

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ANÁLISE E MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FASE DA MÁQUINA DE INDUÇÃO
TRIFÁSICA DE ROTOR BOBINADO OPERANDO SOB DISTÚRBIOS DE TENSÃO**

VINÍCIUS MARCOS PINHEIRO

ABRIL

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE E MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FASE DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA DE ROTOR BOBINADO OPERANDO SOB DISTÚRBIOS DE TENSÃO

Dissertação apresentada por **Vinícius Marcos Pinheiro** à Universidade Federal de Uberlândia para a **obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica** em 28/04/2022 na presença da banca examinadora, composta por:

Prof. **Luciano Coutinho Gomes**, Dr. (UFU) – Orientador

Prof. **Hélio Voltolini**, Dr. (UTFPR)

Prof. **Ivan Nunes Santos**, Dr. (UFU)

Prof. **Marcos Antônio Arantes de Freitas**, Dr. (IFG)

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P654 2022	<p>Pinheiro, Vinícius Marcos, 1994- Análise e modelagem no domínio da fase da máquina de indução trifásica de rotor bobinado operando sob distúrbios de tensão [recurso eletrônico] / Vinícius Marcos Pinheiro. - 2022.</p> <p>Orientador: Luciano Coutinho Gomes. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.226 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho, 1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 771, PPGEELT				
Data:	Vinte e oito de abril de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	11922EEL003				
Nome do Discente:	Vinícius Marcos Pinheiro				
Título do Trabalho:	Análise e modelagem no domínio da fase da máquina de indução trifásica de rotor bobinado operando sob distúrbios de tensão				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Máquinas e acionamentos elétricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: LUCIANO COUTINHO GOMES. Título do projeto: MODELAGEM DINÂMICA NO DOMÍNIO DA FASE E OTIMIZAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE DIRETO DE POTÊNCIA DE GERADORES EÓLICOS BASEADOS NA MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA OPERANDO SOB DISTÚRBIOS DE TENSÃO NO PONTO DE CONEXÃO. Número do processo na instituição executora: Nenhum. Agência financiadora: Nenhum. Número do processo na agência financiadora: Nenhum. Vigência do projeto: Início: 01/03/2019 – Fim: Em aberto.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Hélio Voltolini - UTFPR/Campus Ponta Grossa; Ivan Nunes Santos - FEELT/UFU; Marcos Antônio Arantes de Freitas - IFG/Campus Itumbiara; Luciano Coutinho Gomes - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Luciano Coutinho Gomes, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Coutinho Gomes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/04/2022, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/04/2022, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antônio Arantes de Freitas, Usuário Externo**, em 28/04/2022, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hélio Voltolini, Usuário Externo**, em 28/04/2022, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3509161** e o código CRC **B34C8703**.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE E MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FASE DA MÁQUINA DE INDUÇÃO
TRIFÁSICA DE ROTOR BOBINADO OPERANDO SOB DISTÚRBIOS DE TENSÃO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR VINÍCIUS MARCOS PINHEIRO À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCIANO COUTINHO GOMES, Dr.

Orientador

LUIZ CARLOS GOMES DE FREITAS, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-graduação *stricto sensu* em Engenharia Elétrica da UFU

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, meu irmão e a todos
que me ajudaram ao longo dessa caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes pela oportunidade, pelo apoio, pelos ensinamentos e, sobretudo, pela paciência durante a orientação para a execução do projeto.

Aos meus pais, Elis e Warley, ao meu irmão Wallace, e minha vó Vera (*in memoriam*), pelo apoio incondicional e ensinamentos de vida.

Ao amigo Cássio Alves de Oliveira, que teve participação importante durante a realização do trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE), em especial aos amigos André Mendonça Alzamora, Marcos José de Moraes Filho, Mateus Araújo Beletti, Bruno Lemos Neves e Victor Henrique da Cunha Faria, pelo suporte em diversos momentos em que surgiram dificuldades.

Aos demais professores e funcionários da FEELT, em especial ao Rubens Aparecido Assunção pelo suporte.

Aos demais amigos pelo apoio, incentivo e paciência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a realização do trabalho.

Por fim, a todos que estiveram direta ou indiretamente envolvidos na realização deste trabalho.

*“Os que se encantam com a prática sem a ciência são
como os timoneiros que entram no navio sem timão nem
bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”*

Leonardo da Vinci

RESUMO

Este trabalho vem contribuir para o estudo da máquina de indução trifásica de rotor bobinado acionada como gerador, tanto de forma experimental quanto por meio de simulações computacionais, em condições normais de operação e quando submetida a distúrbios elétricos, tais como: desequilíbrio, distorções harmônicas e variações de tensão. O objetivo principal é verificar a resposta da modelagem matemática da máquina de indução trifásica empregada, denominada por modelo no domínio da fase que, além de não empregar transformações de coordenadas ou de sistemas de referências, contempla os efeitos da saturação magnética. A fim de se atingir o objetivo principal, uma plataforma experimental de ensaios foi desenvolvida para fornecer dados como tensões, correntes e velocidade mecânica, para serem confrontados com aqueles obtidos de forma teórica. Ao final do estudo foi observado uma adequada compatibilidade dos resultados provenientes das simulações computacionais, com aqueles obtidos experimentalmente, para todos os estudos de caso realizados.

Palavras-chave: Distúrbios, domínio da fase, gerador, máquina de indução trifásica, modelo matemático, rotor bobinado.

ABSTRACT

This work contributes to the study of the three-phase wound-rotor induction machine driven as a generator, both experimentally and through computer simulations, under normal operating conditions and when subjected to electrical disturbances, such as: unbalance, harmonic distortions and voltage variations. The main objective is to verify the response of the mathematical modeling of the three-phase induction machine used, called a model in the phase domain, which, in addition to not employing transformations of coordinates or reference systems, includes the effects of magnetic saturation. In order to reach the main objective, an experimental test platform was developed to provide data such as voltages, currents and mechanical speed, to be confronted with those obtained theoretically. At the end of the study, it was observed an adequate compatibility of the results from the computer simulations, with those obtained experimentally, for all the case studies carried out.

Keywords: Disturbance, phase domain, generator, three-phase induction machine, mathematical model, wound rotor.

Lista de figuras.....	xiv
Lista de tabelas.....	xxvi
Lista de quadros.....	xxviii
Lista de abreviaturas e símbolos.....	xxix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos da dissertação.....	2
1.3 Contextualização e justificativas da dissertação.....	3
<i>1.3.1 Distúrbios elétricos em máquinas de indução.....</i>	<i>3</i>
<i>1.3.2 Saturação magnética em máquinas de indução.....</i>	<i>4</i>
<i>1.3.3 Modelagem da máquina de indução no domínio da fase.....</i>	<i>5</i>
1.4 Estrutura da dissertação.....	6
2. MODELAGEM MATEMÁTICA DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA.....	8
2.1 Considerações iniciais.....	8
2.2 Modelo matemático.....	9
<i>2.2.1 Levantamento das características magnéticas da máquina de indução trifásica.....</i>	<i>20</i>
<i>2.2.2 Equações elétricas.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3 Equações mecânicas.....</i>	<i>27</i>
2.3 Implementação computacional do modelo matemático.....	28
2.4 Considerações finais.....	30
3. DESEQUILÍBRIO, DISTORÇÕES HARMÔNICAS E VARIAÇÕES DE TENSÃO.....	31
3.1 Considerações iniciais.....	31
3.2 Desequilíbrio de tensão.....	32
<i>3.2.1 Conceituação do desequilíbrio de tensão.....</i>	<i>32</i>

3.2.2	<i>Componentes simétricas</i>	33
3.2.3	<i>Causas do desequilíbrio de tensão</i>	35
3.3	Distorções harmônicas de tensão	35
3.3.1	<i>Conceituação da distorção harmônica de tensão</i>	36
3.3.2	<i>Causas das distorções harmônicas</i>	38
3.4	Variações de tensão	39
3.4.1	<i>Conceituação das variações de tensão</i>	40
3.4.2	<i>Causas das variações de tensão</i>	40
3.5	Considerações finais	41
4.	BANCADA EXPERIMENTAL	42
4.1	Considerações iniciais	42
4.2	Elementos da bancada experimental	42
4.2.1	<i>Máquina de indução trifásica de rotor bobinado</i>	43
4.2.2	<i>Fonte programável</i>	45
4.2.3	<i>Sistema de condicionamento e aquisição dos sinais de tensão e corrente</i>	48
4.2.3.1	Módulos de condicionamento dos sinais de tensão e corrente	48
4.2.3.2	Módulo SCB-68	51
4.2.3.3	Placa PCI-6229	52
4.2.3.4	LabVIEW	52
4.2.4	<i>Sistema emulador de turbina</i>	55
4.2.5	<i>Banco de resistores</i>	56
4.3	Considerações finais	57
5.	ANÁLISE COM TENSÕES EQUILIBRADAS	59
5.1	Considerações iniciais	59
5.2	Resultados e discussões do modelo no domínio da fase	60
5.2.1	<i>Velocidade de 1850 rpm</i>	60
5.2.2	<i>Velocidade de 1900 rpm</i>	64
5.3	Resultados e discussões do modelo no domínio <i>dq</i>	68
5.3.1	<i>Velocidade de 1850 rpm</i>	68

5.3.2	<i>Velocidade de 1900 rpm</i>	70
5.4	Considerações finais	73
6.	ANÁLISE COM DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	74
6.1	Considerações iniciais	74
6.2	Resultados e discussões	75
6.2.1	<i>Velocidade de 1850 rpm</i>	75
6.2.2	<i>Velocidade de 1900 rpm</i>	80
6.3	Considerações finais	84
7.	ANÁLISE COM DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO	85
7.1	Considerações iniciais	85
7.2	Resultados e discussões	86
7.2.1	<i>Velocidade de 1850 rpm</i>	86
7.2.1.1	Componente fundamental com quinto harmônico.....	86
7.2.1.2	Componente fundamental com sétimo harmônico.....	90
7.2.1.3	Componente fundamental com décimo terceiro harmônico.....	94
7.2.2	<i>Velocidade de 1900 rpm</i>	98
7.2.2.1	Componente fundamental com quinto harmônico.....	98
7.2.2.2	Componente fundamental com sétimo harmônico.....	102
7.2.2.3	Componente fundamental com décimo terceiro harmônico.....	106
7.3	Considerações finais	110
8.	ANÁLISE COM DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO EM CONJUNTO COM DISTORÇÕES HARMÔNICAS	112
8.1	Considerações iniciais	112
8.2	Resultados e discussões	113
8.2.1	<i>Velocidade de 1850 rpm</i>	113
8.2.2	<i>Velocidade de 1900 rpm</i>	117
8.3	Considerações finais	121
9.	ANÁLISE COM VARIAÇÕES DE TENSÃO	122
9.1	Considerações iniciais	122

9.2 Resultados e discussões.....	123
9.2.1 Ensaio com afundamento de tensão	123
9.2.1.1 Velocidade de 1850 rpm.....	123
9.2.1.2 Velocidade de 1900 rpm.....	127
9.2.2 Ensaio com elevação de tensão	131
9.2.2.1 Velocidade de 1850 rpm.....	131
9.2.2.2 Velocidade de 1900 rpm.....	135
9.3 Considerações finais	139
10. CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
10.1 Conclusões finais	140
10.2 Propostas para trabalhos futuros.....	141
Referências.....	143
Apêndice A – Relação de produtividade obtida com o trabalho.....	150
Apêndice B – Conceitos básicos da máquina de indução trifásica.....	151
Apêndice C – Características magnéticas da máquina de indução trifásica.....	158
Apêndice D – Determinação dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina de indução trifásica de rotor bobinado.....	160
Apêndice E – Implementação computacional no MATLAB.....	179

Lista de figuras

Figura 2.1 – Componentes fundamental, terceira e quinta da onda espacial da força magnetomotriz.....	10
Figura 2.2 – Distribuição espacial da força magnetomotriz.....	11
Figura 2.3 – Distribuição resultante de força magnetomotriz e densidade de fluxo magnético.	15
Figura 2.4 – Esboço da interseção da função magnética de ordem fundamental com a curva de magnetização.....	19
Figura 2.5 – Circuito equivalente monofásico relativo à operação em vazio síncrono da máquina de indução.....	20
Figura 2.6 – Diagrama referente às etapas para a determinação das funções harmônicas magnéticas.....	23
Figura 2.7 – Curvas experimentais: (a) F1FM x FM; (b) F3FM x FM.	24
Figura 2.8 – Diagrama referente às etapas de simulação.	29
Figura 3.1 – Decomposição em componentes simétricas.....	33
Figura 3.2 – Diagrama representativo do surgimento de poluição harmônica no sistema elétrico.....	39
Figura 4.1 – Desenho da plataforma experimental implementada.....	43
Figura 4.2 – (a) Máquina de indução trifásica de rotor bobinado empregada no estudo; (b) Escovas da máquina de indução trifásica de rotor bobinado.	44
Figura 4.3 – Fonte programável CSW5550.....	45
Figura 4.4 – Interface de ajuste da fonte programável.	46
Figura 4.5 – Interface de medição numérica da fonte programável.....	46
Figura 4.6 – Interface de medição gráfica da fonte programável.....	47
Figura 4.7 – Dados de leitura da fonte programável armazenados em arquivo de texto.....	47
Figura 4.8 – Composição do sistema de condicionamento e aquisição dos sinais de tensão e corrente.....	48
Figura 4.9 – Módulo individual de condicionamento dos sinais de tensão e corrente.....	49

Figura 4.10 – Conjunto de módulos de condicionamento dos sinais de tensão e corrente.	49
Figura 4.11 – Diagrama do circuito eletrônico do módulo de condicionamento dos sinais de tensão e corrente.....	50
Figura 4.12 – Módulo SCB-68.	51
Figura 4.13 – Placa de aquisição PCI-6229.....	52
Figura 4.14 – Amostra de código elaborado no LabVIEW® para a obtenção dos valores instantâneos de tensão e corrente de estator.....	53
Figura 4.15 – Tela de supervisão desenvolvida no LabVIEW®.....	54
Figura 4.16 – Dados de leitura armazenados em arquivo de texto.....	54
Figura 4.17 – Conversor de frequência CFW09.....	55
Figura 4.18 – Disposição das máquinas elétricas na bancada.	56
Figura 4.19 – Banco de resistores.....	56
Figura 4.20 – Diagrama de ligação do gerador de indução de rotor bobinado conectado ao banco de resistência e à fonte programável.....	57
Figura 5.1 – Interface de ajuste da fonte programável para o ensaio em condições normais de tensão.....	59
Figura 5.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	60
Figura 5.3 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	61
Figura 5.4 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	61
Figura 5.5 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	62
Figura 5.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	63

Figura 5.7 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.	63
Figura 5.8 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo no domínio da fase.	64
Figura 5.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	64
Figura 5.10 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	65
Figura 5.11 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	65
Figura 5.12 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	66
Figura 5.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.	67
Figura 5.14 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.	67
Figura 5.15 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo no domínio da fase.	68
Figura 5.16 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	68
Figura 5.17 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	69

Figura 5.18 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	70
Figura 5.19 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo “dq”.....	70
Figura 5.20 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	71
Figura 5.21 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	71
Figura 5.22 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	72
Figura 5.23 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo “dq”.....	73
Figura 6.1 – Interface de ajuste da fonte programável para o ensaio com desequilíbrio de tensão.....	75
Figura 6.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	76
Figura 6.3 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	76
Figura 6.4 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	77
Figura 6.5 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	77
Figura 6.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	78
Figura 6.7 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	79

Figura 6.8 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.	79
Figura 6.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	80
Figura 6.10 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	80
Figura 6.11 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	81
Figura 6.12 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase; (b) Espectro harmônico das correntes de fase.....	81
Figura 6.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	82
Figura 6.14 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	83
Figura 6.15 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.	83
Figura 7.1 – Interface de geração de forma de onda com harmônicos pela fonte programável.	86
Figura 7.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	87
Figura 7.3 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	87
Figura 7.4 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	88
Figura 7.5 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	88

Figura 7.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	89
Figura 7.7 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	90
Figura 7.8 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.....	90
Figura 7.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	91
Figura 7.10 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	91
Figura 7.11 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	92
Figura 7.12 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	92
Figura 7.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	93
Figura 7.14 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	94
Figura 7.15 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.....	94
Figura 7.16 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	95

Figura 7.17 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônio de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	95
Figura 7.18 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônio de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	96
Figura 7.19 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônio de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	96
Figura 7.20 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.	97
Figura 7.21 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônio de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.	97
Figura 7.22 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônio de décima terceira ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.	98
Figura 7.23 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônio de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	99
Figura 7.24 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônio de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	99
Figura 7.25 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônio de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	100
Figura 7.26 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônio de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	100
Figura 7.27 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.	101

Figura 7.28 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	101
Figura 7.29 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.....	102
Figura 7.30 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	102
Figura 7.31 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	103
Figura 7.32 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	103
Figura 7.33 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	104
Figura 7.34 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	105
Figura 7.35 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	105
Figura 7.36 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.....	106
Figura 7.37 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	106

Figura 7.38 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	107
Figura 7.39 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	107
Figura 7.40 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	108
Figura 7.41 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.	109
Figura 7.42 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de rotor.	109
Figura 7.43 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.	110
Figura 8.1 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	113
Figura 8.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	114
Figura 8.3 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	114
Figura 8.4 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	115
Figura 8.5 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.	116

Figura 8.6 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.	116
Figura 8.7 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.	117
Figura 8.8 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	117
Figura 8.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	118
Figura 8.10 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	118
Figura 8.11 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	119
Figura 8.12 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.	120
Figura 8.13 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.	120
Figura 8.14 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.	120
Figura 9.1 – Interface para edição de transientes da fonte programável.	122
Figura 9.2 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	124

Figura 9.3 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	124
Figura 9.4 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	125
Figura 9.5 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	125
Figura 9.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	126
Figura 9.7 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	126
Figura 9.8 – Gráfico do conjugado eletromagnético com afundamento de tensão relativo à simulação computacional.	127
Figura 9.9 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	128
Figura 9.10 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	128
Figura 9.11 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	129
Figura 9.12 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator...	129
Figura 9.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	130
Figura 9.14 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.....	130
Figura 9.15 – Gráfico do conjugado eletromagnético com afundamento de tensão relativo à simulação computacional.	131
Figura 9.16 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	132
Figura 9.17 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.....	132

Figura 9.18 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	133
Figura 9.19 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	133
Figura 9.20 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	134
Figura 9.21 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.	134
Figura 9.22 – Gráfico do conjugado eletromagnético com elevação de tensão relativo à simulação computacional.	135
Figura 9.23 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.....	136
Figura 9.24 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	136
Figura 9.25 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.	137
Figura 9.26 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.	137
Figura 9.27 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente F1FM; (b) Gráfico da componente F3FM.....	138
Figura 9.28 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.	138
Figura 9.29 – Gráfico do conjugado eletromagnético com elevação de tensão relativo à simulação computacional.	139
Figura B.1 – Máquina de indução trifásica de rotor bobinado e rotor em gaiola de esquilo.	151
Figura B.2 – Representação de um rotor em gaiola de uma máquina de indução trifásica....	152
Figura B.3 – Representação de um rotor bobinado de uma máquina de indução trifásica. ...	152
Figura B.4 – Representação da estrutura laminada do estator.....	153
Figura B.5 – Enrolamentos de estator de uma máquina de indução trifásica.....	153

Figura B.6 – Gráfico do conjugado versus escorregamento.....	156
Figura B.7 – Gráfico do conjugado versus velocidade com alteração da resistência rotórica.	156
Figura B.8 – Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução trifásica de rotor bobinado.....	157
Figura C.1 – Curvas experimentais: (a) $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$; (b) $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$	159
Figura D.1 – Identificação dos terminais dos enrolamentos de estator da MIRB analisada..	162
Figura D.2 – Medição da resistência dos enrolamentos de estator.....	163
Figura D.3 – Gráfico W x Tensão por fase (Vrms).....	166
Figura D.4 – Ligação delta-paralelo dos enrolamentos de estator.....	167
Figura D.5 – Gráfico W x Tensão por fase (Vrms).....	167
Figura D.6 – Gráfico W x Tensão ao quadrado por fase (Vrms).....	168
Figura D.7 – Gráfico da velocidade angular do motor em função do tempo.....	177
Figura E.1 – Estrutura principal da simulação computacional.....	179
Figura E.2 – Subsistema “Gerador de Indução Trifásico”	179
Figura E.3 – Subsistema “Cálculo”	180
Figura E.4 – Subsistema “Fluxo Estator”	181
Figura E.5 – Subsistema “Fluxo Rotor”	181
Figura E.6 – Subsistema “Tensões”	181
Figura E.7 – Estrutura de cálculo do subsistema “Fluxo Estator”	182
Figura E.8 – Estrutura de cálculo do subsistema “Fluxo Rotor”	182
Figura E.9 – Estrutura de cálculo do subsistema “Tensões”	183
Figura E.10 – Estrutura de cálculo do subsistema “Mecânica”	183

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional do modelo no domínio da fase.	62
Tabela 5.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional do modelo no domínio da fase.	66
Tabela 5.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental, à simulação computacional do modelo no domínio da fase e “dq”.....	69
Tabela 5.4 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental, à simulação computacional do modelo no domínio da fase e “dq”.....	72
Tabela 6.1 – Níveis de tensão para o ensaio com desequilíbrio de tensão.	74
Tabela 6.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	78
Tabela 6.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	82
Tabela 7.1 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	88
Tabela 7.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	92
Tabela 7.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	96
Tabela 7.4 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	100
Tabela 7.5 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	104
Tabela 7.6 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	108
Tabela 8.1 – Níveis de tensão para o ensaio com desequilíbrio de tensão em conjunto com distorções harmônicas.	112

Tabela 8.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	115
Tabela 8.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	119
Tabela 9.1 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	125
Tabela 9.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	129
Tabela 9.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	133
Tabela 9.4 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.....	137
Tabela D.1 – Resistência dos enrolamentos de estator empregando-se multímetro digital. ..	161
Tabela D.2 – Medições realizadas no ensaio de determinação da resistência de estator.	164
Tabela D.3 – Resistência média dos enrolamentos de estator obtidas pelo método da tensão e corrente, e referenciadas à temperatura de 25°C.....	164
Tabela D.4 – Leituras obtidas durante o ensaio a vazio.	168
Tabela D.5 – Leituras obtidas durante o ensaio de rotor bloqueado.	170
Tabela D.6 – Parâmetros do circuito equivalente referenciados à temperatura de 25°C.	173
Tabela D.7 – Tempo necessário para a parada completa do eixo da MIRB após o processo de desenergização.	176

Lista de quadros

Quadro 3.1 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	38
Quadro 3.2 – Classificações das harmônicas quanto à sua sequência.....	38
Quadro 3.3 – Classificação das variações de tensão de curta duração.....	40
Quadro 4.1 – Principais características da máquina de indução trifásica de rotor bobinado analisada.....	44
Quadro 4.2 – Possíveis arranjos dos enrolamentos de estator da máquina de indução trifásica de rotor bobinado analisada.	44
Quadro 4.3 – Principais características da fonte programável.	46
Quadro 4.4 – Principais características da placa PCI 6229.....	52
Quadro 4.5 – Dados de placa da máquina de indução trifásica de rotor gaiola.....	55
Quadro C.1 – Valores experimentais das funções harmônicas magnéticas.....	158

Lista de abreviaturas e símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a, b, c	Fases a, b e c de estator
A, B, C	Fases A, B e C de rotor
B	Densidade de fluxo magnético
B_h	Densidade de fluxo magnético referente à ordem harmônica “h”
$B(\theta)$	Distribuição espacial resultante de densidade de fluxo magnético
D	Coefficiente de atrito viscoso
$DTT\%$	Distorção harmônica total de tensão em porcentagem
$DTT_p\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
$DTT_i\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
$DTT_3\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
DFIG	Double Fed Induction Machine
E_2	Tensão sobre o ramo magnetizante
E_i	Força eletromotriz induzida na fase “i”, em valor eficaz
e_i	Força eletromotriz induzida na fase “i”, em valor instantâneo
$FD\%$	Fator de desequilíbrio em porcentagem
f_s	Frequência elétrica do sistema aplicado ao estator
f_r	Frequência elétrica da tensão e corrente induzida no rotor
$fmm(\theta)$	Distribuição espacial resultante de força magnetomotriz
FM	Valor máximo da distribuição espacial de força magnetomotriz
\overline{FM}	Componente máxima resultante da corrente I_{mi}
$F_1(\overline{FM})$	Componente máxima fundamental do fluxo de magnetização
$F_3(\overline{FM})$	Componente máxima de terceiro harmônico do fluxo de magnetização
G_m	Condutância elétrica referente à perda no núcleo
H	Intensidade de campo magnético
h_p	Máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3
h_i	Máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3

h_3	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
i	Corrente elétrica
IEA	International Energy Agency
I_1	Correntes dos enrolamentos de estator
I_2	Correntes dos enrolamentos de rotor
I_{rms}	Corrente em valor eficaz
I_o	Corrente de fase do ensaio a vazio, em valor eficaz
I_L	Corrente de fase do ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz
i_i	Corrente na fase “ i ”, em valor instantâneo
i_{pi}	Corrente na fase “ i ” referente às perdas no ferro, em valor instantâneo
i_{mi}	Corrente de magnetização na fase “ i ” sem as perdas no ferro, em valor instantâneo
I_{efi}	Corrente na fase “ i ”, em eficaz
I_{mi}	Valor máximo da componente fundamental de i_{mi}
J	Momento de inércia das partes girantes
K_a, K_b, K_c	Fatores dos enrolamentos das fases “abc” de estator
K_A, K_B, K_C	Fatores dos enrolamentos das fases “ABC” de rotor
K_{phi}	Fator de redução de passo referente à ordem harmônica “ h ” para a fase genérica “ i ”
K_{dhi}	Fator de distribuição dos enrolamentos referente à ordem harmônica “ h ” para a fase genérica “ i ”
L	Comprimento axial útil da máquina
L_i	Indutância de dispersão da fase “ i ”
L_s	Indutância de dispersão para as fases “abc” de estator
L_r	Indutância de dispersão para as fases “ABC” de rotor
m	Número de fases da máquina analisada
MIRB	Máquina de indução trifásica de rotor bobinado
N	Número de espiras
n_s	Velocidade síncrona em rpm
n_r	Velocidade do rotor, em rpm
N_i	Número de espiras em cada bobina

n_i	Número de ranhuras por polo por fase
n_m	Velocidade mecânica nominal, em rpm.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Número de polos
P_{atrito}	Perdas por atrito
P_h	Perda no núcleo
P_{vazio}	Potência de entrada com a máquina operando a vazio
P_{AV}	Perda por atrito e ventilação
P_o	Potência ativa trifásica para o ensaio a vazio, em valor eficaz
P_L	Potência ativa trifásica para o ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz
P_m	Perdas mecânicas
P_{fei}	Perdas no ferro na fase “i”
P_i	Potência ativa de entrada da fase “i”, em valor eficaz
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
Q_o	Potência reativa trifásica para o ensaio a vazio, em valor eficaz
Q_L	Potência reativa trifásica para o ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz
R_s	Resistência dos enrolamentos de estator
R_r	Resistência dos enrolamentos de rotor
R_m	Resistência representativa das perdas no ferro
R_i	Resistência da fase “i”
R	Raio da circunferência formada pelos pontos médios do entreferro
s	Escorregamento
T_m	Conjugado eletromagnético
T_b	Conjugado da turbina ou conjugado imposto
T_c	Conjugado da carga mecânica
T_r	Conjugado resistente
T	Período
V_1	Tensão nos terminais de estator
V_2	Tensão nos terminais de rotor
V_{rms}	Tensão em valor eficaz
VDC	Tensão em corrente contínua
V_o	Tensão de fase do ensaio a vazio, em valor eficaz
V_L	Tensão de fase do ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz

v_i	Tensão nos terminais da fase “i”, em valor instantâneo
v_i	Tensão terminal na fase “i”, em valor instantâneo
v_{L_s}	Tensão nos terminais do indutor de estator, em valor instantâneo
$v_{a_1}, v_{b_1}, v_{c_1}$	Componentes simétricas de sequência positiva
$v_{a_2}, v_{b_2}, v_{c_2}$	Componentes simétricas de sequência negativa
$v_{a_0}, v_{b_0}, v_{c_0}$	Componentes simétricas de sequência zero
V_h	Tensão harmônica de ordem “h”
VTCD	Varição de tensão de curta duração
W	Potência de entrada a vazio menos a perda $I^2 R_s$
ω_s	Velocidade angular síncrona, em rad/s
ω_r	Velocidade angular do rotor, em rad/s
ω_m	Velocidade mecânica nominal, em rad/s.
X_s	Reatância de dispersão dos enrolamentos de estator
X_r	Reatância de dispersão dos enrolamentos de rotor
X_m	Reatância de magnetização
μ	Permeabilidade magnética
ϕ	Concatenamento de fluxo magnético
ϕ_i	Concatenamento de fluxo magnético total na fase “i”
ϕ_{di}	Concatenamento de fluxo de dispersão na fase “i”
ϕ_{mi}	Concatenamento de fluxo magnetizante na fase “i”
θ_R	Posição angular do eixo do rotor em relação ao estator
θ	Referência angular com origem no eixo da fase “a” de estator
θ_i	Posição genérica das fases de estator e de rotor
$\theta_a, \theta_b, \theta_c$	Posições angulares das fases de estator
$\theta_A, \theta_B, \theta_C$	Posições angulares das fases de rotor
α	Posição do valor máximo da distribuição espacial de força magnetomotriz

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A energia elétrica é um bem essencial e indispensável para a concretização da vida digna do homem contemporâneo. Seu uso começou no século XX, graças aos grandes avanços ocorridos ao longo do século XIX, tanto na área da geração, quanto no desenvolvimento de equipamentos que fazem uso desse recurso (FORRESTER, 2016).

