kimbark, E.W., *Power System Stability: Synchronous Machines*, John Wiley & Sons, Inc., 1968 – ISBN 0-486-61885-4
- [30] SABER Reference Manual, *Model Fundamentals*, Release 5.1, Analogy Inc., Beaverton, OR, 1999.
- [31] SABER Reference Manual, *Guide to Writing MAST Templates*, Release 5.1, Analogy Inc., Beaverton, OR, 1999.
- [32] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*, 2a Ed., Cambridge University Press, 1996.
- [33] Griffiths, D. V., Smith, I. M., *Numerical Methods for Engineers: A Programming Approach*, 1a Ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1991.
- [34] Martins Neto , L., Mendonça, R. G., Silva, R. V. R., Paula, S. C. M., *Three-Phase Induction Generator Feeding a Single- Phase Electrical Distribution System - Time Domain Mathematical Model*. Proceedings of the IEEE - ACEMP 2001 - International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 2001, Kusadasi.
- [35] Eletrobrás, *Centrais Elétricas Brasileiras S.A.*, (Pagina da Web) junho 2007, <http://www.eletrobras.com.br/elb/portal/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>.