E foi no final do século XIX que surgiu a máquina de indução, muito empregada, naquele primeiro momento, na conversão da energia elétrica em energia mecânica, ou seja, como motor. De acordo com o Engenheiro Chefe da *Westinghouse Electric Company*, Benjamin Garver Lamme (1921), apesar de os créditos pela invenção da máquina de indução serem atribuídos principalmente a Nikola Tesla, diversos pesquisadores, à época, estavam engajados em linhas de pesquisas diversas que circundavam esse equipamento. Segundo Lamme, nomes como Galileo Ferraris, Oliver Blackburn Shallenberger e Elihu Thomson ofereceram importantes contribuições nessa área, que levaria à invenção da máquina de indução em algum momento.

Desde então, com o aumento da demanda por energia elétrica (IEA, 2018) e das preocupações ambientais, a geração distribuída ganhou destaque. Normalmente essa geração faz uso de recursos renováveis, tais como a energia eólica, hídrica, solar, biomassa e geotérmica. Em vista desse contexto, o uso da máquina de indução tornou-se mais relevante em aplicações como gerador, por ser mais adequada para situações em que a fonte de potência mecânica não apresenta boa uniformidade no tempo (TAVARES, 2020).

Em função disso, muito tem-se discutido acerca dos impactos da conexão desse tipo de geração no sistema elétrico e as consequências dos distúrbios do sistema sobre as máquinas responsáveis pela geração. Nesse contexto, encontra-se o gerador de indução de rotor bobinado, objeto de estudo do presente trabalho. Trata-se do gerador mais empregado na matriz eólica sob a topologia do gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) (LI *et al.*, 2017; ZHOU *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019), segundo dados do *Global Wind Energy Council* (GWEC, 2020). Há, ainda, o gerador eólico com variação de resistência rotórica, sendo utilizado com menos frequência que a topologia GIDA, mas que também usa a máquina de indução de rotor bobinado.

1.2 Objetivos da dissertação

Como objetivo fundamental desta dissertação, pretende-se estudar a máquina de indução trifásica de rotor bobinado (MIRB) em operação como gerador, tanto de forma experimental, quanto por meio de simulações computacionais. Nesse sentido, uma plataforma de ensaios foi desenvolvida e implementada, com o propósito de obter de forma precisa e confiável, dados como tensão, corrente e velocidade.

Além disso, foi adotado um modelo matemático da máquina de indução no domínio da fase que contempla os efeitos da saturação magnética, com o propósito de aferir seu desempenho, por meio de simulações computacionais, em relação ao funcionamento real do gerador em condições normais de operação e na ocorrência de distúrbios no sistema elétrico no qual está conectado.

Para atingir os objetivos supracitados, as metas estabelecidas são:

- Compreender o princípio de funcionamento da máquina de indução trifásica de rotor bobinado;
- Desenvolver e implementar uma plataforma física de ensaios;
- Montar os módulos de condicionamento de tensão e corrente;
- Montar o sistema de aquisição de sinais de tensão e corrente;
- Implementar um sistema supervisor;
- Montar um emulador de turbina;
- Definir os equipamentos auxiliares para realização dos ensaios.

Cumpridas as metas necessárias, tornam-se objetivos específicos desta dissertação:

- Realizar os ensaios experimentais necessários para a determinação dos parâmetros elétricos, mecânicos e magnéticos da máquina de indução de rotor bobinado;
- Implementar e simular computacionalmente um modelo matemático da MIRB no domínio da fase que contempla os efeitos da saturação magnética;
- Verificar, por meio de experimentação e em simulação do gerador de indução de rotor bobinado, os efeitos neste quando ocorre distúrbios no sistema elétrico no qual está conectado;
- Destacar contribuições científicas a partir da conclusão do trabalho, por meio de publicações em conferências e periódicos;

- Propor novos estudos a partir do resultado final obtido.

1.3 Contextualização e justificativas da dissertação

Com o propósito de contextualizar e justificar a dissertação em relação aos objetivos propostos, apresenta-se, a seguir, um breve estado da arte acerca do assunto.

1.3.1 Distúrbios elétricos em máquinas de indução

Na maioria dos casos, quando utilizada como gerador, a máquina de indução é conectada de forma direta ao sistema elétrico (MARQUES, 2004), deixando-a suscetível aos distúrbios que se manifestam nesse sistema, tais como: variações de tensão; distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão (SANTOS, 2019). Devido à relevância desse assunto, estudos recentes relacionados a tal temática podem ser encontrados facilmente na literatura, demonstrando, inclusive, que trata-se de uma questão em aberto.

No trabalho apresentado por Araújo (2018) são realizadas análises teóricas do comportamento da GIDA durante afundamentos de tensão equilibrados e desequilibrados, assimetria elétrica resistiva nos terminais de rotor e distúrbios de faltas internas (curto-circuito) nos terminais de rotor e estator. Nele demonstra-se a importância de haver um sistema de controle robusto para essa situação, que garanta o funcionamento adequado do gerador durante perturbações no sistema elétrico. Para isso, o autor analisa o desempenho de duas topologias de controladores, o proporcional-integral (PI) e o linear quadrático com ação integral (LQI). Pelos resultados obtidos, o controle LQI mostrou-se mais adequado, apresentando menores oscilações nas condições de operação em que o gerador foi submetido.

Oliveira (2016) realiza a análise de suportabilidade a afundamentos de tensão em geradores do tipo GIDA. Como é abordado pelo autor e válido até os dias atuais, o que pode ser verificado no submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2021), documento este disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as centrais geradoras eólicas devem continuar operando (sem desconexão), na pior das hipóteses, se um afundamento de tensão de 0,2 p.u.¹ e com duração máxima de 0,5 segundos ocorrer. Ainda, foi constatado no

¹ p.u.: Grandeza em por unidade, uma fração decimal do valor base.

mesmo documento que a operação também deve ser mantida se ocorrer elevações de tensão de até 1,2 p.u e com duração máxima de 2,5 segundos.

Yuan *et al.* (2017) propõem uma metodologia de controle para a GIDA, operando em condições de desequilíbrio de tensão, de maneira a atenuar as oscilações de dupla frequência no conjugado e na potência entregue pelo estator decorrentes desse distúrbio. A estratégia utilizada pelo autor é de utilizar controlador ressonante para atuar sobre as correntes de sequência negativa de rotor, sem precisar realizar a decomposição sequencial de tais correntes. Contudo, para a representação teórica da máquina de indução nesta condição, é empregada a modelagem *dq* decomposta em componentes simétricas.

Em (CHENG *et al.*, 2017) é abordada uma estratégia de controle para a GIDA quando a tensão da rede na qual o gerador está conectado apresenta distorções harmônicas. Segundo os autores, as harmônicas de baixa ordem na tensão, como as de 5ª e 7ª ordem, são as que possuem amplitudes mais elevadas e que necessitam de maior atenção. Em máquinas de indução operando como gerador, essas harmônicas na tensão dão origem a componentes harmônicas nas correntes estatóricas e rotóricas, nas potências ativa e reativa e no conjugado eletromagnético, contribuindo, desse modo, para a poluição harmônica do sistema elétrico.

1.3.2 Saturação magnética em máquinas de indução

Outro aspecto importante em relação às máquinas de indução refere-se à saturação do material ferromagnético que compõe seu núcleo magnético. Segundo Braconnier (2012) e Nascimento (2014), a saturação presente em algumas condições de operação da máquina, enquanto gerador, não pode ser desprezada, em virtude dos problemas que surgem, conforme citados por Souza (2006) e Gomes (2008): aparecimento de harmônicos espaciais no fluxo de magnetização; distorções nas formas de onda de tensão e/ou correntes do estator; distorções nas correntes de rotor e oscilações no conjugado eletromagnético.

Majdoub *et al.* (2017) apresentam uma estratégia para a modelagem da saturação magnética, na presença das perdas no ferro, para estudo do GIDA, em que uma modificação no modelo *dq* é realizada para a inclusão do respectivo efeito. Ressaltam que muitos controles para essa topologia de gerador são efetuados considerando como linear a característica magnética da máquina. É capaz de apresentar boa performance, ainda que possa levar a erros de medições e imprecisão na análise do comportamento dinâmico e, em regime permanente, se a região de saturação for alcançada.

Uma abordagem empregando o modelo neuro-fuzzy é utilizada por José *et al.* (2018), com foco na modelagem das características magnéticas da GIDA. Tal como em Majdoub *et al.* (2017), José *et al.* (2018) enfatizam situações específicas, como a submissão da máquina a sobrecargas ou curtos-circuitos, capazes de gerar saturação do material ferromagnético e mudanças significativas nos parâmetros do gerador. Esses eventos fazem com que os controles baseados no modelo linear não respondam de forma adequada.

1.3.3 Modelagem da máquina de indução no domínio da fase

Visando dispor de um modelo que permita analisar os fenômenos supracitados, esta dissertação emprega, para estudo teórico, a modelagem matemática no domínio da fase da máquina de indução trifásica desenvolvida por Resende (1999) e Bispo (2000). Esse modelo diferencia-se pela não realização de transformações de coordenadas ou de sistemas de referências, tal como ocorre no modelo de eixo direto e em quadratura, também denominado de modelo “*dq*” (ABAD *et al.*, 2014). Para a inclusão da saturação magnética, utiliza-se o conceito de função harmônica magnética, que caracteriza o circuito magnético da máquina, levando em consideração as componentes fundamental e terceiro harmônico da distribuição espacial de fluxo no entreferro.

Resende (1999) emprega a modelagem, primeiramente, para a simulação da máquina como motor, a fim de realizar a validação do modelo, sendo, posteriormente, implementado e analisado o gerador de indução auto excitado com auxílio de capacitores para a operação isolada da rede. Para este último estudo foram adotados capacitores com diferentes níveis de capacitância, e verificado o comportamento dinâmico do gerador alimentando uma mesma carga.

Por sua vez, Bispo *et al.* (2000) aplicam o modelo para verificar a influência da saturação magnética na atuação da máquina como motor para diferentes perfis de carga. Constatou-se boa compatibilidade entre os resultados teóricos-experimentais para as correntes de fase da máquina na ligação estrela e, no que diz respeito às correntes de fase para a ligação em delta, observou-se a presença das componentes de 5^a e 7^a ordem nos ensaios experimentais que não são incluídas na modelagem matemática, resultando em maior deformação da forma de onda de corrente em relação àquela proveniente da simulação computacional.

Outros trabalhos envolvendo o respectivo modelo podem ser encontrados na literatura técnico-científica. Freitas *et al.* (2003) empregam-no para auxiliar na análise dos efeitos da

saturação magnética em motores de indução acionados por conversores. Mostram uma comparação entre o comportamento dinâmico do modelo no domínio da fase com o modelo dq , que considera apenas a componente fundamental da distribuição espacial de fluxo magnético, sendo a saturação incluída a partir de uma indutância de magnetização não linear. Constatou-se que distorções harmônicas e oscilações de conjugado resultantes da saturação são somente visualizadas no modelo no domínio da fase, fornecendo, desse modo, resultados mais realísticos do que a outra metodologia analisada.

Ademais, Gomes (2008) apresenta um estudo sobre o acionamento vetorial do motor de indução com enfraquecimento de campo e maximização do conjugado por ampère, utilizando o respectivo modelo como auxílio. Das diversas contribuições apresentadas por esse autor, destacam-se: a análise dos efeitos da saturação magnética em baixas e altas velocidades, e da redução do fluxo no enfraquecimento de campo, no intuito de fornecer base para projetos de controladores, seja os de corrente, como também os de chaveamento de conversor. Assim, o modelo no domínio da fase mostra-se como uma importante ferramenta para verificar o comportamento da máquina nas situações de operação supracitadas.

Em Wu (2009) é analisado o comportamento do gerador de indução de rotor gaiola conectado à rede, sendo aferido seu funcionamento em diversos valores de velocidade. Constatou-se que, para diferentes valores de velocidade impostas ao gerador, houve compatibilidade entre os resultados teóricos-experimentais.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho foi dividido em 10 etapas distintas, que abordam desde os aspectos históricos iniciais referentes às máquinas de indução; o modelo matemático empregado na realização dos estudos teóricos; os distúrbios a serem analisados, passando pela descrição da plataforma de ensaios implementada, até a apresentação dos resultados obtidos.

O Capítulo 1 trata do surgimento das primeiras máquinas de indução, abordando as vantagens e aplicações da máquina de indução trifásica de rotor bobinado, os objetivos desta dissertação, as justificativas para sua realização e a estrutura de apresentação do conteúdo.

No Capítulo 2 é apresentado o equacionamento referente ao modelo matemático da máquina de indução trifásica no domínio da fase, a determinação das características magnéticas e a estratégia adotada para a simulação computacional.

O Capítulo 3 exhibe as definições, os métodos de quantificação e as principais causas dos distúrbios analisados, sendo eles: desequilíbrios, distorções harmônicas e variações de tensão.

O Capítulo 4 detalha os elementos da plataforma experimental implementada: a MIRB analisada, a fonte programável, o sistema de condicionamento e aquisição dos sinais de tensão e corrente, o emulador de turbina, e os equipamentos auxiliares.

Nos Capítulos 5, 6, 7, 8 e 9 são apresentados os resultados teóricos-experimentais obtidos na análise do gerador de indução de rotor bobinado conectado a um sistema elétrico com tensões equilibradas, desequilibradas, com conteúdo harmônico, com desequilíbrio e distorções harmônicas de forma simultânea, e com variação de tensão, respectivamente.

Por fim, no Capítulo 10 são apresentadas as Conclusões a respeito dos estudos realizados e propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

O Apêndice A mostra a relação de produtividade obtida com este trabalho.

No Apêndice B são apresentados os conceitos básicos relacionados à máquina de indução trifásica, tais como os aspectos construtivos, as características do equipamento, seu princípio de funcionamento, as equações características, bem como a representação do circuito equivalente.

No Apêndice C constam os resultados do ensaio realizado para determinação das características magnéticas da máquina de indução trifásica de rotor bobinado.

O Apêndice D identifica e descreve os ensaios realizados para a obtenção dos parâmetros elétricos da máquina estudada, tendo como base a norma NBR 17094-3:2018, e para a determinação dos parâmetros mecânicos.

Por fim, no Apêndice E está mostrada a estrutura da simulação computacional implementada no MATLAB®.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA

2.1 Considerações iniciais

A modelagem matemática, atrelada à simulação computacional, é uma das ferramentas mais utilizadas, tanto na engenharia, quanto em outras áreas do conhecimento, por permitir a obtenção de resultados cada vez mais precisos em relação a algum problema, em virtude do alto poder de processamento de dados que a tecnologia atual apresenta (MOREIRA, 2015; CARVALHO *et al.*, 2015).

Para que isso seja possível, é necessário o emprego de modelos que representem adequadamente o objeto de estudo, de maneira que seu desempenho se aproxime, ao máximo, do comportamento real.

Neste trabalho é empregada a modelagem da máquina de indução trifásica, que considera tanto os harmônicos espaciais, quanto a saturação magnética. Tal modelo, desenvolvido e validado por Rezende (1999) e Bispo (2000), possui como variáveis de estado os fluxos concatenados das fases de estator e rotor, sem a transformação de coordenadas ou de sistemas de referências, condição esta que permite a visualização mais completa dos fenômenos magnéticos, bem como das variações paramétricas existentes em função da saturação do material magnético (GOMES, 2008).

Para a inclusão da saturação magnética, o modelo emprega o conceito de função harmônica magnética, sendo consideradas as componentes fundamental e de terceiro harmônico da distribuição espacial de fluxo magnético. Essas funções são obtidas de forma experimental, conforme o procedimento descrito no item 2.2.1, não sendo necessários, para isso, dados do projeto da máquina e de manipulação do circuito equivalente. Em relação aos harmônicos espaciais, por considerar nos cálculos que a fase é composta por um enrolamento distribuído e de passo fracionário, esses estão incluídos no modelo.

Dessa forma, este capítulo apresenta, de forma sucinta, o equacionamento referente ao modelo supracitado, com ênfase às equações finais. É necessário enfatizar que a modelagem, em sua plenitude, pode ser encontrada nas obras de Rezende (1999) e Bispo (2000).

Conceitos básicos relacionados à máquina de indução trifásica, tais como os aspectos construtivos, princípio de funcionamento e a descrição do circuito equivalente, são detalhados no Apêndice B.

2.2 Modelo matemático

A tensão nos terminais da máquina de indução para uma fase genérica “ i ” de estator ou de rotor é dada pela soma da queda de tensão nas resistências dos seus enrolamentos devido ao efeito Joule com a tensão gerada decorrente da variação de fluxo magnético.

De forma analítica, tem-se a seguinte relação:

$$v_i = R_i \cdot i_i + \frac{d\phi_i}{dt} \quad (2.1)$$

Onde:

v_i – Tensão nos terminais da fase “ i ”.

R_i – Resistência da fase “ i ”.

i_i – Corrente na fase “ i ”.

ϕ_i – Concatenamento total de fluxo na fase “ i ”.

O concatenamento total de fluxo é dado pela soma das componentes de dispersão ϕ_{di} e de magnetização ϕ_{mi} , ou seja:

$$\phi_i = \phi_{di} + \phi_{mi} \quad (2.2)$$

sendo o fluxo de dispersão, que não leva em consideração a saturação, dado por:

$$\phi_{di} = L_i \cdot i_i. \quad (2.3)$$

Em que:

L_i – Indutância de dispersão da fase “ i ”.

Substituindo (2.3) na Equação (2.2) e isolando o termo da corrente i_i , chega-se à seguinte relação:

$$i_i = \frac{\phi_i - \phi_{mi}}{L_i} \quad (2.4)$$

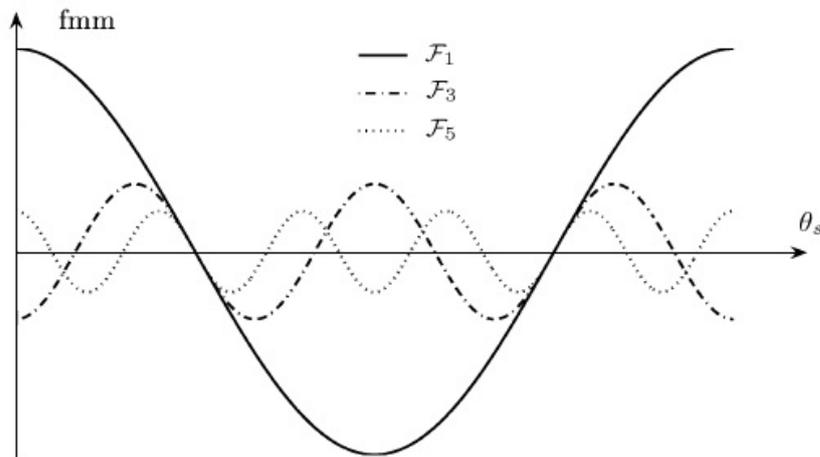
a qual, substituída na Equação (2.1), fornece a relação entre a tensão, o concatenamento de fluxo total e o fluxo de magnetização, representada por (2.5).

$$v_i = R_i \cdot \left(\frac{\phi_i - \phi_{mi}}{L_i} \right) + \frac{d\phi_i}{dt} \quad (2.5)$$

Para solucionar a Equação (2.4), é necessário conhecer o fluxo concatenado magnetizante ϕ_{mi} . Assim, a estratégia adiante está voltada para a determinação dessa grandeza. Contudo, antes de iniciar o desenvolvimento matemático propriamente dito, é necessário deixar alguns conceitos bem definidos, além de apresentar algumas considerações que são adotadas no modelo empregado.

Sabe-se que a distribuição espacial de força magnetomotriz resultante, fmm , da máquina de indução trifásica, é composta por uma componente fundamental expressiva, bem como por componentes harmônicas ímpares de menores amplitudes. A de terceiro e de quinto harmônico são as mais significativas, conforme pode ser visualizado na Figura 2.1, que apresenta a decomposição na série de Fourier da fmm resultante.

Figura 2.1 – Componentes fundamental, terceira e quinta da onda espacial da força magnetomotriz.



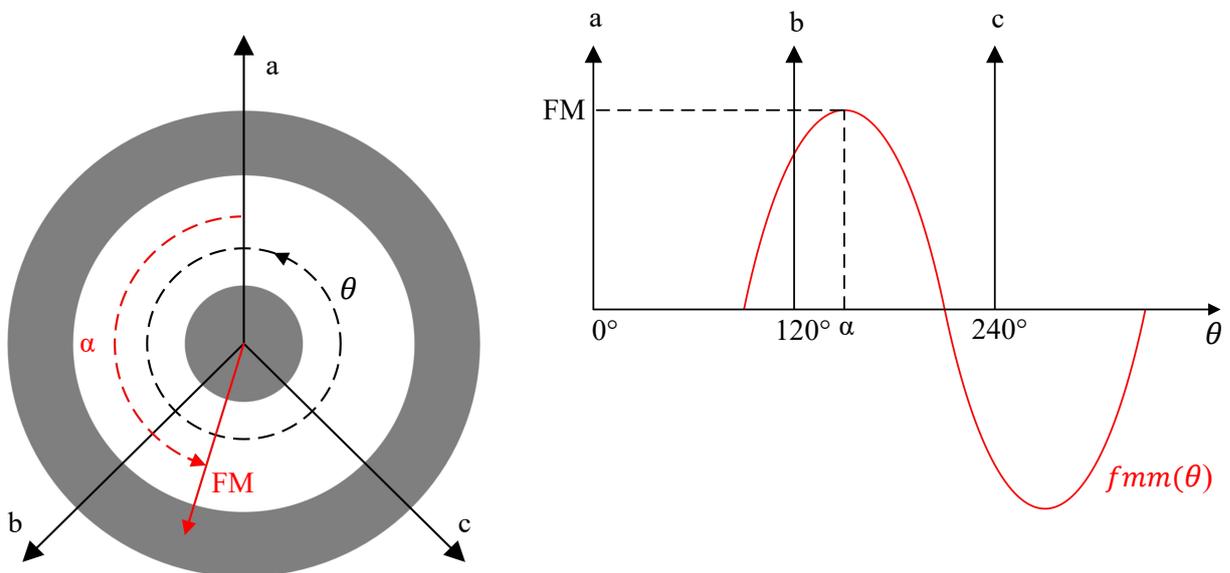
Fonte: (BIM, 2012).

O modelo desenvolvido por Rezende (1999) e Bispo (2000) leva em consideração apenas a componente fundamental da distribuição espacial de força magnetomotriz, tanto para o estator, quanto para o rotor, na determinação do concatenamento de fluxo magnetizante. Além disso, é considerado que toda a fmm resultante está localizada no entreferro da máquina. Essa última consideração parte do pressuposto que a curva de magnetização normal da máquina, a

qual é empregada durante os cálculos, engloba todo o resultado da saturação magnética. Assim, não há distinção do que é pertinente do entreferro ou às regiões ferromagnéticas, permitindo, do ponto de vista do concatenamento de fluxo, considerar ou não toda fmm distribuída apenas no entreferro (REZENDE, 1999).

Por conseguinte, torna-se necessário estabelecer um sistema de referência com capacidade de sustentar o desenvolvimento matemático. Dessa maneira, é adotado um sistema com referência angular θ , que representa a linearização da linha média do entreferro, cuja origem ocorre na fase “a” de estator. Para uma sequência de fase “abc”, obtém-se o sistema apresentado na Figura 2.2, em que α é a posição angular do valor máximo da distribuição espacial da forma magnetomotriz, FM .

Figura 2.2 – Distribuição espacial da força magnetomotriz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando como base o sistema apresentado na Figura 2.2, a distribuição espacial da força magnetomotriz resultante, fmm , pode ser descrita analiticamente da seguinte maneira:

$$fmm(\theta) = FM \cdot \cos(\theta - \alpha) \quad (2.6)$$

Ainda segundo Rezende (1999) e Bispo (2000), quanto à distribuição espacial da força magnetomotriz resultante pode-se escrever conforme abaixo:

$$FM \cdot \cos(\theta - \alpha) = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} 2 \cdot K_i \cdot i_i \cdot \cos(\theta - \theta_i). \quad (2.7)$$

Sendo:

K_i – Fator de enrolamento que leva em consideração a distribuição do enrolamento, como também a redução de passo.

θ_i – Posição angular da fase “ i ”.

Para uma máquina simétrica e com os enrolamentos do rotor referidos ao estator, a seguinte proposição poderá ser realizada:

$$K_a = K_b = K_c = K_A = K_B = K_C = K \quad (2.8)$$

Onde:

K_a, K_b, K_c – Fatores dos enrolamentos das fases de estator.

K_A, K_B, K_C – Fatores dos enrolamentos das fases de rotor.

Assim, reescrevendo a Equação (2.7), de acordo com as premissas da Equação (2.8), tem-se:

$$\frac{FM}{2K} \cdot \cos(\theta - \alpha) = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} i_i \cdot \cos(\theta - \theta_i) \quad (2.9)$$

Fazendo $\frac{FM}{2K} = \overline{FM}$ em (2.9) e utilizando a representação complexa de função trigonométrica, obtém-se:

$$\overline{FM} \angle -\alpha = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} i_i \angle -\theta_i \quad (2.10)$$

Assim, substituindo (2.4) em (2.10), tem-se:

$$\overline{FM}\angle - \alpha = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{\phi_i - \phi_{m_i}}{L_i} \angle - \theta_i \quad (2.11)$$

Separando a Equação (2.11) em termos reais e imaginários, chega-se à seguinte relação:

$$\overline{FM} \cdot \cos(\alpha) - j \cdot \overline{FM} \cdot \text{sen}(\alpha) = a - j \cdot b \quad (2.12)$$

$$a = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \left(\frac{\phi_i - \phi_{m_i}}{L_i} \right) \cdot \cos(\theta_i) \quad (2.13)$$

$$b = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \left(\frac{\phi_i - \phi_{m_i}}{L_i} \right) \cdot \text{sen}(\theta_i) \quad (2.14)$$

Observa-se que a partir da Equação (2.12), é possível separar cada um dos termos da operação, obtendo-se as Equações (2.15) - (2.20), a seguir:

$$FR = \overline{FM} \cdot \cos(\alpha) \quad (2.15)$$

$$FI = \overline{FM} \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (2.16)$$

$$f_R(\phi) = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{\phi_i}{L_i} \cdot \cos(\theta_i) \quad (2.17)$$

$$f_I(\phi) = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{\phi_i}{L_i} \cdot \text{sen}(\theta_i) \quad (2.18)$$

$$f_{m_R} = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{\phi_{m_i}}{L_i} \cdot \cos(\theta_i) \quad (2.19)$$

$$f_{m_I} = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{\phi_{m_i}}{L_i} \cdot \text{sen}(\theta_i) \quad (2.20)$$

Substituindo (2.15) - (2.20) em (2.12), obtém-se as equações reduzidas (2.21) e (2.22) referentes à parte real e imaginária, respectivamente.

$$FR = f_R(\phi) - f_{m_R} \quad (2.21)$$

$$FI = f_I(\phi) - f_{m_I} \quad (2.22)$$

O concatenamento de fluxo magnetizante, ϕ_{m_i} , para uma fase genérica “i”, é expresso por (REZENDE, 1999; BISPO, 2000):

$$\phi_{m_i} = \sum_{h=1,3} F_h(\overline{FM}) \cdot \cos[h \cdot (\alpha - \theta_i)], \quad (2.23)$$

sendo $F_h(\overline{FM})$ a função harmônica magnética, representada pela seguinte equação:

$$F_h(\overline{FM}) = 4 \cdot L \cdot R \cdot N_i \cdot n_i \cdot \frac{1}{h} \cdot B_h \cdot K_{phi} \cdot K_{dhi} \quad (2.24)$$

Onde:

L – Comprimento axial útil da máquina.

R – Raio da circunferência formada pelos pontos médios do entreferro.

N_i – Número de espiras em cada bobina.

n_i – Número de ranhuras por polo por fase.

B_h – Densidade de campo magnético referente à ordem harmônica “h”.

K_{phi} – Fator de redução de passo referente à ordem harmônica “h” para a fase genérica “i”.

K_{dhi} – Fator de distribuição dos enrolamentos referente à ordem harmônica “h” para a fase genérica “i”.

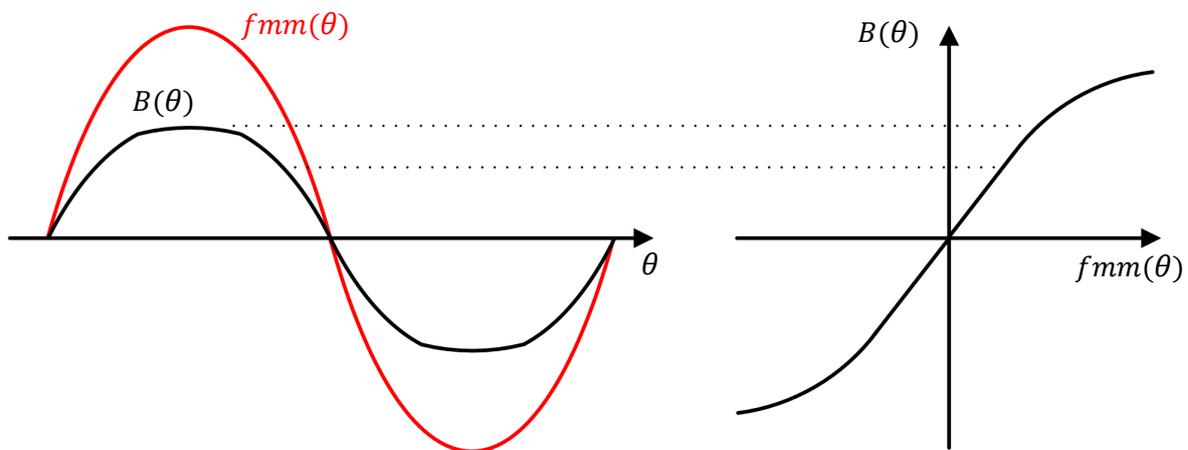
Analisando a Equação (2.24), é possível observar a dependência da função harmônica magnética perante as características construtivas da máquina e da densidade de campo magnético.

Relacionando as Equações (2.23) e (2.24), percebe-se que o concatenamento de fluxo magnetizante é dependente da densidade de fluxo magnético. Isso é crucial para compreender

como a saturação magnética é incluída no modelo matemático, que parte da curva de magnetização normal da máquina representada pela Figura 2.3.

Quando ocorre saturação, a curva de magnetização normal da máquina deixa de ser linear e assume uma forma curva, semelhante à do Gráfico $B(\theta) \times fmm(\theta)$, disposto na Figura 2.3. Diante disso, a densidade de fluxo no entreferro apresenta forma achatada, na qual há predomínio da terceira harmônica entre os harmônicos diferentes da fundamental, e em fase com a fmm .

Figura 2.3 – Distribuição resultante de força magnetomotriz e densidade de fluxo magnético.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Rezende (1999) e Bispo (2000), a decomposição da densidade espacial de campo magnético, na série de Fourier, resulta na Equação (2.25), que dará forma ao concatenamento de fluxo magnetizante, conforme as Equações (2.23) e (2.24).

$$B(\theta) = \sum_{h=1,3} B_h \cdot \cos [h(\theta - \alpha)] \quad (2.25)$$

Exposta esta relação entre a densidade de fluxo magnético e o concatenamento de fluxo magnetizante, é possível prosseguir com o desenvolvimento matemático do modelo.

Por conseguinte, substituindo (2.23) em (2.19) e (2.20), tem-se para a componente fundamental as seguintes relações:

$$f_{m_R} = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{F_1(\overline{FM})}{L_i} \cdot \cos(\alpha - \theta_i) \cdot \cos(\theta_i) \quad (2.26)$$

e:

$$f_{m_I} = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{F_1(\overline{FM})}{L_i} \cdot \cos(\alpha - \theta_i) \cdot \text{sen}(\theta_i); \quad (2.27)$$

e para a componente de terceiro harmônico as seguintes:

$$f_{m_R} = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{F_3(\overline{FM})}{L_i} \cdot \cos(3\alpha - 3\theta_i) \cdot \cos(\theta_i) \quad (2.28)$$

e:

$$f_{m_I} = \sum_{i=a,b,c,A,B,C} \frac{F_3(\overline{FM})}{L_i} \cdot \cos(3\alpha - 3\theta_i) \cdot \text{sen}(\theta_i). \quad (2.29)$$

Considerando as seguintes posições angulares para as fases de estator e rotor:

<i>Estator</i>	<i>Rotor</i>
$\theta_a = 0^\circ$	$\theta_A = \theta_r$
$\theta_b = -120^\circ$	$\theta_B = \theta_r - 120^\circ$
$\theta_c = 120^\circ$	$\theta_C = \theta_r + 120^\circ$

onde θ_r é a posição angular da fase “A” do rotor em relação a fase “a” do estator, que a máquina é simétrica, em que os enrolamentos de estator são iguais, assim como os de rotor, de modo que as indutâncias sejam iguais, ou seja:

$$L_a = L_b = L_c = L_s \quad (2.30)$$

$$L_A = L_B = L_C = L_R \quad (2.31)$$

às quais, substituídas em (2.26), (2.27), (2.28) e (2.29), juntamente com as posições angulares descritas anteriormente, permitem verificar o cancelamento das Equações (2.28) e (2.29), e as Equações (2.26) e (2.27) assumem a seguinte forma:

$$f_{m_R} = \frac{3}{2} \cdot F_1(\overline{FM}) \cdot \left[\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right] \cdot \cos(\alpha) \quad (2.32)$$

$$f_{m_I} = \frac{3}{2} \cdot F_1(\overline{FM}) \cdot \left[\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right] \cdot \sin(\alpha) \quad (2.33)$$

Isolando os termos $\cos(\alpha)$ e $\sin(\alpha)$ em (2.15) e (2.16), respectivamente, e substituindo-os em (2.32) e (2.33), chega-se às seguintes relações:

$$f_{m_R} = \frac{3}{2} \cdot F_1(\overline{FM}) \cdot \left[\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right] \cdot \frac{FR}{\overline{FM}} \quad (2.34)$$

$$f_{m_I} = \frac{3}{2} \cdot F_1(\overline{FM}) \cdot \left[\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right] \cdot \frac{FI}{\overline{FM}} \quad (2.35)$$

Substituindo (2.34) e (2.35) em (2.21) e (2.22) respectivamente, obtém-se:

$$FR = f_R(\phi) - \frac{3}{2} \cdot F_1(\overline{FM}) \cdot \left[\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right] \cdot \frac{FR}{\overline{FM}} \quad (2.36)$$

$$FI = f_I(\phi) - \frac{3}{2} \cdot F_1(\overline{FM}) \cdot \left[\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right] \cdot \frac{FI}{\overline{FM}} \quad (2.37)$$

Isolando o termo $f_R(\phi)$ em (2.36) e $f_I(\phi)$ em (2.37), tem-se:

$$f_R(\phi) = FR \cdot \left[1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{F_1(\overline{FM})}{(\overline{FM})} \cdot \left(\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right) \right] \quad (2.38)$$

$$f_I(\phi) = FI \cdot \left[1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{F_1(\overline{FM})}{(\overline{FM})} \cdot \left(\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right) \right] \quad (2.39)$$

Elevando ao quadrado as Equações (2.38) e (2.39) e, em seguida, somando ambas, encontra-se a seguinte relação:

$$f_R^2(\phi) + f_I^2(\phi) = [FR^2 + FI^2] \cdot \left[1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{F_1(\overline{FM})}{(\overline{FM})} \cdot \left(\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right) \right]^2 \quad (2.40)$$

A Equação (2.40) pode ser reescrita a partir das Equações (2.15) e (2.16), assumindo a seguinte forma:

$$f_R^2(\phi) + f_I^2(\phi) = (\overline{FM})^2 \cdot \left[1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{F_1(\overline{FM})}{(\overline{FM})} \cdot \left(\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right) \right]^2 \quad (2.41)$$

ao se considerar, também, a relação trigonométrica:

$$\cos^2(\alpha) + \text{sen}^2(\alpha) = 1. \quad (2.42)$$

Posteriormente, fazendo

$$f^2(\phi) = f_R^2(\phi) + f_I^2(\phi) \quad (2.43)$$

e:

$$A = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right) \quad (2.44)$$

na Equação (2.41), alcança-se:

$$F_1(\overline{FM}) = \frac{f(\phi)}{A} - \frac{\overline{FM}}{A}. \quad (2.45)$$

Por fim, empregando a relação trigonométrica:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\operatorname{sen}(\alpha)}{\operatorname{cos}(\alpha)} \quad (2.46)$$

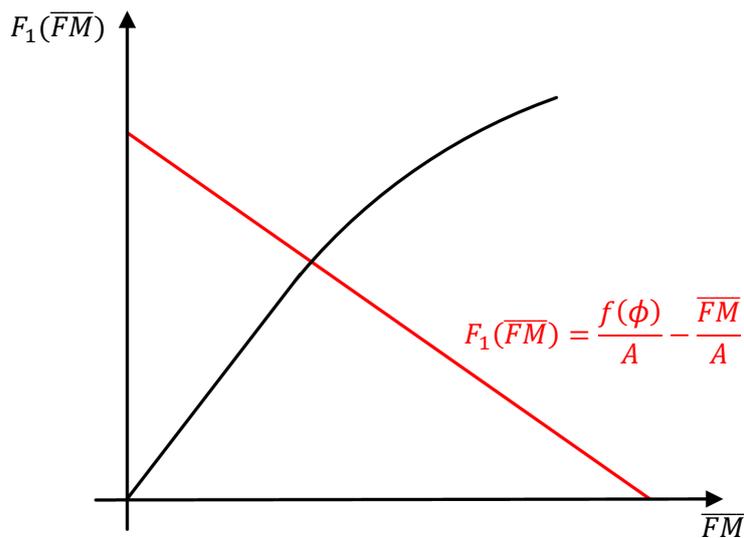
e utilizando nessas as Equações (2.15), (2.16), (2.38) e (2.39), obtém-se a Equação (2.47), que permite determinar o ângulo α .

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{f_I(\phi)}{f_R(\phi)} \quad (2.47)$$

A Equação (2.45) representa a equação de uma reta, cuja interseção com a curva de magnetização normal da máquina ($F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$), Figura 2.4, fornece os valores de $F_1(\overline{FM})$ e \overline{FM} . Com essas duas grandezas definidas, empregando-se interpolação, obtém-se o valor de $F_3(\overline{FM})$.

Assim, de posse de α , $F_1(\overline{FM})$ e $F_3(\overline{FM})$, é possível calcular o fluxo magnetizante, a corrente, e o conjugado eletromagnético. Posteriormente, mais um passo de iteração pode ser realizado, referente a outro instante de operação.

Figura 2.4 – Esboço da interseção da função magnética de ordem fundamental com a curva de magnetização.



Fonte: Elaborado pelo autor.

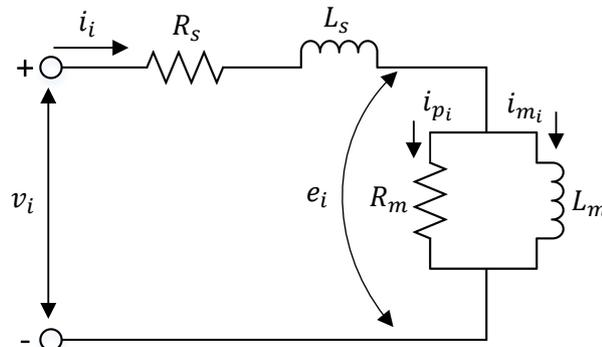
2.2.1 Levantamento das características magnéticas da máquina de indução trifásica

O levantamento das características magnéticas da máquina de indução é de caráter experimental. Por meio de ensaio específico concebido por Rezende (1999) e Bispo (2000), são obtidos os dados necessários para o posterior cálculo das funções harmônicas magnéticas $F_1(\overline{FM})$ e $F_3(\overline{FM})$.

Tal ensaio consiste no acionamento à velocidade síncrona do rotor da máquina de indução em análise. Posteriormente, diversos valores de tensão eficaz são aplicados sucessivamente aos terminais da respectiva máquina até, aproximadamente, 20% acima da tensão nominal, de maneira que um certo nível de saturação seja atingido. Para cada valor de tensão eficaz aplicado, são registrados, por meio de um sistema de aquisição e condicionamento de dados implementado, os valores instantâneos de tensão (v_i), e corrente (i_i), para cada fase “ i ” do estator.

A Figura 2.5 apresenta o circuito equivalente monofásico da máquina de indução para a condição de operação em vazio síncrono, de modo que o equacionamento matemático para a determinação das componentes fundamental e de terceiro harmônico da distribuição espacial de fluxo magnético possa ser obtido.

Figura 2.5 – Circuito equivalente monofásico relativo à operação em vazio síncrono da máquina de indução.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

v_i – Tensão terminal na fase “ i ”, em valor instantâneo.

i_i – Corrente na fase “ i ”, em valor instantâneo.

e_i – Força eletromotriz induzida na fase “ i ”, em valor instantâneo.

i_{p_i} – Corrente na fase “ i ” referente à perda no ferro, em valor instantâneo.

R_s – Resistência do enrolamento de estator.

R_m – Resistência representativa das perdas no ferro.

L_m – Indutância de magnetização.

L_s – Indutância de dispersão do enrolamento de estator.

Logo, sabendo-se que a tensão nos terminais do indutor de estator, v_{L_s} , é proporcional à taxa de variação da corrente que o atravessa, ou seja:

$$v_{L_s}(t) = L_s \cdot \frac{di_i(t)}{dt} \quad (2.48)$$

ao aplicar a 2ª Lei de *Kirchhoff* ao circuito equivalente da Figura 2.5, obtém-se:

$$v_i - e_i - R_s \cdot i_i - L_s \cdot \frac{di_i(t)}{dt} = 0 \quad (2.49)$$

Rearranjando a Equação (2.49) de forma a isolar o termo da força eletromotriz induzida, e_i , alcança-se a Equação (2.50).

$$e_i = v_i - R_s \cdot i_i - L_s \cdot \frac{di_i(t)}{dt} \quad (2.50)$$

O valor da força eletromotriz pode ser determinado na Equação (2.50), uma vez que os dados relacionados à resistência (R_s) e à indutância de estator (L_s), bem como os valores instantâneos da tensão (v_i) e corrente (i_i) são conhecidos. Importante frisar que a corrente (i_i) deve ser decomposta na série de *Fourier*, de maneira a determinar sua derivada com maior precisão.

Calculada a força eletromotriz em cada uma das fases “ i ” de estator, é possível, então, determinar a corrente i_{p_i} , empregando para isso as Equações (2.51) e (2.52).

$$i_{p_i} = \frac{e_i}{R_m} \quad (2.51)$$

$$R_m = \frac{E_i^2}{P_{fe_i}} \quad (2.52)$$

Onde:

E_i – Força eletromotriz na fase “ i ”, em valor eficaz.

P_{fei} – Perda no ferro na fase “ i ”, em valor eficaz.

A perda no ferro é obtida pela seguinte expressão:

$$P_{fei} = P_i - R_s \cdot (I_{efi})^2 \quad (2.53)$$

$$P_i = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v_i \cdot i_i dt \quad (2.54)$$

Onde:

P_i – Potência ativa de entrada da fase “ i ”, em valor eficaz.

I_{efi} – Corrente na fase “ i ”, em valor eficaz.

T – Período.

Logo, determinada a perda no ferro, o cálculo da resistência representativa dessa perda é realizado e, por conseguinte, obtida a corrente i_{pi} .

Como a modelagem desenvolvida por Rezende (1999) e Bispo (2000) não leva em consideração a perda no ferro, é necessário extrair a componente da corrente relacionada a essas perdas (i_{pi}), da corrente a vazio i_i , de tal forma que a corrente resultante seja apenas a componente de magnetização i_{mi} . Analiticamente, tem-se:

$$i_{mi} = i_i - i_{pi} \quad (2.55)$$

Uma vez determinada a componente da corrente de magnetização, pode-se calcular a derivada do fluxo total concatenado, ϕ_i , na fase “ i ” por

$$\frac{d\phi_i}{dt} = v_i - R_s \cdot i_{mi} \quad (2.56)$$

a qual, ao ser integrada, fornece o valor do fluxo concatenado por fase.

Com os concatenamentos de fluxos calculados, o fluxo de magnetização, ϕ_{m_i} , é obtido extraído de ϕ_i a componente do fluxo relacionada à dispersão, ou seja:

$$\phi_{m_i} = \phi_i - L_i \cdot i_{m_i} \quad (2.57)$$

De posse do fluxo de magnetização e da corrente de magnetização, é realizada a decomposição desses sinais na série de Fourier. Dessa forma, os valores máximos das componentes fundamental e de terceiro harmônico do fluxo de magnetização serão as grandezas $F_1(\overline{FM})$ e $F_3(\overline{FM})$, respectivamente.

Com relação à corrente de magnetização, é empregada apenas a componente fundamental, cujo valor máximo é representado por I_{m_i} . A partir dessa grandeza, sua componente máxima resultante, dada por \overline{FM} , é determinada empregando a seguinte relação

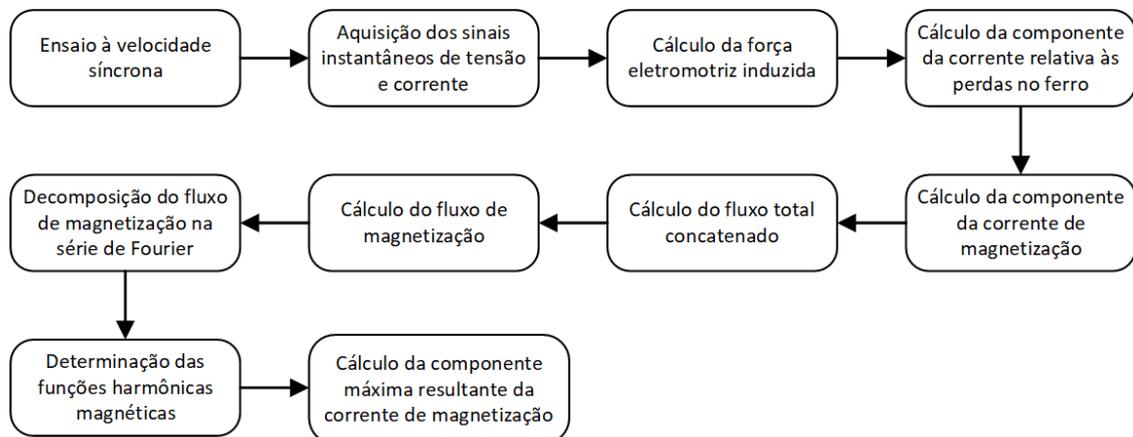
$$\overline{FM} = \frac{3}{2} \cdot I_{m_i} \quad (2.58)$$

para uma máquina cujos enrolamentos são balanceados, assim como o sistema de alimentação empregado.

Nesse sentido, para cada valor de tensão eficaz aplicado aos terminais de estator da máquina, haverá um $F_1(\overline{FM})$, $F_3(\overline{FM})$ e \overline{FM} correspondente.

Na Figura 2.6 é apresentado um fluxograma das etapas para a determinação das funções harmônicas magnéticas.

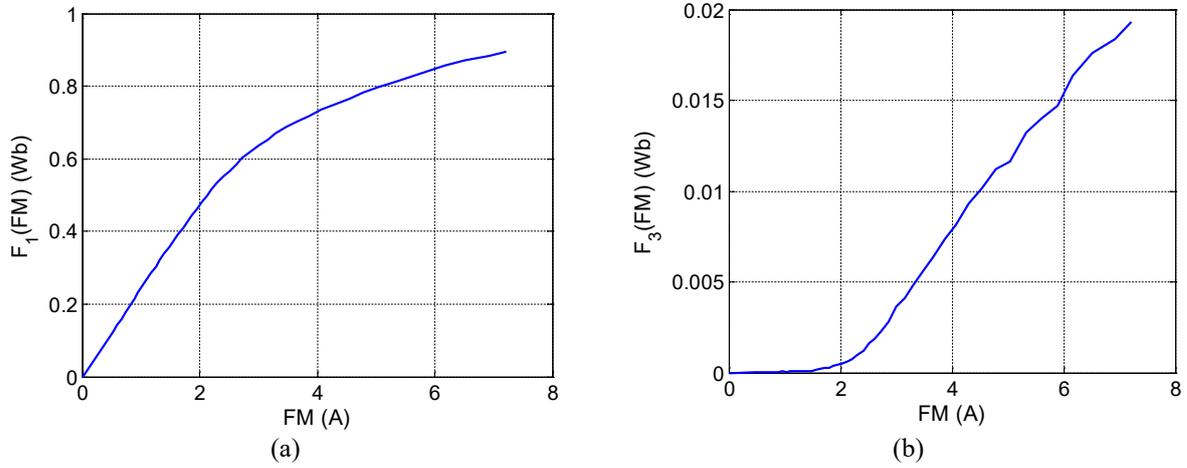
Figura 2.6 – Diagrama referente às etapas para a determinação das funções harmônicas magnéticas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a MIRB utilizada e que será descrita nos próximos capítulos, foram obtidas as curvas que estão ilustradas na Figura 2.7, cujos pontos se encontram no Apêndice C.

Figura 2.7 – Curvas experimentais: (a) $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$; (b) $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$.



Fonte: Dados do autor.

2.2.2 Equações elétricas

A seguir é apresentado o equacionamento referente à parte elétrica da máquina de indução trifásica tanto para os enrolamentos de estator quanto de rotor, quando se é conhecido as tensões de fase.

Primeiramente, de (2.1), tem-se as seguintes expressões:

$$v_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \quad (2.59)$$

$$v_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \quad (2.60)$$

$$v_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \quad (2.61)$$

$$v_A = R_r \cdot i_A + \frac{d\phi_A}{dt} \quad (2.62)$$

$$v_B = R_r \cdot i_B + \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.63)$$

$$v_c = R_r \cdot i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \quad (2.64)$$

Em que:

v_a, v_b, v_c – Tensões de fase de estator, em valor instantâneo.

v_A, v_B, v_C – Tensões de fase de rotor, em valor instantâneo.

i_a, i_b, i_c – Correntes de fase de estator, em valor instantâneo.

i_A, i_B, i_C – Correntes de fase de rotor, em valor instantâneo.

ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c – Fluxo total concatenado por fase de estator, em valor instantâneo.

ϕ_A, ϕ_B, ϕ_C – Fluxo total concatenado por fase de rotor, em valor instantâneo.

As correntes são obtidas a partir de (2.4), tal que:

$$i_a = \frac{\phi_a - \phi_{ma}}{L_s} \quad (2.65)$$

$$i_b = \frac{\phi_b - \phi_{mb}}{L_s} \quad (2.66)$$

$$i_c = \frac{\phi_c - \phi_{mc}}{L_s} \quad (2.67)$$

$$i_A = \frac{\phi_A - \phi_{mA}}{L_r} \quad (2.68)$$

$$i_B = \frac{\phi_B - \phi_{mB}}{L_r} \quad (2.69)$$

$$i_C = \frac{\phi_C - \phi_{mC}}{L_r} \quad (2.70)$$

Onde:

$\phi_{ma}, \phi_{mb}, \phi_{mc}$ – Fluxo magnetizante por fase de estator, em valor instantâneo.

$\phi_{mA}, \phi_{mB}, \phi_{mC}$ – Fluxo magnetizante por fase de rotor, em valor instantâneo.

Para a solução das equações de corrente é necessário determinar os fluxos concatenado e magnetizante. Primeiramente, é calculado esse último fluxo empregando-se (2.23), a partir do qual, adotando o sistema de sequência “abc”, é possível escrever as seguintes expressões:

$$\phi_{m_a} = F_1(\overline{FM}) \cdot \cos(\alpha) + F_3(\overline{FM}) \cdot \cos(3\alpha) \quad (2.71)$$

$$\phi_{m_b} = F_1(\overline{FM}) \cdot \cos(\alpha + 120^\circ) + F_3(\overline{FM}) \cdot \cos(3\alpha) \quad (2.72)$$

$$\phi_{m_c} = F_1(\overline{FM}) \cdot \cos(\alpha - 120^\circ) + F_3(\overline{FM}) \cdot \cos(3\alpha) \quad (2.73)$$

$$\phi_{m_A} = F_1(\overline{FM}) \cdot \cos(\alpha - \theta_R) + F_3(\overline{FM}) \cdot \cos(3\alpha - 3\theta_R) \quad (2.74)$$

$$\phi_{m_B} = F_1(\overline{FM}) \cdot \cos(\alpha - \theta_R + 120^\circ) + F_3(\overline{FM}) \cdot \cos(3\alpha - 3\theta_R) \quad (2.75)$$

$$\phi_{m_C} = F_1(\overline{FM}) \cdot \cos(\alpha - \theta_R - 120^\circ) + F_3(\overline{FM}) \cdot \cos(3\alpha - 3\theta_R) \quad (2.76)$$

Em seguida, substituindo adequadamente (2.65) - (2.70) em (2.59) - (2.64) e rearranjando as equações resultantes de forma a isolar a derivada do fluxo total concatenado, obtém-se as Equações (2.77) - (2.82), as quais são empregadas no cálculo do fluxo total concatenado de cada uma das fases de estator e rotor, sendo os valores das tensões de estator e rotor conhecidos e os fluxos magnetizantes calculados anteriormente.

$$\frac{d\phi_a}{dt} = v_a - \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_a + \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_{ma} \quad (2.77)$$

$$\frac{d\phi_b}{dt} = v_b - \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_b + \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_{mb} \quad (2.78)$$

$$\frac{d\phi_c}{dt} = v_c - \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_c + \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_{mc} \quad (2.79)$$

$$\frac{d\phi_A}{dt} = v_A - \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_A + \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{mA} \quad (2.80)$$

$$\frac{d\phi_B}{dt} = v_B - \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_B + \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{mB} \quad (2.81)$$

$$\frac{d\phi_C}{dt} = v_C - \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_C + \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{mC} \quad (2.82)$$

2.2.3 Equações mecânicas

O conjugado eletromagnético por fase T_i da máquina de indução em função das funções harmônicas magnéticas e da corrente de rotor é determinado da seguinte forma (REZENDE, 1999; BISPO, 2000):

$$T_i = \frac{P}{2} \cdot \sum_{h=1,3} F_h(\overline{FM}) \cdot h \cdot i_i \cdot \text{sen}[h \cdot (\alpha - \theta_i)] \quad (2.83)$$

considerando o enrolamento de dupla camada distribuído em ranhuras ao longo da periferia do rotor, com passo fracionário e P polos.

Assim, o conjugado eletromagnético total, T_m , será igual a soma da contribuição de cada uma das fases A, B, e C de rotor, ou seja:

$$T_m = T_A + T_B + T_C \quad (2.84)$$

Para a sequência de fase “abc”, a Equação (2.84) pode ser reescrita da seguinte forma, tendo como base a Equação (2.83):

$$T_m = \frac{P}{2} \cdot \sum_{h=1,3} F_h(\overline{FM}) \cdot (a + b + c) \quad (2.85)$$

Onde:

$$a = i_A \cdot \text{sen}(\alpha - \theta_R) \quad (2.86)$$

$$b = i_B \cdot \text{sen}(\alpha - \theta_R + 120^\circ) \quad (2.87)$$

$$c = i_C \cdot \text{sen}(\alpha - \theta_R - 120^\circ) \quad (2.88)$$

A equação dinâmica que descreve a parte mecânica para o funcionamento como gerador e como motor são, respectivamente, (2.89) e (2.90).

$$T_B - T_m - D \cdot \omega_R = J \cdot \frac{d\omega_R}{dt} \quad (2.89)$$

$$T_m - T_c - D \cdot \omega_R = J \cdot \frac{d\omega_R}{dt} \quad (2.90)$$

Em que:

T_m – Conjugado eletromagnético.

T_B – Conjugado da turbina ou conjugado imposto.

T_c – Conjugado da carga mecânica.

D – Coeficiente de atrito viscoso.

ω_R – Velocidade angular do rotor.

J – Momento de inércia das partes girantes.

$$\omega_R = \frac{d\theta_R}{dt} \quad (2.91)$$

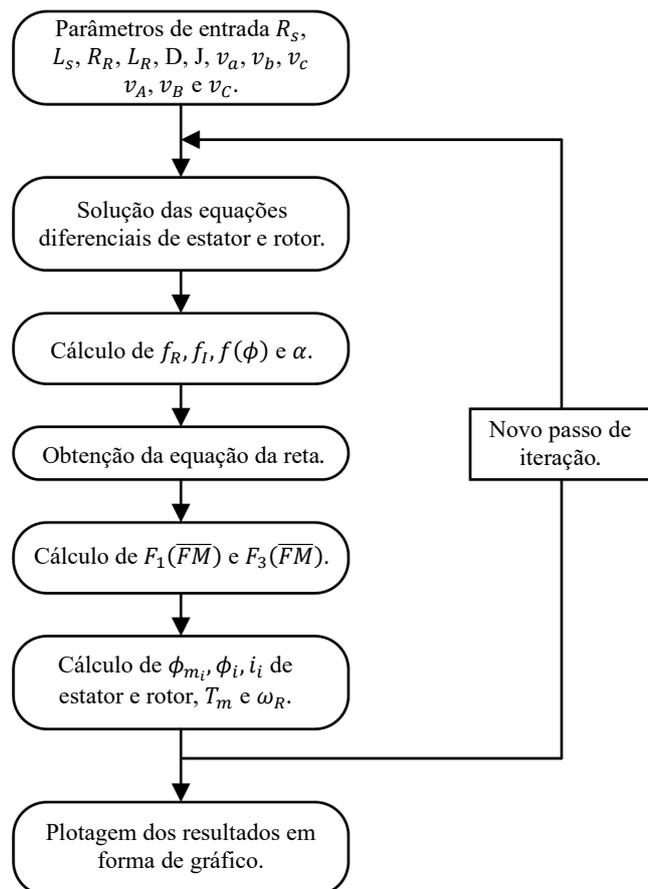
2.3 Implementação computacional do modelo matemático

Para a implementação e simulação computacional do modelo matemático apresentado anteriormente, é empregada a plataforma MATLAB®/Simulink®, *software* desenvolvido pela MathWorks®. No Simulink, a implementação de qualquer sistema é realizada por meio de diagramação gráfica de blocos, existindo uma série de bibliotecas que auxiliam nesse sentido, podendo ser citadas as bibliotecas *Simulink* e *Simscape Electrical*, que foram empregadas no presente trabalho. Na primeira se encontram todos os componentes básicos, tais como blocos

de operação matemática e lógicos, enquanto a segunda é destinada à modelagem e simulação de sistemas eletrônicos e sistemas elétricos de potência.

Em situações em que sejam necessárias, é possível empregar o MATLAB®, em que a programação é realizada por meio de linhas de código, juntamente com o Simulink®. Para isso, existem dois blocos de função no Simulink, sendo eles o *Interpreted Matlab Function* e o *Matlab Function*, que permitem realizar essa interface. Esse recurso foi empregado na modelagem implementada para o cálculo das funções harmônicas magnéticas para cada ponto de operação da máquina no ambiente do MATLAB®, em razão da facilidade de se obter uma função polinomial para a curva de magnetização normal por meio da função *Polyfit*, e em realizar a interpolação da reta dada por (2.45) com a referida curva, utilizando, para isso, a função *Interpl*. As etapas da simulação estão apresentadas no digrama da Figura 2.8. A estrutura da simulação, em sua totalidade, está mostrada no Apêndice E.

Figura 2.8 – Diagrama referente às etapas de simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As equações elétricas e mecânicas que regem o modelo para a operação como gerador ainda podem ser organizadas em uma matriz conforme está apresentado a seguir, tendo como variáveis de estado os fluxos.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\phi_a}{dt} \\ \frac{d\phi_b}{dt} \\ \frac{d\phi_c}{dt} \\ \frac{d\phi_A}{dt} \\ \frac{d\phi_B}{dt} \\ \frac{d\phi_C}{dt} \\ \frac{d\omega_R}{dt} \\ \frac{d\theta_R}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \omega_R \\ \theta_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a + \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_{ma} \\ v_b + \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_{mb} \\ v_c + \frac{R_s}{L_s} \cdot \phi_{mc} \\ v_A + \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{mA} \\ v_B + \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{mB} \\ v_C + \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{mC} \\ \frac{(T_b - T_m)}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.92)$$

2.4 Considerações finais

A modelagem matemática no domínio da fase da máquina de indução trifásica foi apresentada neste capítulo, focando-se nas equações finais, de forma a elucidar a maneira como a saturação magnética é incluída ao modelo. Um outro importante ponto observado é a não utilização de transformações de coordenadas, sendo o modelo trabalhado nas grandezas próprias da máquina, permitindo uma visualização mais completa das variações paramétricas.

Ainda neste capítulo, detalhou-se a maneira como são determinadas às funções harmônicas magnéticas, tanto no que diz respeito ao ensaio experimental para a obtenção dos dados de tensão e corrente, quanto do equacionamento empregado para o cálculo de tais grandezas. Posteriormente foi apresentada as funções obtidas para a máquina analisada, em que foi possível constatar o comportamento não linear do material do circuito magnético a partir de um determinado nível de excitação.

Por fim, foi então apresentada a estratégia adotada para a implementação e simulação computacional e as equações de estado, na forma de uma matriz, que regem o modelo estudado.

3. DESEQUILÍBRIO, DISTORÇÕES HARMÔNICAS E VARIAÇÕES DE TENSÃO

3.1 Considerações iniciais

A rede elétrica está suscetível à ocorrência de fenômenos elétricos indesejáveis com origens diversificadas, que podem acabar por interferir no funcionamento e desempenho dos equipamentos que nela estiverem conectados. Nesse sentido, também é analisado neste trabalho a efetividade do modelo matemático apresentado no Capítulo 2 quando a máquina de indução opera como gerador na presença de desequilíbrios, distorções harmônicas e variações de tensão do sistema elétrico em que está conectado.

Dessa forma, neste capítulo é apresentado a definição dos distúrbios discutidos anteriormente, o equacionamento matemático para quantificação, suas principais origens e os limites estabelecidos para esses fenômenos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia, criada com o propósito de regular o setor elétrico brasileiro. Tais limites definidos pela ANEEL, como constam no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), devem ser observados pelos (ANEEL, 2021):

- Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- Centrais geradoras;
- Distribuidoras;
- Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- Transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT;
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Os limites estabelecidos pela ANEEL são empregados aqui como referência para a realização de estudos de caso tanto de forma teórica, por meio de simulação computacional, quanto prática, empregando, para isso, uma fonte programável para a simulação dos respectivos distúrbios.

3.2 Desequilíbrio de tensão

A seguir são apresentados os conceitos, método de cálculo e as principais causas relacionadas ao desequilíbrio de tensão.

3.2.1 Conceituação do desequilíbrio de tensão

Segundo o PRODIST, em seu módulo 8, o desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença existente nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

De forma analítica, um sistema trifásico, considerando uma sequência de fase “abc”, pode ter as tensões expressas da seguinte maneira:

$$\dot{V}_a = |V_a| \angle 0^\circ V \quad (3.1)$$

$$\dot{V}_b = |V_b| \angle -120^\circ V \quad (3.2)$$

$$\dot{V}_c = |V_c| \angle 120^\circ V \quad (3.3)$$

Assim, se o sistema é equilibrado, $|V_a|$, $|V_b|$ e $|V_c|$ possuem os mesmos valores nas expressões anteriores. Caso contrário, ou seja, se há desequilíbrio de tensão, os módulos e/ou os ângulos apresentarão valores distintos daqueles indicados em (3.1), (3.2) e (3.3) (NEVES, 2014).

Diante disso, é definido no PRODIST o fator de desequilíbrio, grandeza responsável por indicar a porcentagem de desequilíbrio de tensão existente entre as fases de um sistema trifásico. A expressão matemática que permite seu cálculo está apresentada a seguir:

$$FD\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3.4)$$

Sendo:

$FD\%$ – Fator de desequilíbrio em porcentagem.

O coeficiente β em (3.4) pode ser determinado da seguinte forma:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3.5)$$

Onde:

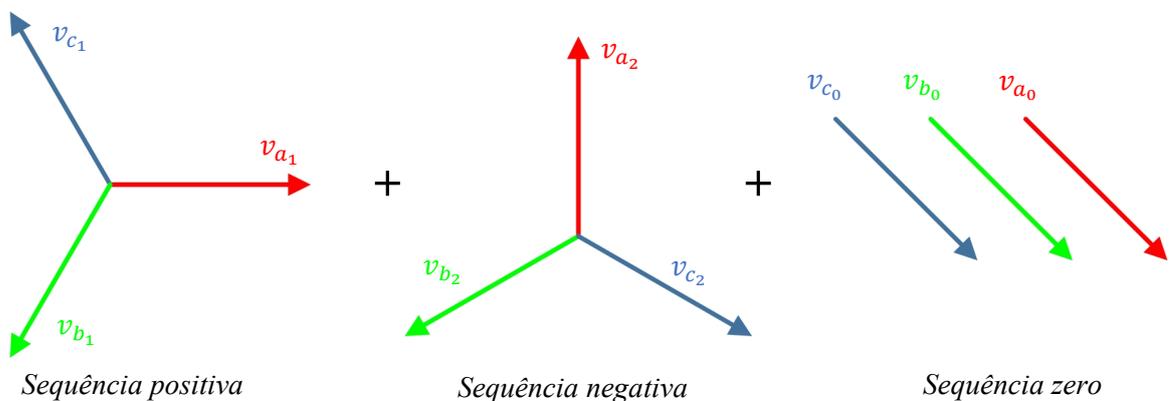
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} – Módulo das tensões de linha, em valor eficaz.

A ANEEL estabelece, para tensões menores que 1kV, o valor máximo de 3% para o fator de desequilíbrio, enquanto que, para tensões maiores que 1kV e menores que 230kV, o limite passa a ser de 2%.

3.2.2 Componentes simétricas

O método de componentes simétricas, desenvolvido por Charles Legeyt Fortescue em 1918 (FORTESCUE, 1918), motivo pelo qual é conhecido, também, como Teorema de Fortescue, contribui, em muito, na análise de sistemas elétricos polifásicos desequilibrados. A ideia central do método é realizar a decomposição seja da tensão ou da corrente em três diferentes componentes que, quando somadas, resultam no elemento original. Na Figura 3.1 está mostrado, de forma hipotética, as componentes simétricas para a tensão.

Figura 3.1 – Decomposição em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As componentes simétricas resultantes da decomposição do elemento original são classificadas da seguinte maneira:

- $v_{a_1}, v_{b_1}, v_{c_1}$ – Componente de sequência positiva que representa a componente do elemento em condições nominais equilibradas.
- $v_{a_2}, v_{b_2}, v_{c_2}$ – Componente de sequência negativa que representa a componente do elemento com sentido de giro inverso ao da componente de sequência positiva.
- $v_{a_0}, v_{b_0}, v_{c_0}$ – Componente de sequência zero que representa a componente não girante do elemento.

O sistema de equações dado por (3.6) relaciona as tensões de um sistema trifásico “abc” com as componentes simétricas da fase “a” (FORTESCUE,1918). O mesmo procedimento é válido para as correntes.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a_0} \\ \dot{V}_{a_1} \\ \dot{V}_{a_2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Em que:

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

Efetuada a transformada inversa de (3.6), tem-se o conjunto de equações que permitem calcular as componentes simétricas relativas à fase “a”:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a_0} \\ \dot{V}_{a_1} \\ \dot{V}_{a_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Com as componentes simétricas da fase “a” determinadas, pode-se obter as das fases “b” e “c” a partir das expressões a seguir:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{b_0} &= \dot{V}_{a_0} & \dot{V}_{c_0} &= \dot{V}_{a_0} \\
\dot{V}_{b_1} &= a^2 \cdot \dot{V}_{a_1} & \dot{V}_{c_1} &= a \cdot \dot{V}_{a_1} \\
\dot{V}_{b_2} &= a \cdot \dot{V}_{a_2} & \dot{V}_{c_2} &= a^2 \cdot \dot{V}_{a_2}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Essa decomposição empregando componentes simétricas permite quantificar, em especial, a componente de sequência negativa da tensão que, no que diz respeito às máquinas de indução trifásicas, acarreta efeitos adversos que serão abordados mais profundamente no estudo de caso envolvendo desequilíbrio de tensão.

3.2.3 Causas do desequilíbrio de tensão

De acordo com Neves (2014), o desequilíbrio de tensão pode surgir, na maioria dos casos, em decorrência dos seguintes fatores:

- Distribuição irregular das cargas monofásicas entre as fases;
- Impedâncias distintas entre os enrolamentos do transformador;
- Transposição incompleta de linhas de transmissão;
- Falhas em banco de capacitores, como o rompimento do fusível de uma das fases;
- Motores elétricos trifásicos com impedâncias desequilibradas;
- Desigualdade nas impedâncias das linhas de transmissão;
- Níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico;
- Fenômenos como interrupções, sub-tensões, sobretensões, afundamentos, etc.

3.3 Distorções harmônicas de tensão

A seguir são apresentados os conceitos, método de cálculo e as principais causas relacionadas às distorções harmônicas de tensão.

3.3.1 Conceituação da distorção harmônica de tensão

Da mesma forma que o desequilíbrio de tensão, as distorções harmônicas são definidas no PRODIST, dessa vez como sendo um fenômeno associado às deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal de frequência fundamental.

Contudo, diferentemente do que acontece com o desequilíbrio de tensão, em que apenas um indicador é empregado para avaliar o respectivo fenômeno, no caso das distorções harmônicas existem quatro indicadores que devem ser respeitados. A definição de cada um, assim como a expressão matemática empregada em seu cálculo, é apresentada a seguir.

➤ Distorção harmônica total de tensão – $DTT\%$

Este primeiro indicador, referente à distorção harmônica total de tensão, corresponde à ação conjunta de todas as frequências harmônicas presentes no sinal de tensão, sendo calculado por uma composição quadrática das distorções harmônicas individuais de todas as ordens harmônicas, como está apresentado pela Equação (3.9).

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3.9)$$

Sendo:

h – Todas as ordens harmônicas de 2 até $hmax$.

V_1 – Tensão fundamental medida.

V_h – Tensão harmônica de ordem h .

➤ Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 – $DTT_p\%$

Este segundo indicador, referente à distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3, corresponde à ação conjunta de todas as frequências harmônicas de ordem par e não múltiplas de 3 presentes no sinal de tensão. A expressão que permite seu cálculo é dada pela composição quadrática das distorções individuais relativas às ordens supracitadas, ou seja:

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3.10)$$

Sendo:

h – Todas as harmônicas pares, não múltiplas de 3.

h_p – Máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

- Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 – DTT_I %

Este terceiro indicador, referente à distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3, corresponde à ação conjunta de todas as frequências harmônicas de ordem ímpar e não múltiplas de 3 presentes no sinal de tensão. A expressão que permite seu cálculo é dada pela composição quadrática das distorções individuais relativas às ordens supracitadas, isto é:

$$DTT_I \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3.11)$$

Sendo:

h – Todas as harmônicas ímpares, não múltiplas de 3.

h_i – Máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

- Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 – DTT_3 %

Por fim, o quarto indicador, referente à distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3, corresponde à ação conjunta de todas as frequências harmônicas de ordem múltiplas de 3 presentes no sinal de tensão. A expressão que permite seu cálculo é dada pela composição quadrática das distorções individuais relativas às ordens supracitadas, em outros termos:

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3.12)$$

Sendo:

h – Todas as harmônicas múltiplas de 3.

h_3 – Máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os limites para as distorções harmônicas totais são divididos em três classes de tensões, como está apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	$V_n \leq 1,0kV$	$1,0kV < V_n \leq 69kV$	$69kV < V_n \leq 230kV$
<i>DTT</i>	10,0%	8,0%	5,0%
<i>DTT_p</i>	2,5%	2,0%	1,0%
<i>DTT_I</i>	7,5%	6,0%	4,0%
<i>DTT₃</i>	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (ANEEL, 2021).

As componentes harmônicas ainda podem ser classificadas quanto à sua sequência, da maneira que está mostrada no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Classificações das harmônicas quanto à sua sequência.

Ordem harmônica	Equação de formação ($h = 0, 1, 2, \dots$)	Sequência
1, 4, 7, 10, ...	$3h + 1$	Positiva
2, 5, 8, 11, ...	$3h + 2$	Negativa
3, 6, 9, 12, ...	$3h + 3$	Zero

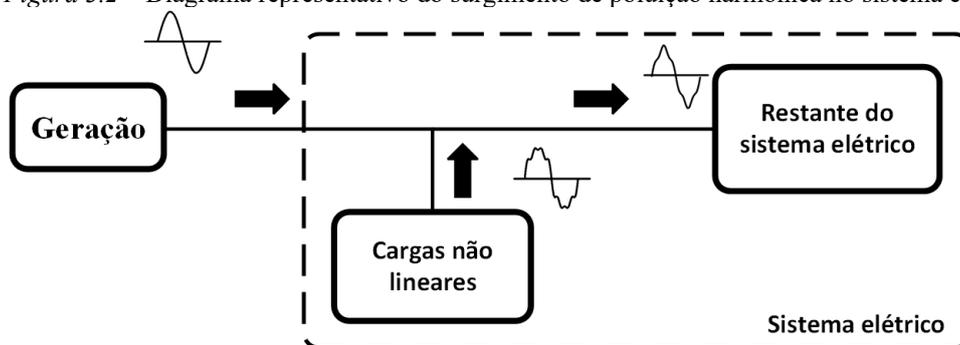
Fonte: (DERAZ *et al.*, 2017).

3.3.2 Causas das distorções harmônicas

A origem da deformação da forma de onda da rede elétrica é associada, geralmente, às chamadas cargas não lineares (DECKMANN *et al.*, 2010). Essa categoria de carga é formada

pelos equipamentos que não apresentam uma relação linear entre a tensão e a corrente. Dessa forma, quando esses dispositivos são conectados à rede, a forma de onda, seja de tensão e/ou corrente, que retorna para o sistema não apresenta forma similar à onda original, resultando na chamada “poluição harmônica”. Com isso, a forma de onda procedente da geração passa a ter agregada à onda de frequência fundamental outras componentes de frequências múltiplas inteiras. No diagrama apresentado na Figura 3.2 é retratado melhor a geração da poluição harmônica.

Figura 3.2 – Diagrama representativo do surgimento de poluição harmônica no sistema elétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma série de equipamentos que se comportam como cargas não lineares podem ser citadas a título de conhecimento, tais como (DECKMANN *et al.*, 2010):

- Transformadores.
- Motores.
- Fornos a arco.
- Cargas eletrônicas.

3.4 Variações de tensão

A seguir são apresentados os conceitos e as principais causas relacionadas às variações de tensão.

3.4.1 Conceituação das variações de tensão

Por fim, o último fenômeno aqui abordado está relacionado com as variações de tensão de curta duração (VTCD). A definição de VTCD consoante o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica diz respeito aos desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com o Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p. u.
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p. u.
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p. u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p. u.
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p. u.
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p. u.

Fonte: (ANEEL, 2021).

3.4.2 Causas das variações de tensão

As principais causas relacionadas aos afundamentos de tensão estão associadas às faltas na rede elétrica e, com menos frequência, à conexão de cargas de grande porte no sistema (SILVA, 2012).

No tocante às elevações de tensão, a saída de cargas de grande potência e a energização de grandes bancos de capacitores estão dentre as principais causas ligadas a esse fenômeno (PAULILLO *et al.*, 2012). Em algumas situações de falta, apesar de ser mais comum a ocorrência de afundamentos, pode-se originar elevações de tensão (SILVA, 2012).

3.5 Considerações finais

De modo a nortear os estudos, mesmo reconhecendo que sejam conceitos já consolidados na área, foram apresentados neste capítulo a conceituação, o método de quantificação, as principais causas e os limites estabelecidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, para: desequilíbrio; distorções harmônicas e variações de tensão. Tais limites, definidos no módulo 8 do PRODIST, são empregados aqui como referência na realização das análises teóricas e dos ensaios experimentais, garantindo a coerência do estudo e preservando a integridade dos equipamentos utilizados.

4. BANCADA EXPERIMENTAL

4.1 Considerações iniciais

A construção da bancada experimental iniciou-se a partir da necessidade de um sistema no qual fosse possível efetuar estudos práticos com a máquina de indução trifásica de rotor bobinado de forma adequada, a fim de realizar ensaios para a aquisição de dados. Ademais, foi projetada para garantir a integridade dos diversos equipamentos utilizados, bem como a segurança das pessoas envolvidas direta ou indiretamente no trabalho desenvolvido.

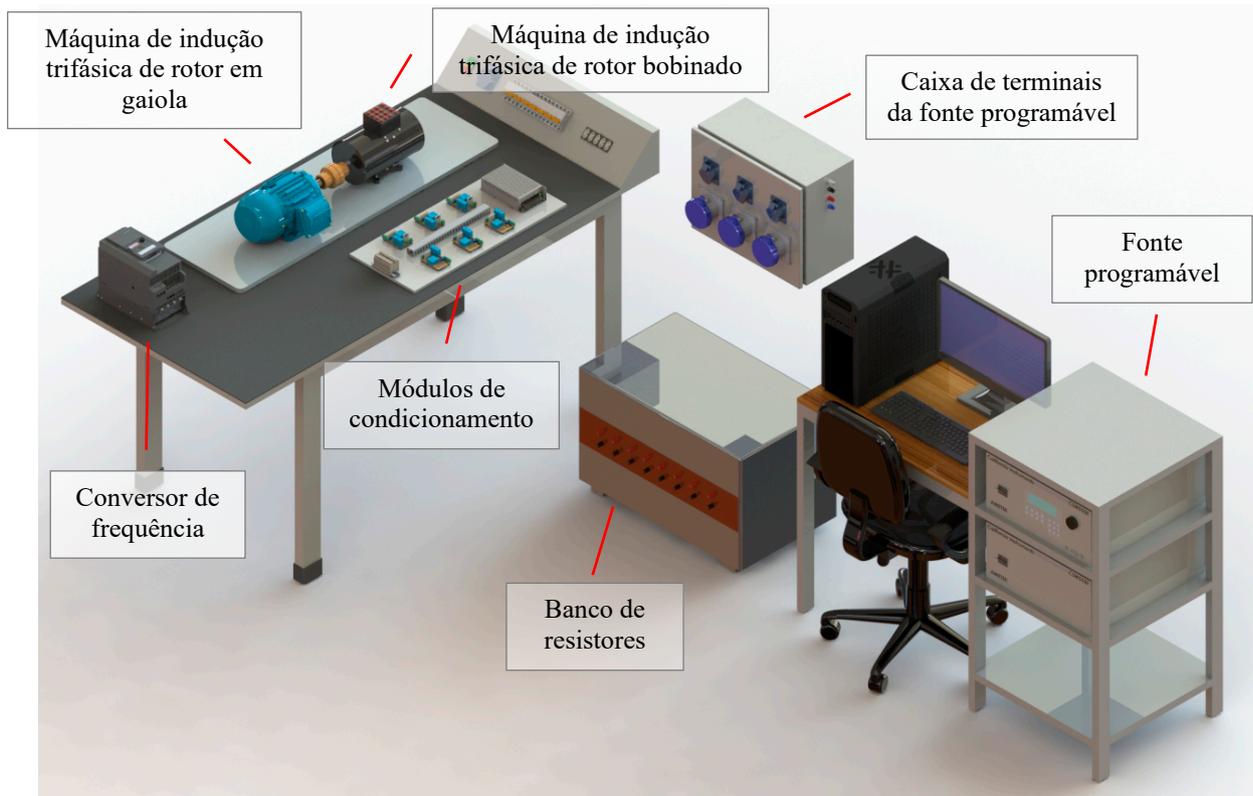
Nesse sentido, com a intenção de aproveitar os recursos oferecidos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em especial do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE), foi implementada a plataforma de ensaios cujos elementos são apresentados neste capítulo.

4.2 Elementos da bancada experimental

A Figura 4.1 apresenta o desenho confeccionado no *software* SolidWorks®, que detalha os equipamentos que compõem a plataforma implementada. Para facilitar a descrição de seu funcionamento, os principais elementos da plataforma podem ser classificados da seguinte forma:

- Sistema motriz: este primeiro sistema diz respeito às máquinas elétricas rotativas que integram a plataforma, sendo elas a máquina de indução trifásica de rotor bobinado e a máquina de indução trifásica de rotor em gaiola.
- Sistema de alimentação e controle das máquinas elétricas rotativas: para o acionamento da máquina de indução de rotor em gaiola é utilizado um conversor de frequência, enquanto que a máquina de rotor bobinado é alimentada por uma fonte programável.
- Sistema de condicionamento e aquisição de dados: diversos equipamentos são empregados para a obtenção e acompanhamento dos dados da máquina de indução de rotor bobinado, dentre os quais podem ser citados: a fonte programável, osciloscópios, tacômetro, multímetros digitais e módulos de condicionamento e aquisição dos sinais de tensão e corrente.

Figura 4.1 – Desenho da plataforma experimental implementada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a finalidade de elucidar o objetivo do emprego de cada equipamento apresentado anteriormente, são descritos a seguir, além das principais funcionalidades, as suas características técnicas fundamentais. Assim, conhecendo as devidas especificações, é possível utilizá-los de maneira adequada e, conseqüentemente, obter dados confiáveis.

4.2.1 Máquina de indução trifásica de rotor bobinado

A máquina de indução trifásica de rotor bobinado analisada, Figura 4.2-(a), é um equipamento de 1 cv que possui doze terminais acessíveis para o estator e três para o rotor (os enrolamentos de rotor são ligados internamente em estrela isolada). As escovas, que permitem o acesso aos terminais dos enrolamentos de rotor, são de carvão mineral e ficam em contato direto com os anéis deslizantes localizados no eixo do rotor, como está apresentado na Figura 4.2-(b).

Figura 4.2 – (a) Máquina de indução trifásica de rotor bobinado empregada no estudo; (b) Escovas da máquina de indução trifásica de rotor bobinado.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais características da máquina bem como os possíveis arranjos de ligação dos enrolamentos de estator estão indicados nos Quadros 4.1 e 4.2, respectivamente. No Apêndice D é apresentada a metodologia empregada para a determinação dos parâmetros elétricos (referentes ao circuito equivalente) e aquela utilizada para obter os parâmetros mecânicos da referida máquina.

Quadro 4.1 – Principais características da máquina de indução trifásica de rotor bobinado analisada.

Máquina de indução trifásica – Rotor bobinado	
Fabricante	MOTRON
Frequência	60 Hz
Potência	1 cv
Velocidade mecânica	1750 rpm
Fator de potência	0,6
Rendimento	76%
Classe de isolamento	H
Regime de serviço	S1

Fonte: Dados do autor.

Quadro 4.2 – Possíveis arranjos dos enrolamentos de estator da máquina de indução trifásica de rotor bobinado analisada.

Possíveis arranjos dos enrolamentos do estator		
Tipo	Tensão (V)	Corrente (A)
Delta-Série	440	1,95
Estrela-Série	760	1,12
Delta-Paralelo	220	3,9
Estrela-Paralelo	380	2,3

Fonte: Dados do autor.

4.2.2 Fonte programável

Com intuito de simular uma rede trifásica em condições normais e também com os distúrbios descritos no capítulo anterior, foi empregada para isso uma fonte programável desenvolvida pela AMETEK Programmable Power®, modelo CSW5550. Esse equipamento, que está apresentado na Figura 4.3, possui dois módulos que fornecem, cada um, uma potência máxima de 1,85 kVA por fase. Além disso, outra característica que a torna fundamental para as análises realizadas em condições normais de operação é o baixo valor da distorção da tensão de saída, sendo de 0,25% para tensões que possuem uma frequência elétrica que esteja no intervalo de 40 a 100 Hz. No Quadro 4.3 estão apresentados outros dados complementares relativos a esse equipamento.

Figura 4.3 – Fonte programável CSW5550.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que tange ao controle e programação da fonte, esses podem ser realizados por meio do display frontal localizado no módulo mestre, conforme indicado na Figura 4.3, ou via *software* instalado em um microcomputador.

Quadro 4.3 – Principais características da fonte programável.

Fabricante	AMETEK Programmable Power
Marca	California Instruments
Modelo	CSW5550
Tensão de saída (CA ou CC)	0-156 V _{rms} (FN) / 0-312 V _{rms} (FN)
Corrente de saída	32,16 A (por fase)
Frequência de saída	CC, 40-5000 Hz

Fonte: Dados do autor.

O *software* permite maior praticidade quando se necessita de um sistema de supervisão, visto que possui diversas interfaces, incluindo a tela principal de programação (Figura 4.4) e as telas de leitura de dados numéricos (Figura 4.5) ou gráficos (Figura 4.6).

Figura 4.4 – Interface de ajuste da fonte programável.

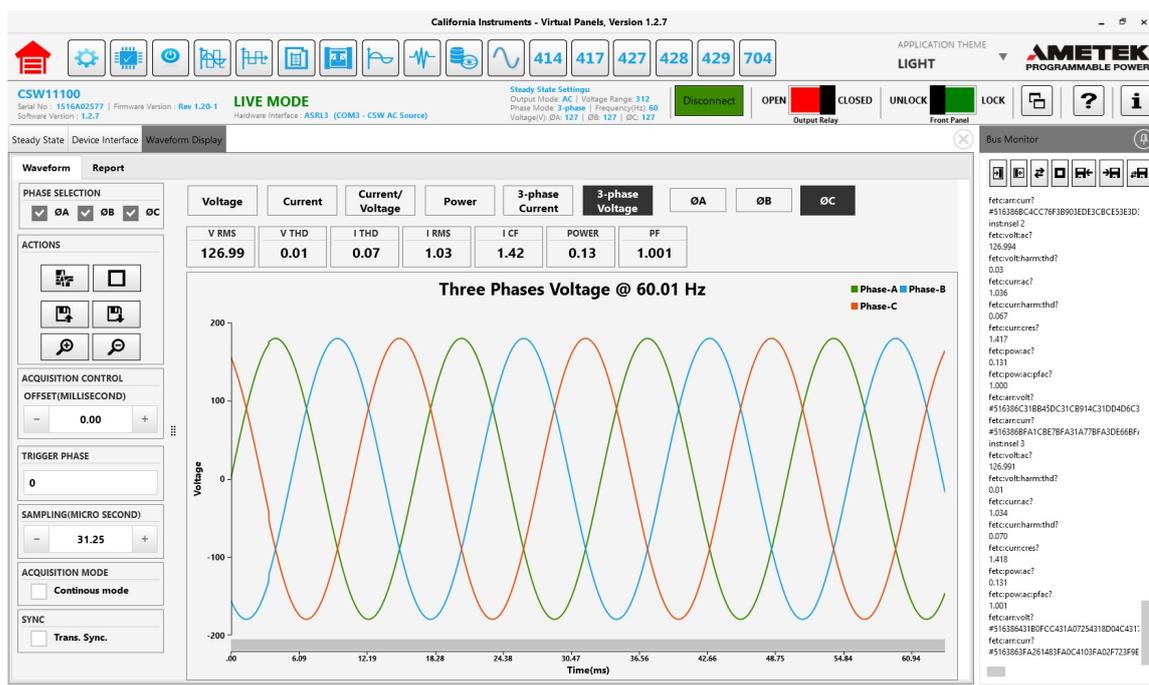
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.5 – Interface de medição numérica da fonte programável.

<input checked="" type="checkbox"/> VOLTAGE (VRMS)	<input checked="" type="checkbox"/> CURRENT (ARMS)
ØA 126.99 ØB 127 ØC 127	ØA 9.06 ØB 8.96 ØC 8.78
<input checked="" type="checkbox"/> PHASE (Ø)	<input checked="" type="checkbox"/> POWER (KW)
ØA 0 ØB 240.3 ØC 120.5	ØA 0.93 ØB 0.9 ØC 0.9
<input checked="" type="checkbox"/> APPT.POWER (KVA)	<input checked="" type="checkbox"/> POWER FACTOR
ØA 1.151 ØB 1.138 ØC 1.115	ØA 0.8 ØB 0.79 ØC 0.81
<input checked="" type="checkbox"/> PEAK CURRENT (A)	<input checked="" type="checkbox"/> CREST FACTOR
ØA 15.5 ØB 15.37 ØC 14.78	ØA 1.71 ØB 1.72 ØC 1.68
<input checked="" type="checkbox"/> FREQUENCY	LINE TO LINE VOLTAGES
60.01	VAC(L-L) VAB(L-L) VBC(L-L)
	219,96 219,96 219,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.6 – Interface de medição gráfica da fonte programável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além do mais, os dados mensurados podem ser armazenados automaticamente em arquivo de texto, com está mostrado na Figura 4.7. Também é possível, pelo *software*, configurar o tempo de atualização desses dados a serem armazenados.

Figura 4.7 – Dados de leitura da fonte programável armazenados em arquivo de texto.

The screenshot shows a text file window titled 'Medidas - Bloco de Notas'. The file content is as follows:

```
Date : 07/05/2021 14:16:46 , Frequency(Hz) : 60
```

Measurement Type	ØA	ØB	ØC
Voltage (Vrms)	127	127	127
Current (Arms)	1.03	1.03	1.03
Current (Adc)	0	0	0
Phase (Ø)	0	240.3	120.5
Power (kW)	0.13	0.13	0.13
Appt.Power (kVA)	0.131	0.131	0.131
Power Factor	1	1	1
Peak Current (A)	1.46	1.46	1.46
Crest Factor	1.42	1.42	1.42
Voltage (Vdc)	0	0	0

The bottom of the window shows the cursor position at 'Ln 1, Col 1', a zoom level of '100%', and encoding settings 'Windows (CRLF)' and 'UTF-8'.

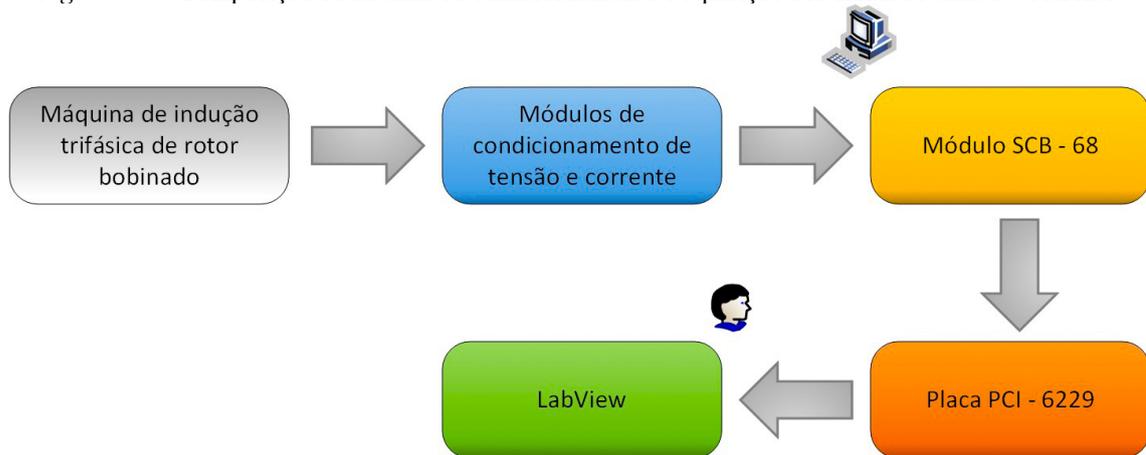
Fonte: Elaborado pelo autor.

A fonte utilizada apresenta um defeito no controlador interno de tensão que afeta o desempenho do dispositivo quando a faixa de tensão que varia de 0 a 312 Vrms é selecionada. Esse problema faz com que ocorra a saturação da tensão, sendo possível empregar, assim, somente o arranjo delta-paralelo dos enrolamentos de estator da MIRB.

4.2.3 Sistema de condicionamento e aquisição dos sinais de tensão e corrente

Durante o acionamento da máquina de indução trifásica de rotor bobinado é necessário realizar a aquisição dos sinais instantâneos de tensão e corrente. Dessa forma, um sistema de condicionamento e aquisição de dados é essencial para mensurar, de maneira adequada, essas grandezas elétricas. A Figura 4.8 apresenta o diagrama em blocos do sistema, e as etapas de aquisição e condicionamento serão detalhadas nas próximas seções.

Figura 4.8 – Composição do sistema de condicionamento e aquisição dos sinais de tensão e corrente.

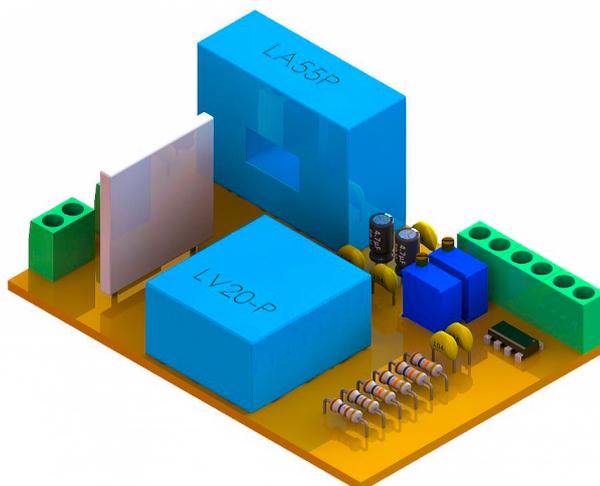


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.1 Módulos de condicionamento dos sinais de tensão e corrente

Para realizar o condicionamento dos sinais instantâneos de tensão e corrente da máquina de indução trifásica de rotor bobinado são empregados módulos individuais de condicionamento, como o que está apresentado na Figura 4.9. Esses módulos são fundamentais para adequar os níveis da tensão e corrente mensurados, de tal forma que possam ser adquiridos pela placa de aquisição PCI-6229. Outra importante função dos módulos é de filtrar sinais de altas frequências, de modo que ruídos e efeitos de *aliasing* não provoquem interferências significativas nas medições.

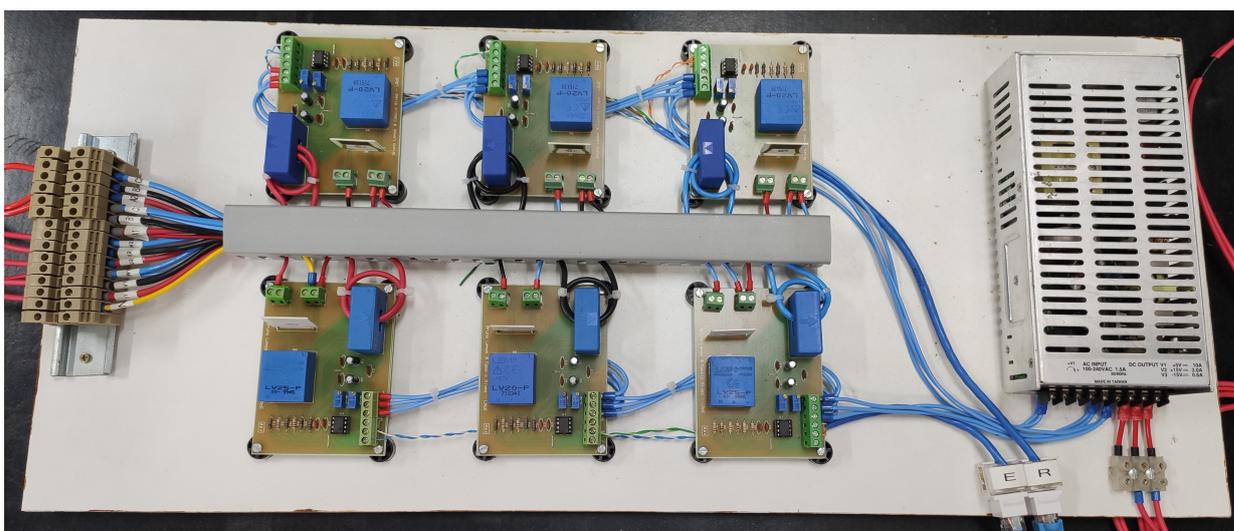
Figura 4.9 – Módulo individual de condicionamento dos sinais de tensão e corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O conjunto de módulos de condicionamento está apresentado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Conjunto de módulos de condicionamento dos sinais de tensão e corrente.



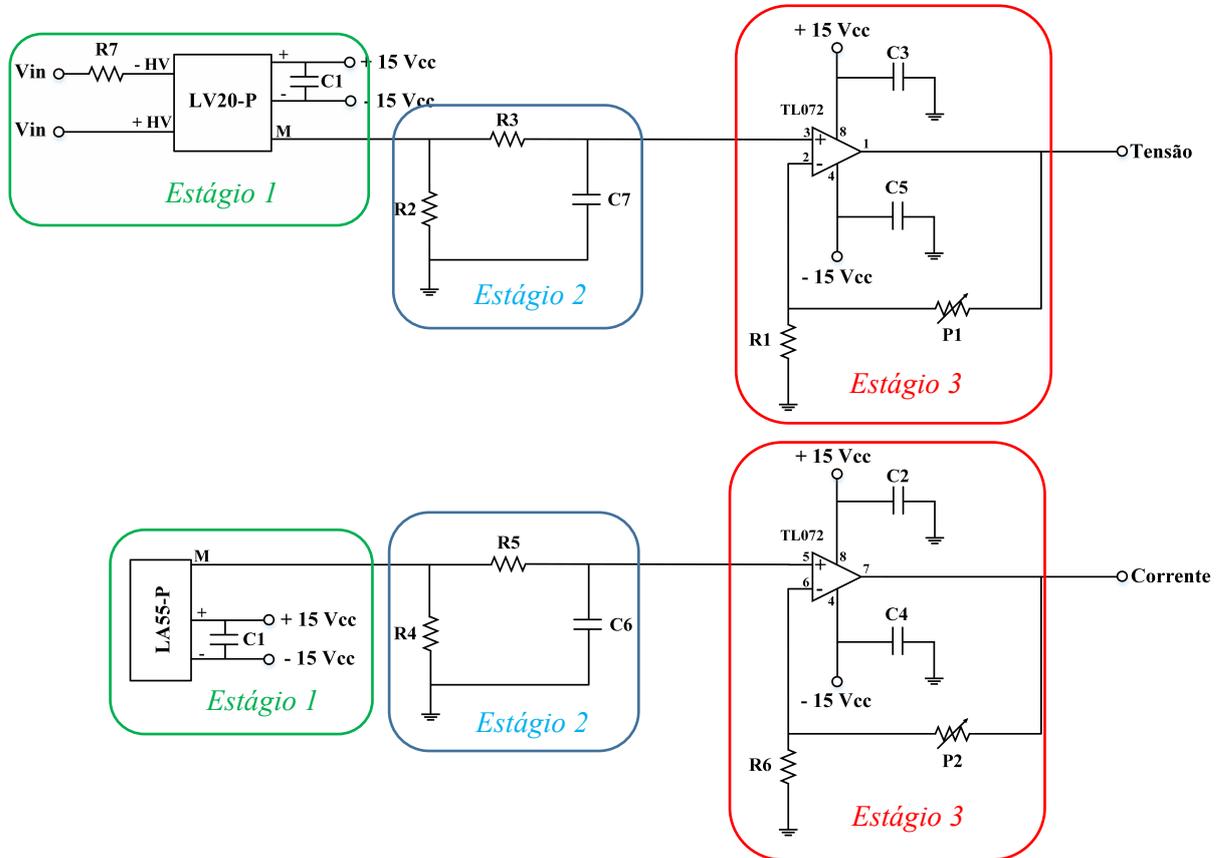
Fonte: Elaborado pelo autor.

O condicionamento do sinal de tensão é realizado por meio do sensor LV20P da fabricante LEM®, sendo possível mensurar valores de tensão que variem no intervalo de 10 a 500 Vrms. No que tange à corrente, é empregado o sensor LA55P também da fabricante LEM®, o qual permite mensurar correntes de até 50 Arms. Ambos os sensores funcionam segundo o princípio do efeito “hall”, em que a saída é um sinal de tensão.

Logo, um circuito eletrônico, cujo projeto está apresentado na Figura 4.11, é necessário para enquadrar tanto o sinal de tensão quanto de corrente proveniente dos sensores no intervalo

de tensão que varia de -10 V a +10 V, correspondente à faixa de operação da placa de aquisição, que será descrita mais adiante.

Figura 4.11 – Diagrama do circuito eletrônico do módulo de condicionamento dos sinais de tensão e corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.11 tem-se que:

- Resistores - R1, R3, R5, R6 – 10 k Ω ;
R2, R4 – 100 Ω ;
- Potenciômetros - P1, P2 – 50 k Ω ;
- Capacitores de cerâmica - C1, C3, C5, C6, C7 – 100 nF;
- Capacitores eletrolíticos - C2, C4 – 4,7 μ F;
- Resistor de precisão - R7 – 50 k Ω .

O diagrama ilustrado na Figura 4.11 é formado por dois circuitos individuais, um para a tensão e outro para a corrente. Esses, por sua vez, são formados, cada um, por três circuitos interligados, os quais foram designados aqui por estágios e estão indicados na respectiva figura. Esses estágios desempenham funções diferentes, tal que:

Estágio 1 – Entrada dos transdutores de corrente e tensão: estágio composto pelos transdutores de tensão e corrente, cuja entrada é dimensionada, e pode ser ajustada, de acordo com os níveis das grandezas que serão adquiridas.

Estágio 2 – Estágio do filtro passa-baixa: nesta etapa o sinal amostrado no primeiro estágio, seja de tensão quanto de corrente, é direcionado a um filtro passa-baixa, de forma a limitar a frequência de aquisição do sinal mensurado, o que permite que sinais que não estejam relacionados à faixa de frequência desejada sejam atenuados. O filtro foi projetado de modo que sua frequência de corte seja de 1,6 kHz.

Estágio 3 – Estágio de condicionamento final: este último estágio, que está presente no circuito da tensão e da corrente, tem por objetivo condicionar os sinais em uma faixa de tensão que varia de -10 V a 10 V, correspondente à faixa de operação da placa de aquisição. Para isso, é empregado o amplificador operacional TL072, que possui alimentação de ± 15 V, semelhante à dos sensores de tensão e corrente.

4.2.3.2 Módulo SCB-68

O módulo SCB-68, Figura 4.12, é um bloco de terminais responsável por realizar a interface entre os módulos de condicionamento e a placa de aquisição PCI-6229. Esse dispositivo conta com 68 terminais, sendo a tensão máxima de trabalho de 30 Vrms/ 60 VCC. Além disso, o módulo possui sistema de proteção e permite a filtragem RC.

Figura 4.12 – Módulo SCB-68.

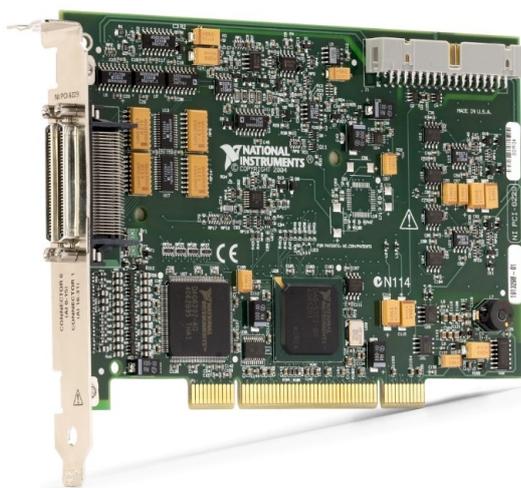


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.3 Placa PCI-6229

Para que os sinais de tensão e corrente possam ser manipulados no *software* LabVIEW® é necessário, primeiramente, realizar a conversão analógica/digital dos dados mensurados pelos módulos de condicionamento. Nesse sentido, é utilizada uma placa de aquisição PCI-6229 da National Instruments®, Figura 4.13, a qual é instalada internamente em um microcomputador por meio do barramento *PCI Express*.

Figura 4.13 – Placa de aquisição PCI-6229.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais especificações da placa acima estão apresentadas no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Principais características da placa PCI 6229.

Fabricante	National Instruments®
Modelo	PCI 6229
Entradas analógicas	32
Entradas digitais	16
Taxa de amostragem	250 kb/s
Resolução do conversor A/D	16 bits

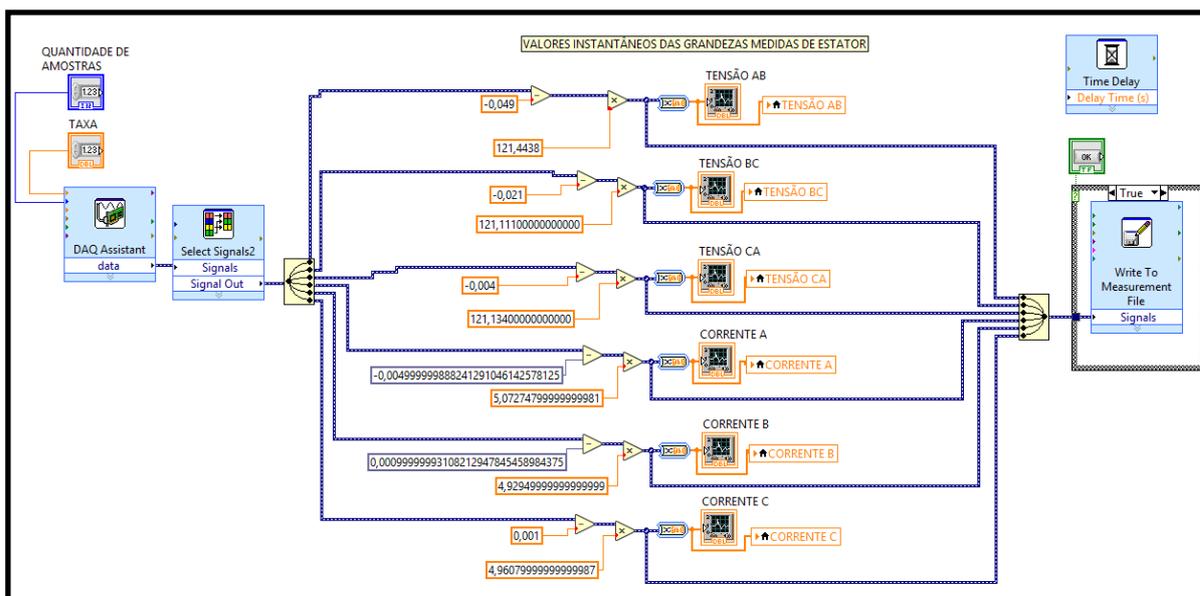
Fonte: Dados do autor.

4.2.3.4 LabVIEW

Com o objetivo de realizar o tratamento e a manipulação dos sinais mensurados, é empregado o *software* LabVIEW®, sendo esse um sistema desenvolvido pela National

Instruments® baseado em linguagem de programação gráfica. Por meio da sua interface de diagrama de blocos, conforme exemplo apresentado na Figura 4.14, é efetuada a implementação do código gráfico do programa.

Figura 4.14 – Amostra de código elaborado no LabVIEW® para a obtenção dos valores instantâneos de tensão e corrente de estator.

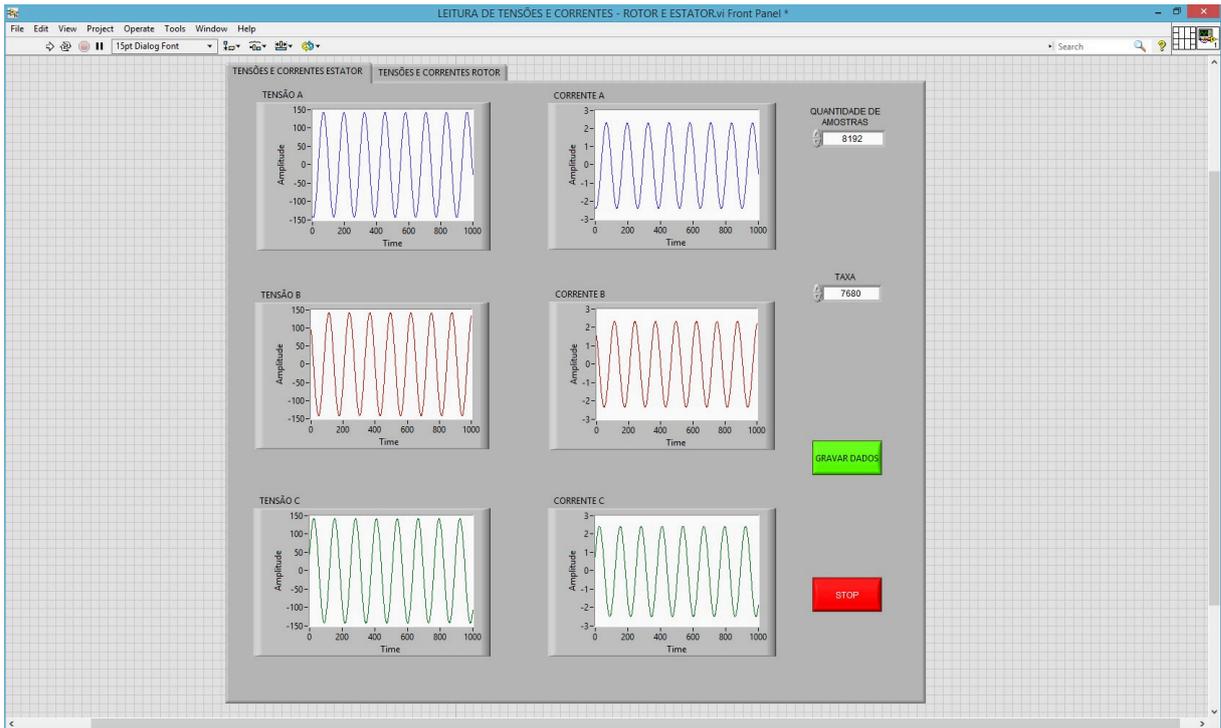


Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, torna-se possível a apresentação na segunda interface, denominada de painel frontal, dos resultados oriundos do diagrama de blocos. Essa segunda interface é composta por ferramentas como gráficos, mostradores digitais, entre outros indicadores animados, que auxiliam na interpretação dos dados tanto por parte do programador do código, quanto daquele que for responsável por sua utilização.

Na Figura 4.15 está apresentado o painel frontal elaborado para a apresentação dos dados instantâneos de tensão e corrente, além de estarem indicadas as principais funções utilizadas, tais como gráficos, mostradores digitais e botões. Uma funcionalidade que está apresentada na Figura 4.15, e que merece atenção especial, é a possibilidade em indicar a taxa de amostragem, bem como a quantidade de amostras que o usuário necessita. Esse recurso é de grande importância para a posterior manipulação dos dados adquiridos em diferentes plataformas, a exemplo do MATLAB®, que foi empregado em outras etapas do estudo.

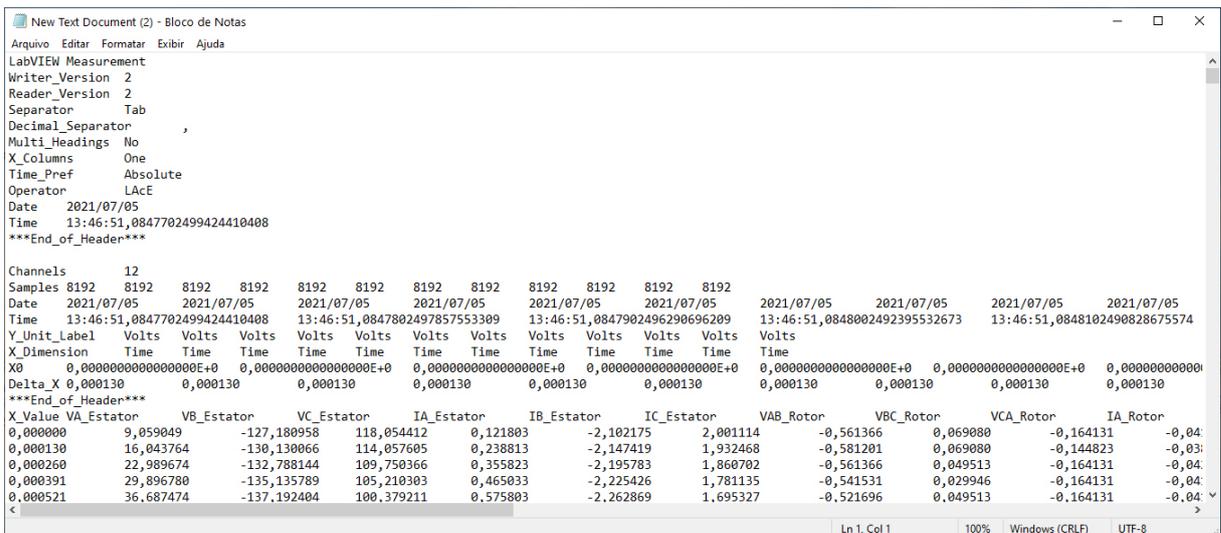
Figura 4.15 – Tela de supervisão desenvolvida no LabVIEW®.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na fonte programável, os dados tratados no LabVIEW® também podem ser armazenados em arquivo texto, como está apresentado na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Dados de leitura armazenados em arquivo de texto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Sistema emulador de turbina

Com o intuito de analisar o funcionamento da máquina de indução de rotor bobinado como gerador, é acoplada em seu eixo uma máquina de indução trifásica de rotor gaiola (MIRG) de 3 cv. As principais informações relativas a essa máquina estão mostradas no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Dados de placa da máquina de indução trifásica de rotor gaiola.

Máquina de indução trifásica – Rotor gaiola	
Potência	3 cv
Tensão (Δ, Y)	220/380V
Corrente (Δ, Y)	8,39/4,86A
Frequência	60 Hz
Velocidade mecânica	3450 rpm
Categoria	N
Fator de potência	0,84
Fator de serviço	1,15
Classe de isolamento	F

Fonte: Dados do autor.

Para realizar o controle de velocidade da máquina de indução trifásica de rotor gaiola, é empregado um conversor de frequência modelo CFW09, Figura 4.17, da WEG®. Nesse dispositivo estão disponíveis as seguintes formas de controle: escalar, vetorial *sensorless* e vetorial com encoder. Uma vez que a aplicação no qual ele está inserido não exige resposta dinâmica rápida, optou-se pela utilização do controle escalar. A velocidade no eixo é aferida através de um tacômetro digital óptico modelo MDT-2238A da Minipa®.

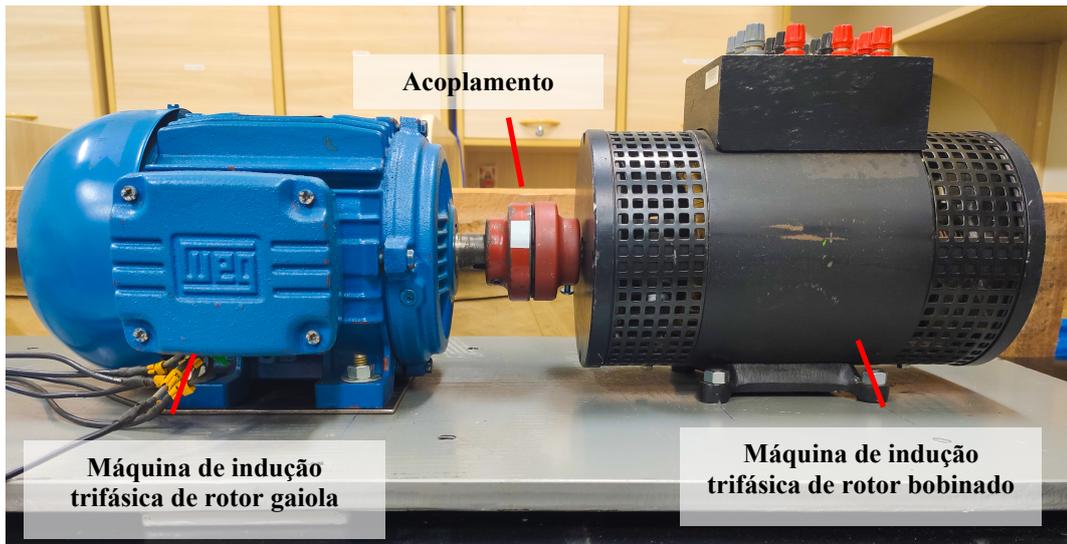
Figura 4.17 – Conversor de frequência CFW09.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O acoplamento entre as duas máquinas é realizado de forma direta, empregando-se, para isso, um acoplamento elástico, que dispensa a necessidade de lubrificação, auxilia na acomodação de desalinhamentos e na redução dos níveis de vibração. Além disso, a fim de amenizar ruídos e vibrações, as máquinas foram instaladas sobre uma placa de aço de 1 cm de espessura. A referida estrutura pode ser visualizada na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Disposição das máquinas elétricas na bancada.

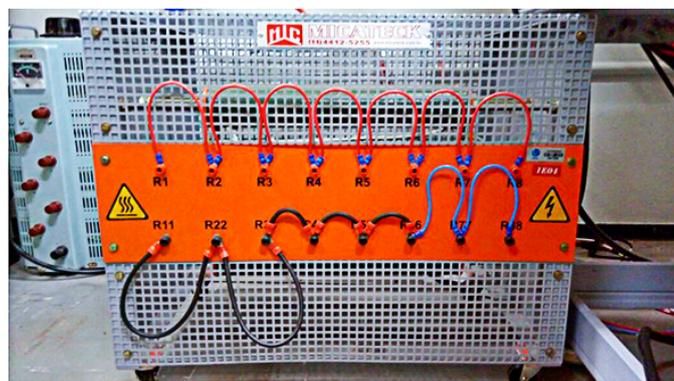


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Banco de resistores

Quando a MIRB é acionada como gerador, a potência ativa gerada no processo é dissipada em um banco de resistores, Figura 4.19, constituído por oito resistências, que podem juntas dissipar uma potência ativa total de 6,4 kW.

Figura 4.19 – Banco de resistores.

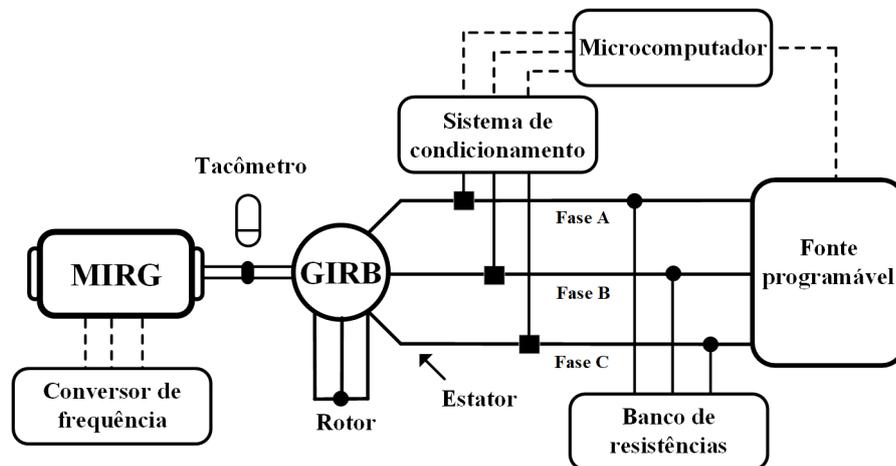


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.20 está apresentado o diagrama referente à ligação entre o gerador de indução de rotor bobinado (GIRB), a fonte programável e o banco de resistores. Nessa topologia de gerador ocorre a geração de potência ativa, enquanto há absorção de potência reativa por parte da máquina para manter seu campo magnético.

Dessa forma, além de permitir simular uma rede elétrica com diferentes tipos de distúrbios, os quais são apresentados nos próximos capítulos, a fonte programável também é responsável por manter o suprimento de potência reativa e garantir o adequado funcionamento do gerador. Com relação ao banco de resistores, seu emprego tem como objetivo dissipar a potência ativa gerada e evitar que esta retorne para a fonte.

Figura 4.20 – Diagrama de ligação do gerador de indução de rotor bobinado conectado ao banco de resistência e à fonte programável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Considerações finais

A plataforma experimental apresentada neste capítulo foi projetada para ser robusta, segura e confiável do ponto de vista técnico-científico. Assim, todos os equipamentos que a integram foram cuidadosamente definidos de maneira que os ensaios práticos forneçam dados fidedignos, que possam ser confrontados com aqueles do estudo teórico, permitindo, assim, a validação desse último.

O objeto de estudo, uma máquina de indução trifásica de rotor bobinado de 1 cv, foi ensaiada conforme as orientações estabelecidas pela NBR 17094-3:2018 para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente e, no que tange aos parâmetros mecânicos, foram empregadas metodologias encontradas e validadas em trabalhos encontrados na literatura

científica. Os ensaios e os resultados obtidos para os dois casos são descritos e apresentados no Apêndice D.

5. ANÁLISE COM TENSÕES EQUILIBRADAS

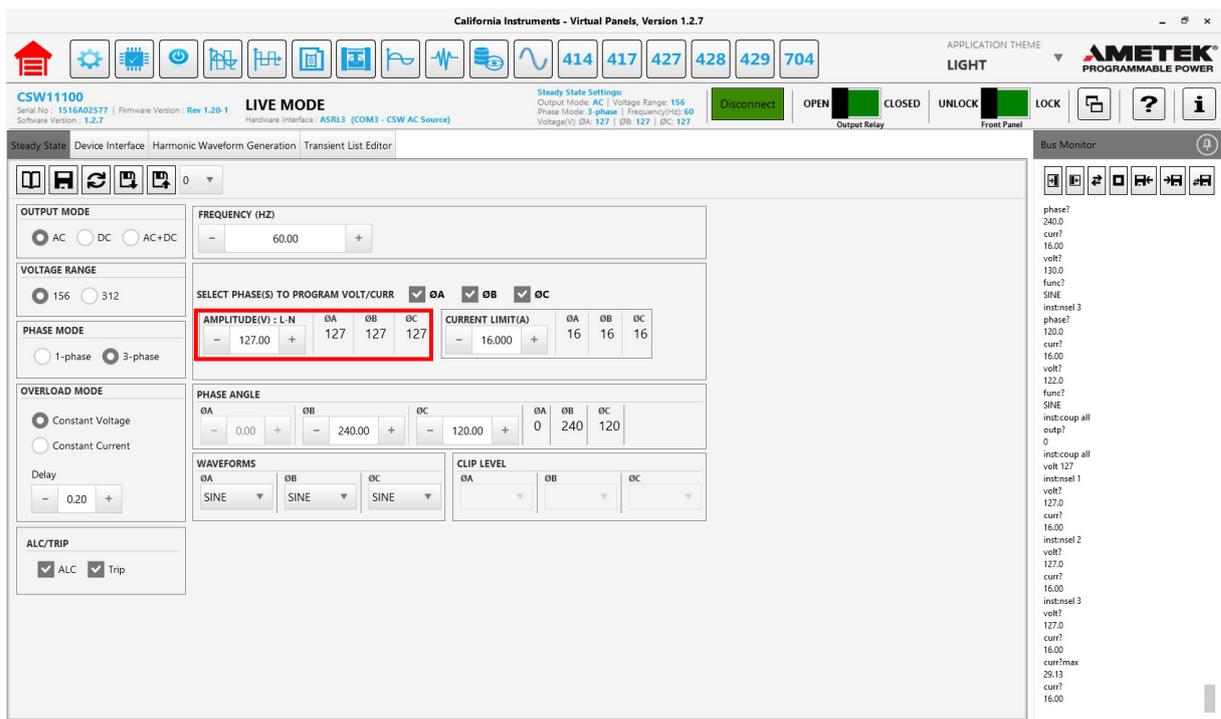
5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação de tensões equilibradas ao gerador de indução de rotor bobinado para dois pontos de operação, a saber 1850 rpm e 1900 rpm, escolhidas para a padronização dos estudos de caso e garantir a integridade da máquina. Com o intuito de validação do modelo matemático não linear no domínio da fase estudado neste trabalho, os resultados provenientes de simulações dinâmicas para os dois pontos de operação citados acima são confrontados com os dados experimentais.

Portanto, as formas de onda de tensões e correntes do estator, bem como seus respectivos harmônicos são apresentados tanto para os resultados experimentais como os simulados. Outras informações relevantes provenientes da simulação, como correntes de rotor, conjugado eletromagnético e funções harmônicas magnéticas, são também apresentadas em forma gráfica.

Para esse primeiro caso são também apresentadas as formas de onda supracitadas referentes ao clássico modelo linear “dq” (ABAD *et al.*, 2014), de forma a verificar a diferença existe entre ambos os modelos.

Figura 5.1 – Interface de ajuste da fonte programável para o ensaio em condições normais de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio é realizado aplicando-se tensões equilibradas e balanceadas à máquina, em que a programação da fonte se deu como está exposta na Figura 5.1. Todos os ensaios, tanto experimentais quanto de simulações, são realizados com o gerador operando com velocidade controlada. É importante reiterar que os enrolamentos de estator são conectados em delta-paralelo, correspondente à tensão de 220 V, e os de rotor são curto-circuitados externamente.

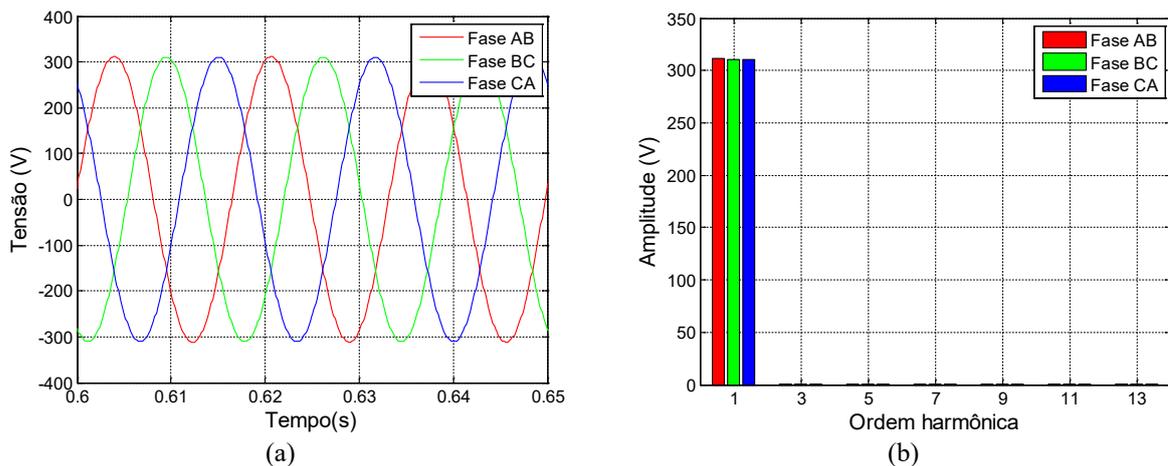
5.2 Resultados e discussões do modelo no domínio da fase

5.2.1 Velocidade de 1850 rpm

O ensaio realizado nesta etapa, em que a MIRB é acionada pela máquina primária à velocidade de 1850 rpm, conduziu aos resultados experimentais e teóricos que são apresentados a seguir.

Primeiramente, nas Figuras 5.2-(a) e 5.2-(b) estão mostrados os sinais das tensões nos terminais do gerador e o seu espectro harmônico, respectivamente, para o ensaio experimental, tendo sido adotada a sequência de fase “abc”. É possível verificar pelas referidas figuras que a fonte programável garante tensões equilibradas e com forma de onda senoidal.

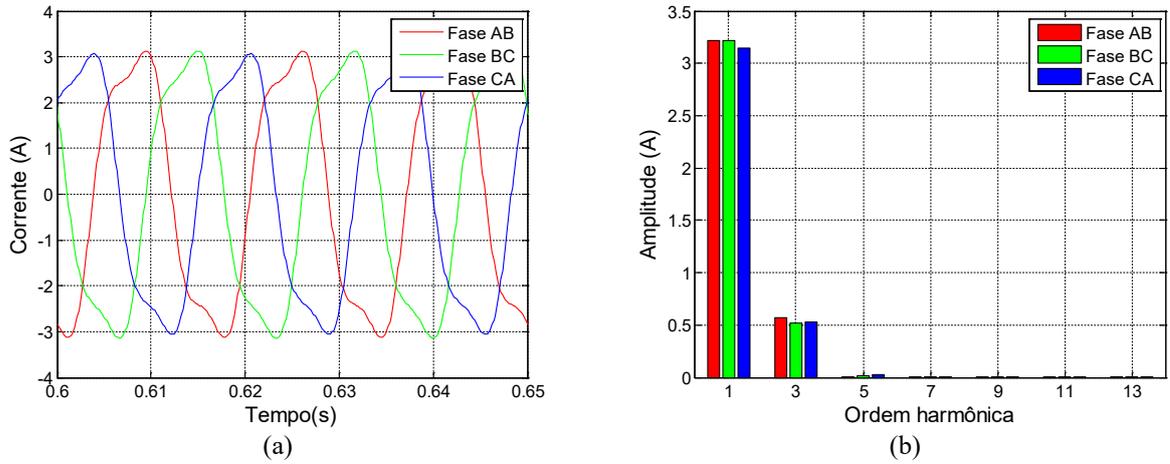
Figura 5.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os sinais das correntes nas fases de estator do gerador para o ensaio experimental estão expostos na figura 5.3-(a) e seu espectro harmônico na figura 5.3-(b). As correntes das três fases apresentam uma componente de terceiro harmônico significativa, cuja amplitude equivale a aproximadamente 17% da componente fundamental.

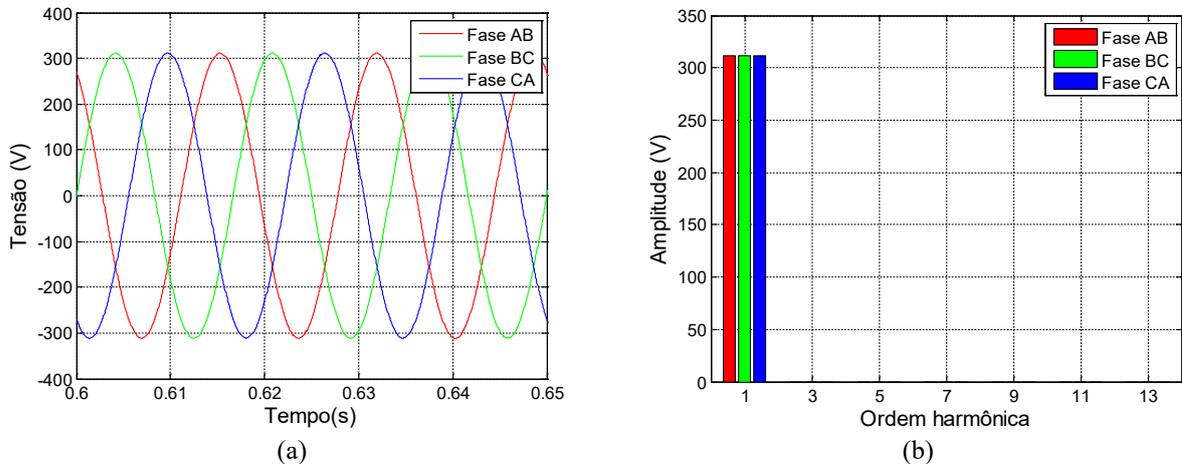
Figura 5.3 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

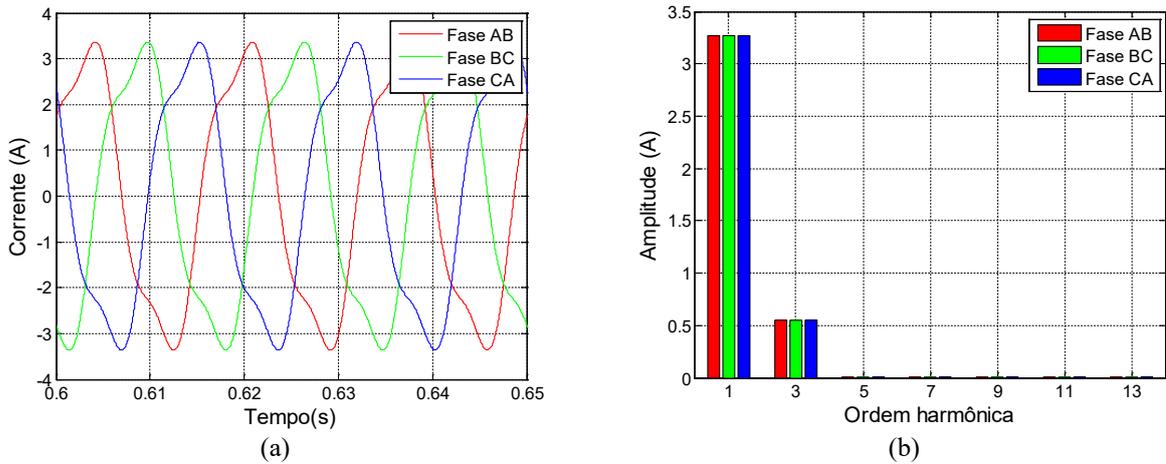
Para a realização da simulação computacional foi considerado que a tensão apresentasse os mesmos aspectos daqueles observados no ensaio experimental, ou seja, valores equilibrados entre as fases e senoidais, como está ilustrado na Figura 5.4-(a). As correntes obtidas na simulação estão mostradas na Figura 5.5-(a). Observa-se uma grande semelhança entre as formas de onda das correntes da simulação e do ensaio, dando-se ênfase à componente da corrente relativa ao terceiro harmônico.

Figura 5.4 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 5.5 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes de tensão e corrente estão indicados na Tabela 5.1, sendo ambos referentes às grandezas de fase. É possível inferir por esses primeiros resultados que a máquina utilizada apresenta os enrolamentos de estator bem equilibrados. Além disso, verifica-se a grande semelhança entre os valores experimentais e teóricos.

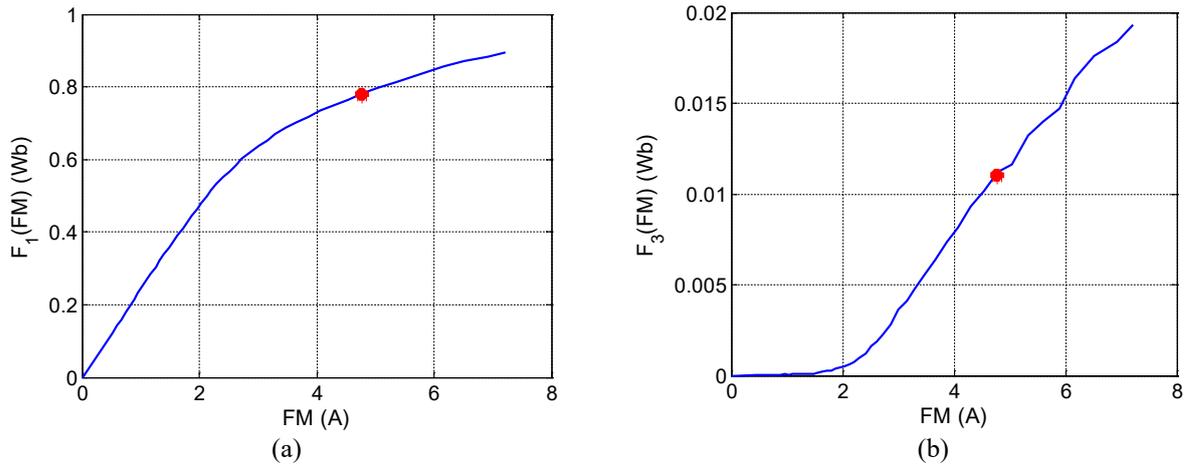
Tabela 5.1 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional do modelo no domínio da fase.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,45	220,00
V_{bc}	219,62	220,00
V_{ca}	219,49	220,00
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,30	2,34
I_{bc}	2,30	2,34
I_{ca}	2,25	2,34

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 5.6-(a) e 5.6-(b) estão indicados sobre as curvas $F_1(\overline{FM})x\overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM})x\overline{FM}$, respectivamente, o ponto em que o gerador opera para as condições de tensão e velocidade que foram estabelecidas para esse ensaio. Dessa maneira, fica fácil constatar a operação na região de saturação magnética, que resulta no achatamento da distribuição espacial da densidade de fluxo no entreferro tal como mostrado na Figura 2.3, acarretando o surgimento de harmônicos temporais nas grandezas da máquina. Isso esclarece o aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase.

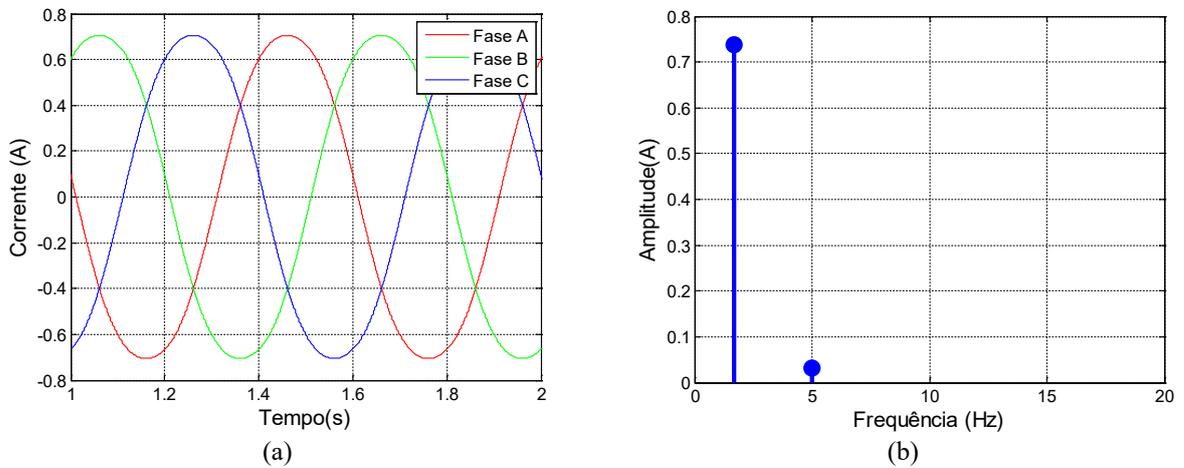
Figura 5.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(FM)$; (b) Gráfico da componente $F_3(FM)$.



Fonte: Dados do autor.

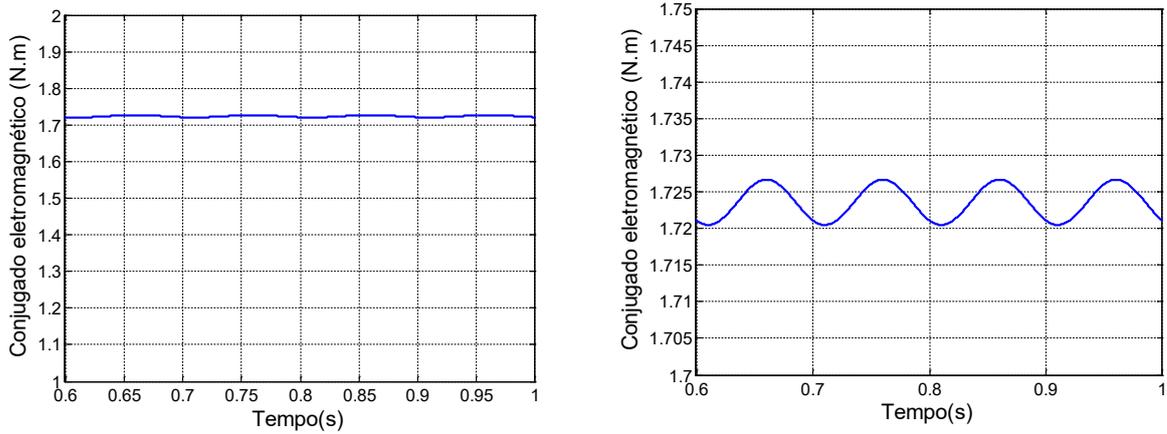
As grandezas do rotor também são afetadas pela operação do gerador na região de saturação. Na Figura 5.7 pode ser verificado o achatamento das correntes rotóricas, ocasionado pela indução de componentes de terceiro harmônico de corrente nos enrolamentos de rotor. Por sua vez, essas componentes dão origem a pequenas oscilações no conjugado eletromagnético, que estão mostradas na Figura 5.8.

Figura 5.7 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Figura 5.8 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo no domínio da fase.

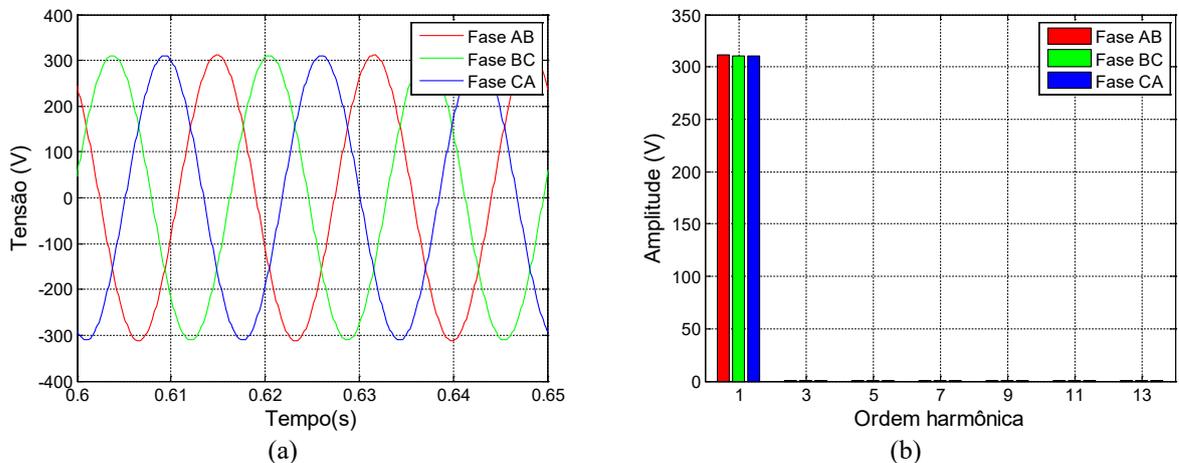


Fonte: Dados do autor.

5.2.2 Velocidade de 1900 rpm

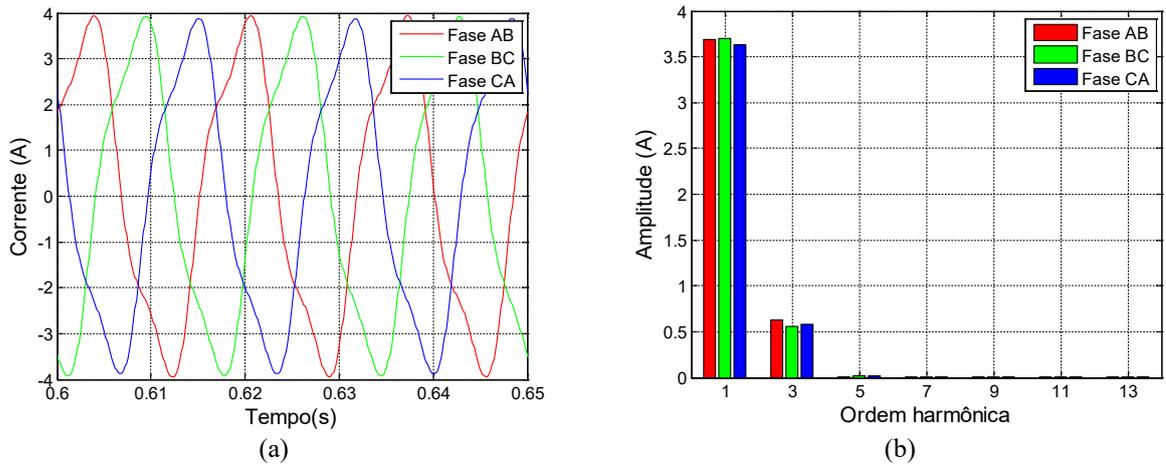
Em uma nova condição de operação, a velocidade imposta pela máquina primária passou a ser de 1900 rpm. As tensões do sistema, que estão apresentadas na Figura 5.9, não sofreram alterações em relação ao caso anterior. No que tange às correntes experimentais de fase, Figura 5.10, é perceptível o aumento da amplitude da corrente relacionada à componente fundamental com o aumento da velocidade. Já a corrente referente à componente de terceira ordem manteve-se praticamente inalterada.

Figura 5.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

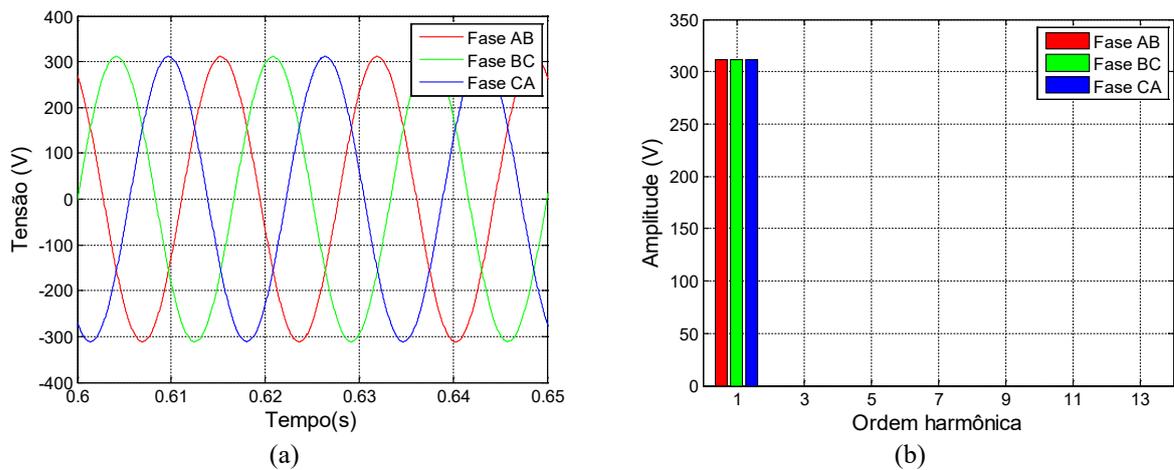
Figura 5.10 – Ensaio experimental com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

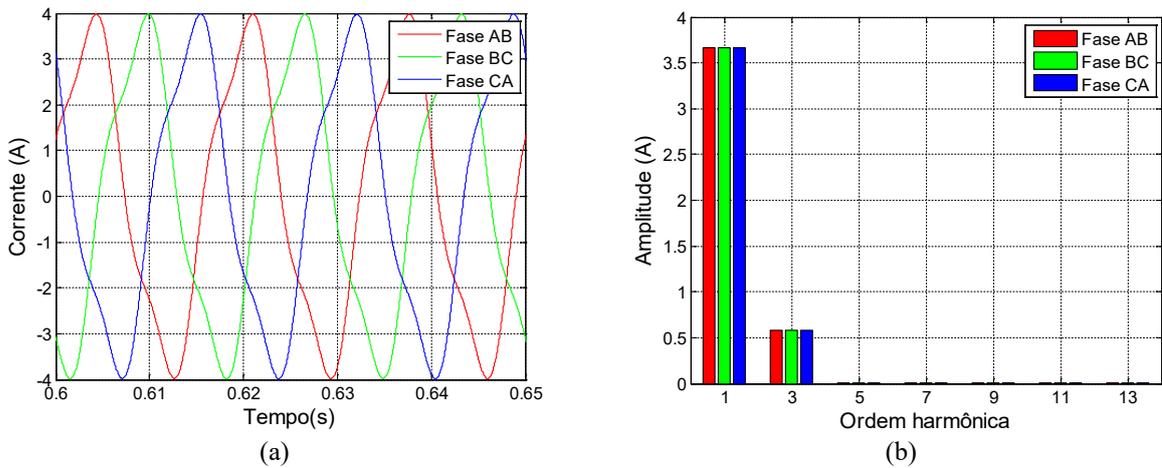
Os gráficos dos sinais de tensão e corrente obtidos com a simulação encontram-se apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12, respectivamente. Comparando-os com os do ensaio experimental, Figuras 5.9 e 5.10 respectivamente, é novamente perceptível a semelhança entre as formas de onda.

Figura 5.11 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 5.12 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes de tensão e de corrente, ambos de fase, estão mostrados na Tabela 5.2, sendo mais fácil constatar a elevação da corrente em consequência do aumento da velocidade mecânica. Além disso, verifica-se, novamente, a semelhança entre os resultados experimentais e teóricos.

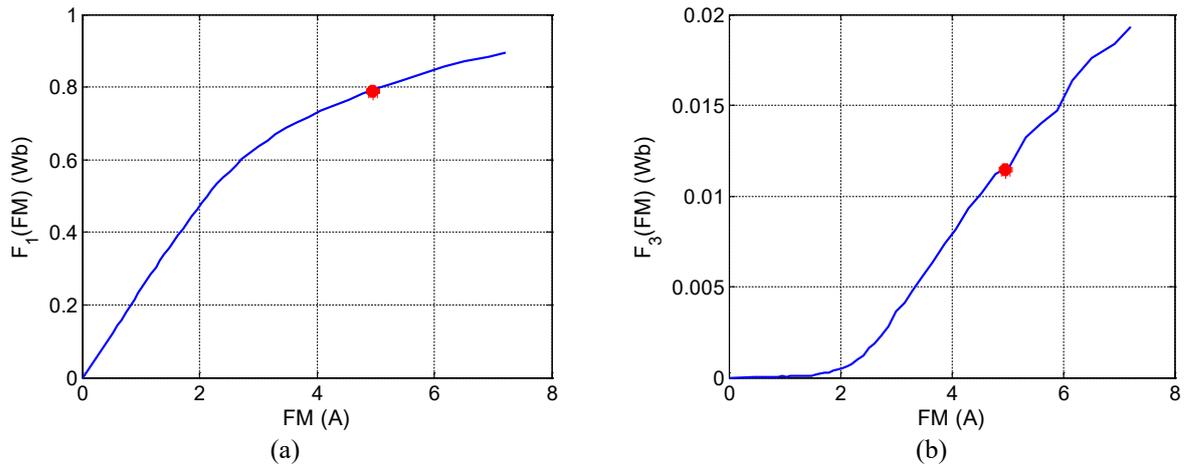
Tabela 5.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional do modelo no domínio da fase.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,51	220,00
V_{bc}	219,70	220,00
V_{ca}	219,55	220,00
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,64	2,63
I_{bc}	2,64	2,63
I_{ca}	2,60	2,63

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 5.13-(a) e 5.13-(b) está mostrado a localização do ponto de operação nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, o gerador também opera na região de saturação magnética com o aumento da velocidade.

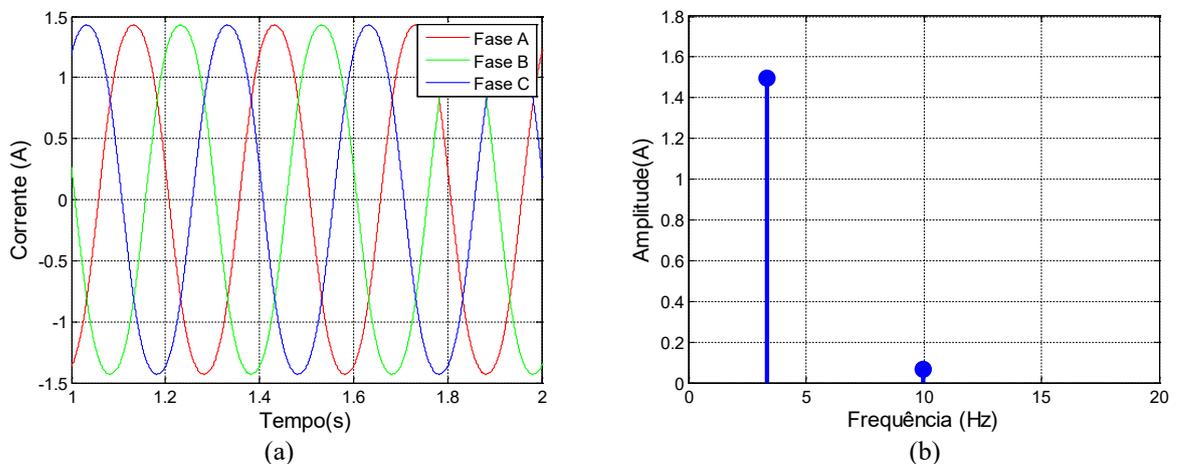
Figura 5.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

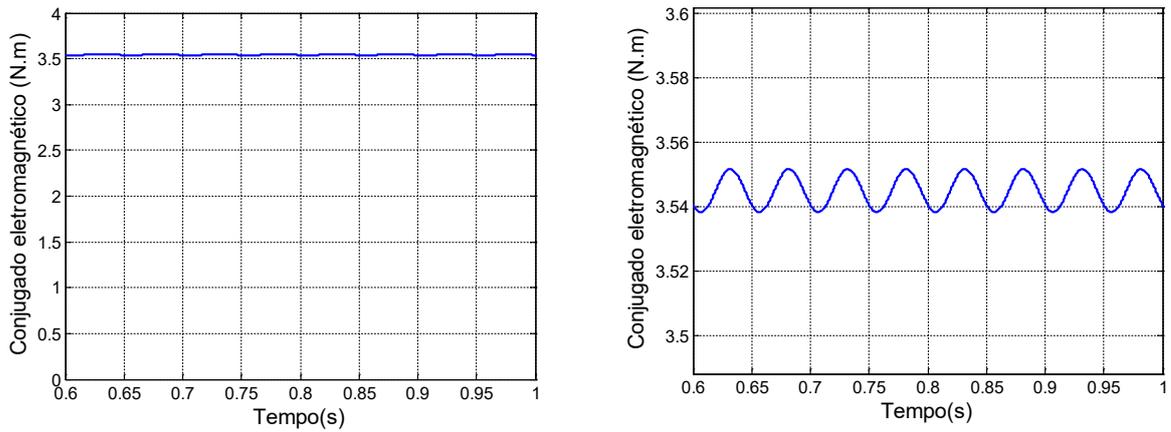
As correntes de rotor obtidas com a simulação computacional estão ilustradas na Figura 5.14. Confrontando-as com aquelas obtidas na velocidade de 1850 rpm, verifica-se que para um mesmo intervalo de tempo e com uma velocidade superior, tem-se um número maior de oscilações. Isso se deve ao fato de a frequência elétrica das correntes de rotor variar com o escorregamento da máquina, como é caracterizado pela equação (B.4) apresentada no Apêndice B. Assim, como o conjugado eletromagnético é diretamente dependente das correntes de rotor, o que pode ser verificado na Equação (2.85), ocorre o problema supramencionado, como está indicado na Figura 5.15.

Figura 5.14 – Simulação computacional do modelo no domínio da fase com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Figura 5.15 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo no domínio da fase.



Fonte: Dados do autor.

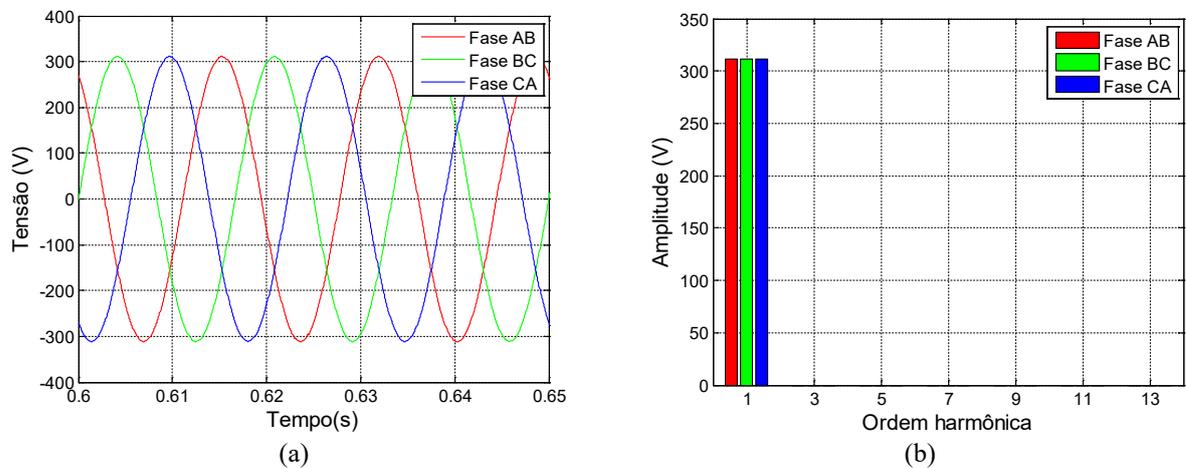
5.3 Resultados e discussões do modelo no domínio dq

5.3.1 Velocidade de 1850 rpm

A seguir são apresentados os resultados da simulação computacional referente ao modelo linear “ dq ” para a velocidade de 1850 rpm.

Nas Figuras 5.16-(a) e 5.16-(b) estão exibidas, respectivamente, as formas de onda das tensões de fase de estator e seu espectro harmônico. Observa-se que os sinais de tensão são semelhantes aos do ensaio experimental e da simulação no domínio da fase mostrados em 5.2.1.

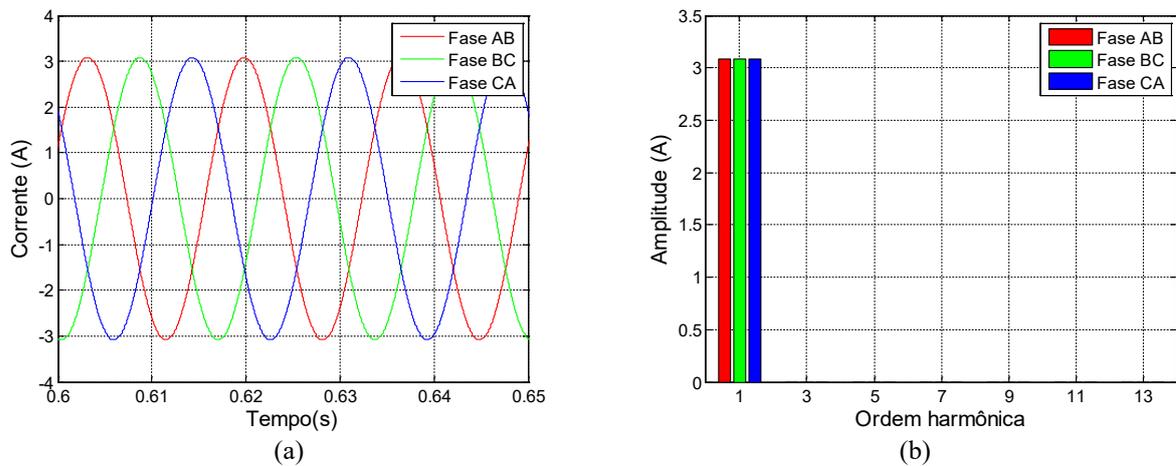
Figura 5.16 – Simulação computacional do modelo “ dq ” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os sinais das correntes nas fases de estator do gerador resultantes da simulação estão expostos na figura 5.17-(a), e seu espectro harmônico na figura 5.17-(b). As correntes das três fases, nesse caso, não apresentam componentes de terceiro harmônico como foi verificado em 5.2.1, uma vez que o modelo é linear, ou seja, não leva em consideração a saturação magnética da máquina. Além disso, verifica-se a redução da amplitude da corrente, que também pode ser observada nos valores eficazes apresentados na Tabela 5.3.

Figura 5.17 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

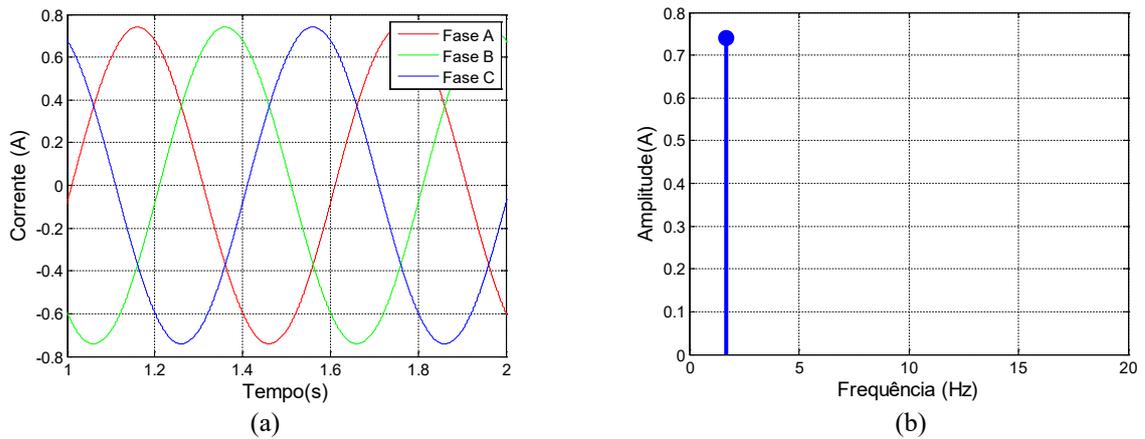
Tabela 5.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental, à simulação computacional do modelo no domínio da fase e “dq”.

	Dados experimentais	Dados de simulação domínio da fase	Dados de simulação domínio dq
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,45	220,00	220,00
V_{bc}	219,62	220,00	220,00
V_{ca}	219,49	220,00	220,00
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,30	2,34	2,18
I_{bc}	2,30	2,34	2,18
I_{ca}	2,25	2,34	2,18

Fonte: Dados do autor.

A componente fundamental da corrente rotórica, em termos de amplitude, permanece praticamente inalterada, como pode ser visualizado na Figura 5.18. No que concerne à componente de terceiro harmônico induzida na corrente rotórica, esta não aparece pelas mesmas razões do não aparecimento nas correntes estatóricas.

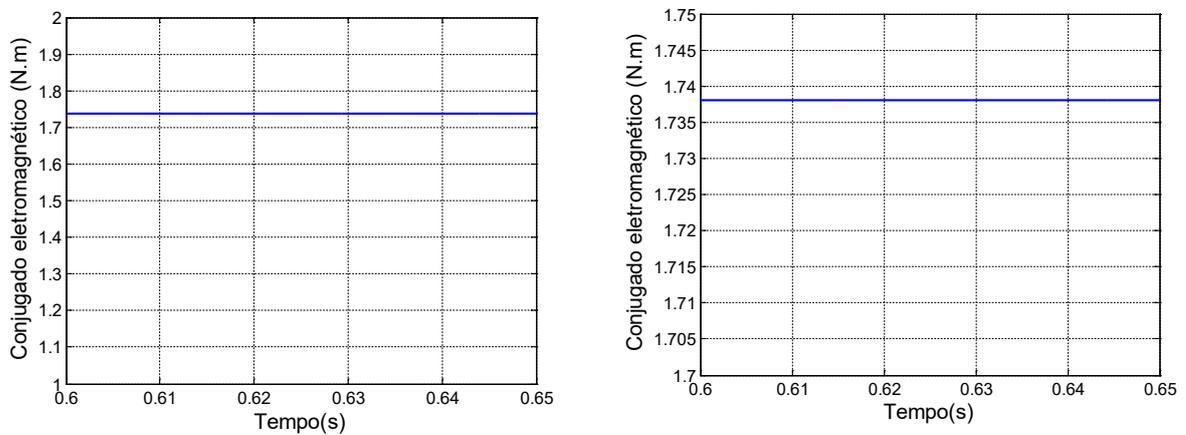
Figura 5.18 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Como as correntes rotóricas são perfeitamente senoidais, o conjugado eletromagnético, Figura 5.19, não possui oscilações.

Figura 5.19 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo “dq”.



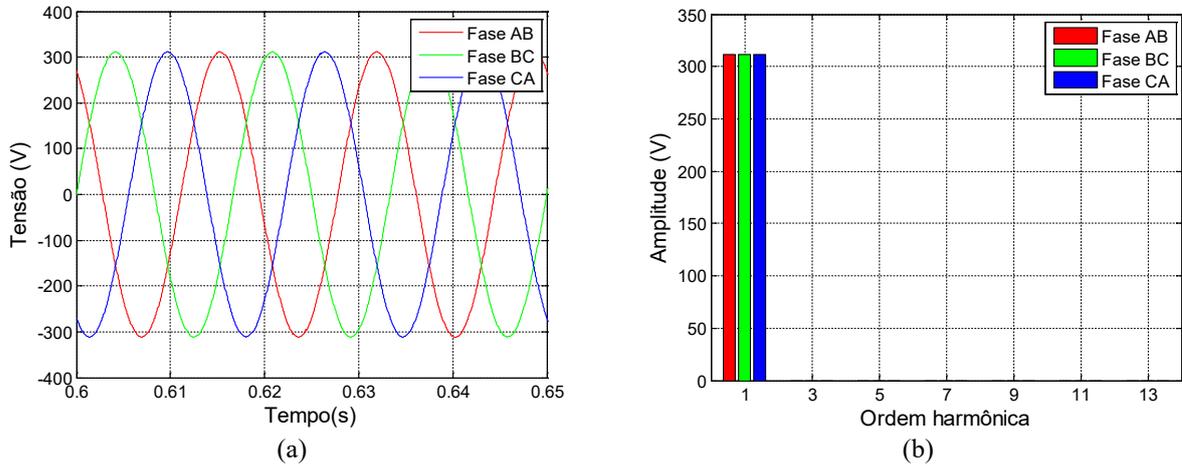
Fonte: Dados do autor.

5.3.2 Velocidade de 1900 rpm

A seguir são apresentados os resultados da simulação computacional referente ao modelo linear “dq” para a velocidade de 1900 rpm.

Nas Figuras 5.20-(a) e 5.20-(b) estão mostradas, respectivamente, as formas de onda das tensões de fase de estator e seu espectro harmônico. Observa-se que os sinais de tensão são semelhantes aos do ensaio experimental e da simulação no domínio da fase mostrados em 5.2.2.

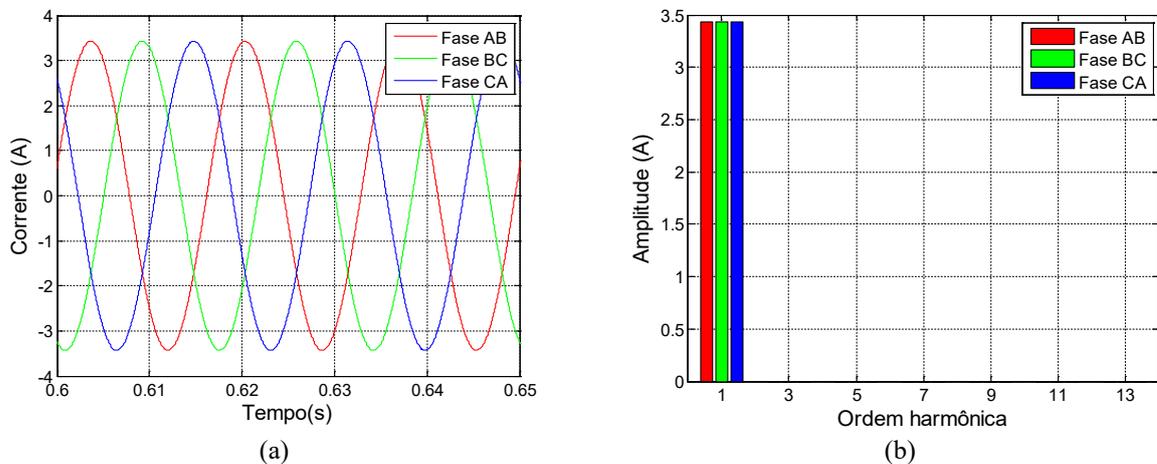
Figura 5.20 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os sinais das correntes nas fases de estator do gerador resultantes da simulação estão expostos na figura 5.21-(a), e seu espectro harmônico na figura 5.21-(b). As correntes das três fases, assim como analisado no caso anterior, não apresentam componentes de terceiro harmônico como foi verificado em 5.2.2, uma vez que o modelo é linear, ou seja, não leva em consideração a saturação magnética da máquina. Além disso, verifica-se a redução da amplitude da corrente, que também pode ser observada nos valores eficazes apresentados na Tabela 5.4.

Figura 5.21 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

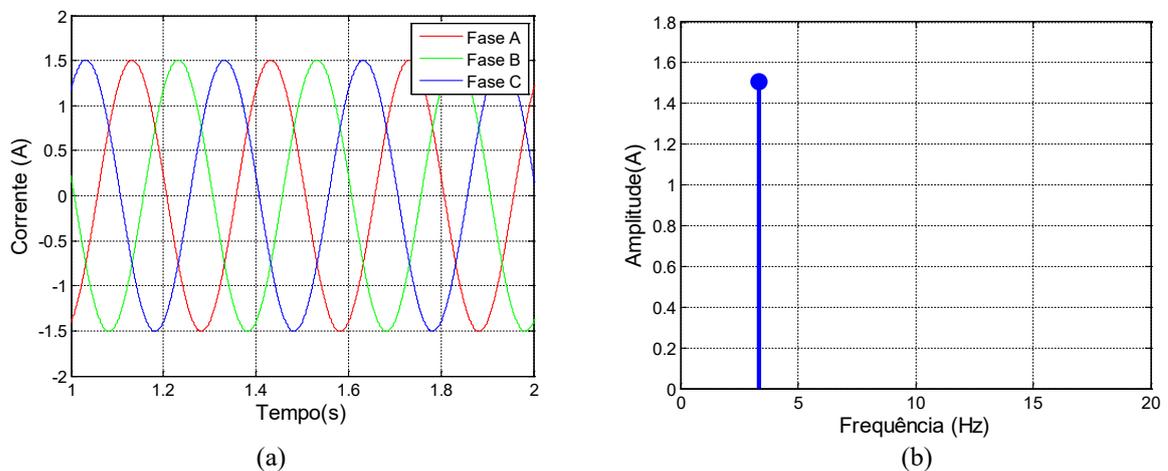
Tabela 5.4 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental, à simulação computacional do modelo no domínio da fase e “dq”.

	Dados experimentais	Dados de simulação domínio da fase	Dados de simulação domínio dq
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,51	220,00	220,00
V_{bc}	219,70	220,00	220,00
V_{ca}	219,55	220,00	220,00
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,64	2,63	2,42
I_{bc}	2,64	2,63	2,42
I_{ca}	2,60	2,63	2,42

Fonte: Dados do autor.

A componente fundamental da corrente rotórica, em termos de amplitude, novamente, permanece praticamente inalterada em relação ao caso 5.2.2, como pode ser visualizado na Figura 5.22. No que concerne à componente de terceiro harmônico induzida na corrente rotórica, esta não aparece pelas mesmas razões do não aparecimento nas correntes estatóricas.

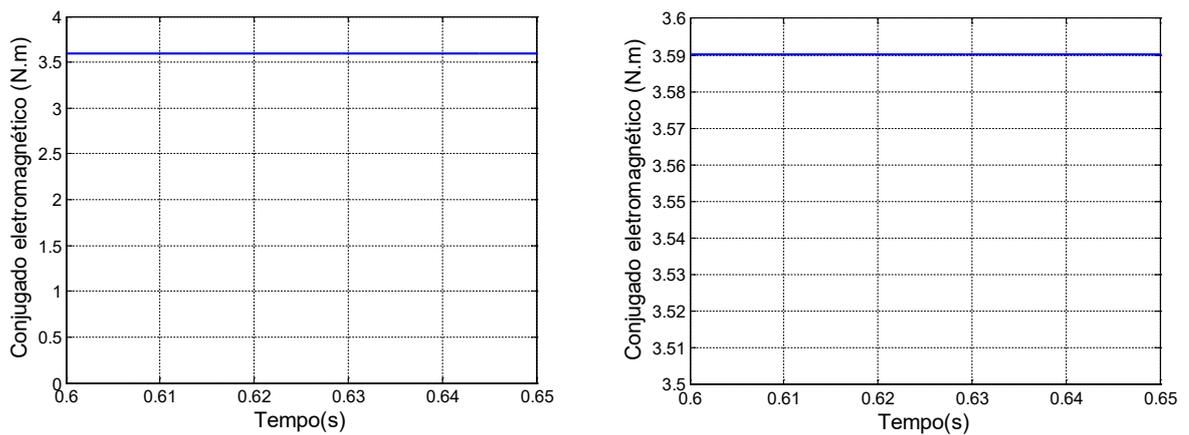
Figura 5.22 – Simulação computacional do modelo “dq” com a rede trifásica equilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Mais uma vez, como as correntes rotóricas são perfeitamente senoidais, o conjugado eletromagnético, Figura 5.23, não possui oscilações.

Figura 5.23 – Gráfico do conjugado eletromagnético referente à simulação computacional do modelo “dq”.



Fonte: Dados do autor.

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados e comparados os resultados de ensaios experimentais, com os de simulações computacionais fundamentadas no modelo matemático da máquina de indução trifásica no domínio da fase, para a análise do gerador de indução de rotor bobinado alimentado por tensões equilibradas e senoidais em duas condições de velocidade, 1850 e 1900 rpm. A comparação entre os resultados obtidos aponta para a eficácia da modelagem utilizada para as condições acima.

Com a consideração dos harmônicos espaciais no desenvolvimento do modelo matemático, constatou-se que as correntes de fase para a máquina ligada em delta, seja de estator quanto de rotor, apresentaram distorções causadas por uma componente de terceiro harmônico, oriunda da operação na região de saturação magnética. Para certificar que o funcionamento se deu na região supracitada, o ponto em que o gerador opera foi localizado nas curvas das funções harmônicas magnéticas, isto é, $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$.

Além disso, pelas mesmas razões anteriores, observaram-se pequenas oscilações no conjugado eletromagnético, uma vez que tal grandeza está intimamente relacionada com as correntes rotóricas. Essas oscilações, por menores que sejam, podem resultar em vibrações, aquecimento e perda de rendimento.

Por fim, foi mostrada que as características descritas acima não são retratadas pelo modelo linear “dq”, onde verificou-se que as correntes estáticas e rotóricas se apresentam perfeitamente senoidais, contradizendo com o que acontece na realidade. Assim, tem-se que o modelo no domínio da fase é o que mais se aproxima do funcionamento real do gerador.

6. ANÁLISE COM DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação de tensões desequilibradas ao gerador de indução de rotor bobinado para dois pontos de operação, a saber 1850 rpm e 1900 rpm, escolhidas para a padronização dos estudos de caso e garantir a integridade da máquina. Com o intuito de validação do modelo matemático não linear no domínio da fase estudado neste trabalho para essa situação, os resultados provenientes de simulações dinâmicas para os dois pontos de operação citados acima são confrontados com os dados experimentais.

Portanto, as formas de onda de tensões e correntes do estator, bem como seus respectivos harmônicos são apresentados tanto para os resultados experimentais como os simulados. Outras informações relevantes provenientes da simulação, como correntes de rotor, conjugado eletromagnético e funções harmônicas magnéticas, são também mostradas em forma gráfica.

Antes de tudo, é necessário definir os níveis de tensão de cada uma das fases do sistema trifásico em que o gerador está conectado para o estudo de caso envolvendo desequilíbrio de tensão. Nesse sentido, com auxílio das Equações (3.1) e (3.2), foram determinados os valores de tensão que resultaram em um $FD\%$ de 2,93%, respeitando o limite de 3% estabelecido pelo PRODIST, como discutido em 3.2. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 6.1.

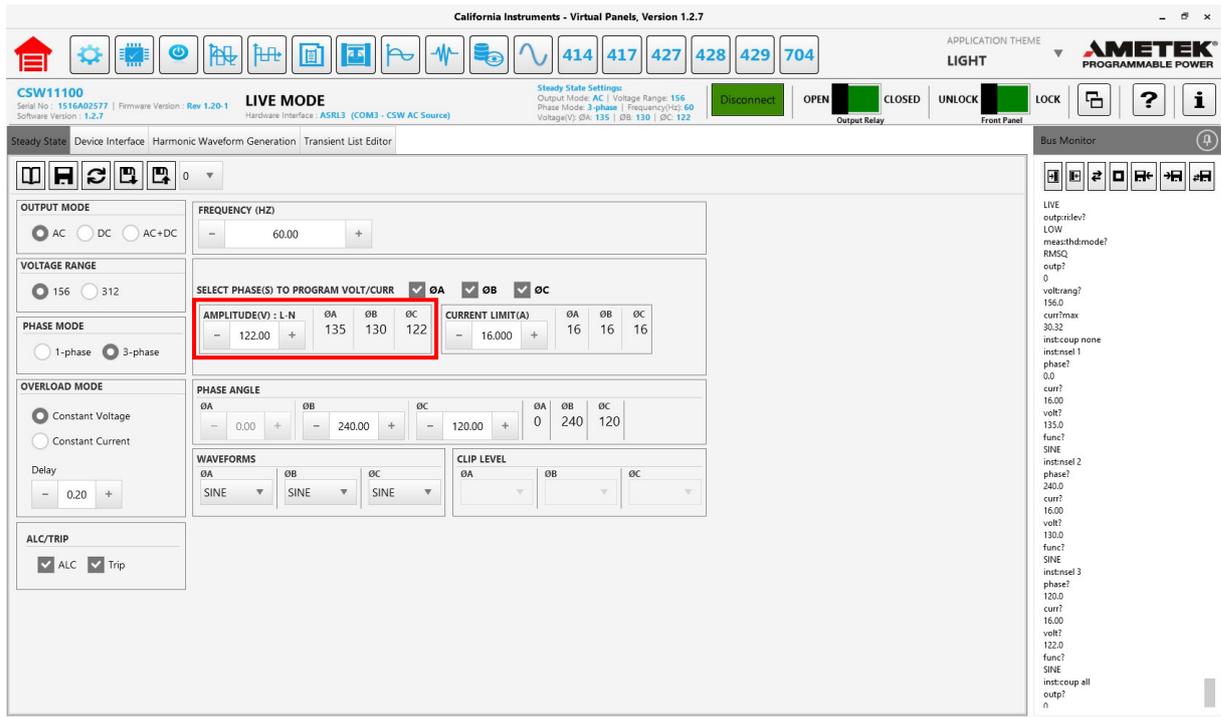
Tabela 6.1 – Níveis de tensão para o ensaio com desequilíbrio de tensão.

	Tensão (Vrms)
V_{ab}	229,510
V_{bc}	218,275
V_{ca}	222,663

Fonte: Dados do autor.

Os dados expostos na Tabela 6.1 são utilizados como referência na programação da fonte, como está mostrado na Figura 6.1, assim como na simulação computacional. Os enrolamentos de estator são conectados em delta-paralelo, correspondente à tensão de 220 V, e os de rotor são curto-circuitados externamente. Todos os ensaios, tanto experimentais quanto de simulações, são realizados com o gerador operando com velocidade controlada.

Figura 6.1 – Interface de ajuste da fonte programável para o ensaio com desequilíbrio de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

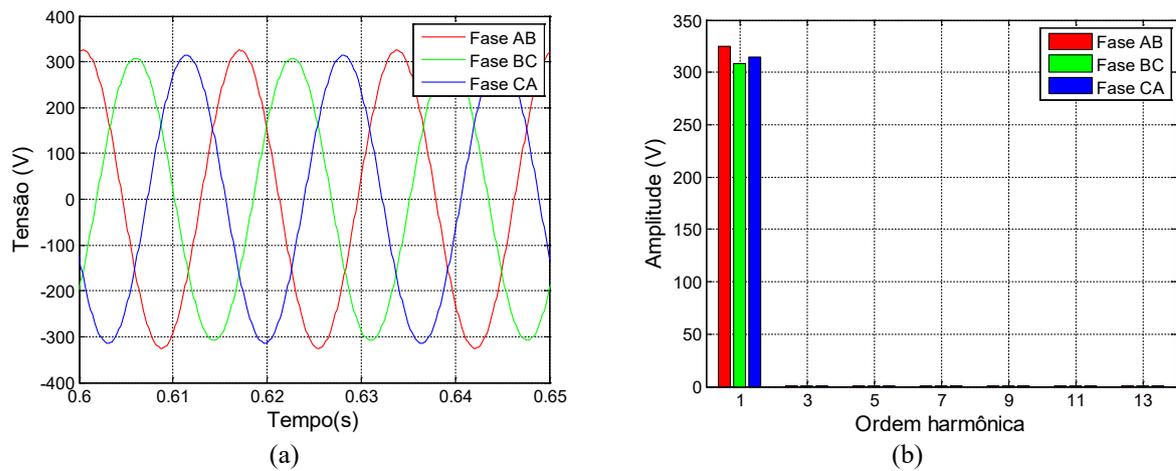
6.2 Resultados e discussões

6.2.1 Velocidade de 1850 rpm

Neste primeiro momento são apresentados os resultados para a condição de desequilíbrio de tensão à velocidade de 1850 rpm. Os sinais de tensão de fase de estator estão ilustrados na Figura 6.2. Observa-se que a fonte programável garante tensões com forma de onda senoidal, sem a presença de componentes harmônicas.

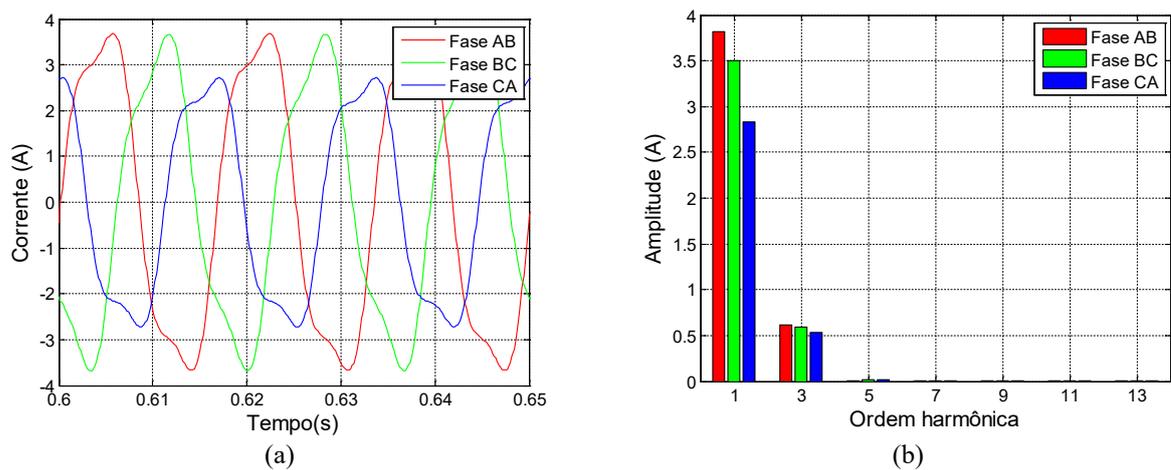
Encontram-se ilustrados na Figura 6.3 os sinais das correntes de fase de estator para o ensaio experimental, sendo possível perceber o nítido desequilíbrio na componente fundamental da corrente para cada uma das fases, o que é ocasionado pelo desequilíbrio de tensão. Com relação à componente de terceiro harmônico da corrente, verifica-se que para cada fase a amplitude manteve-se praticamente com o mesmo valor.

Figura 6.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 6.3 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

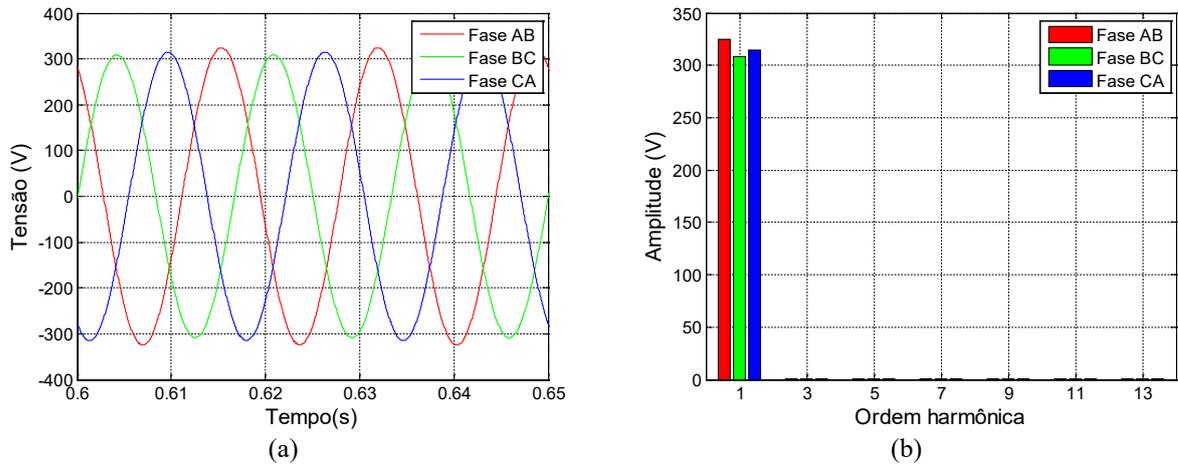


Fonte: Dados do autor.

Visando, pois, verificar o desempenho do modelo matemático para desequilíbrio de tensão, foram empregados os mesmos valores utilizados no ajuste da fonte (mostrados na Tabela 6.1) para a simulação digital. As tensões simuladas para cada fase de estator estão exibidas na Figura 6.4, sendo possível verificar a semelhança com as formas de onda do ensaio experimental, Figura 6.2.

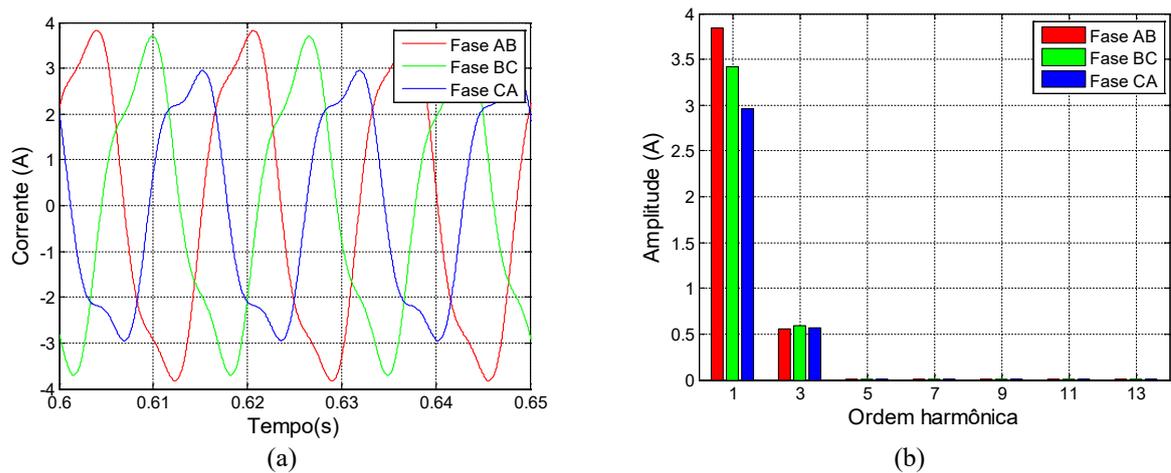
As correntes de fase de estator simuladas estão ilustradas na Figura 6.5. Comparando-as com as obtidas no ensaio experimental, Figura 6.3, percebe-se a grande semelhança entre as formas de onda.

Figura 6.4 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 6.5 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes tanto das tensões quanto das correntes de fase de estator referentes ao ensaio experimental e à simulação computacional estão apresentados na Tabela 6.2. Assim como foi possível constatar pelas formas de onda das tensões e correntes mostradas anteriormente, os valores eficazes indicados na Tabela 6.2 também permitem verificar a grande semelhança entre os resultados obtidos em cada análise.

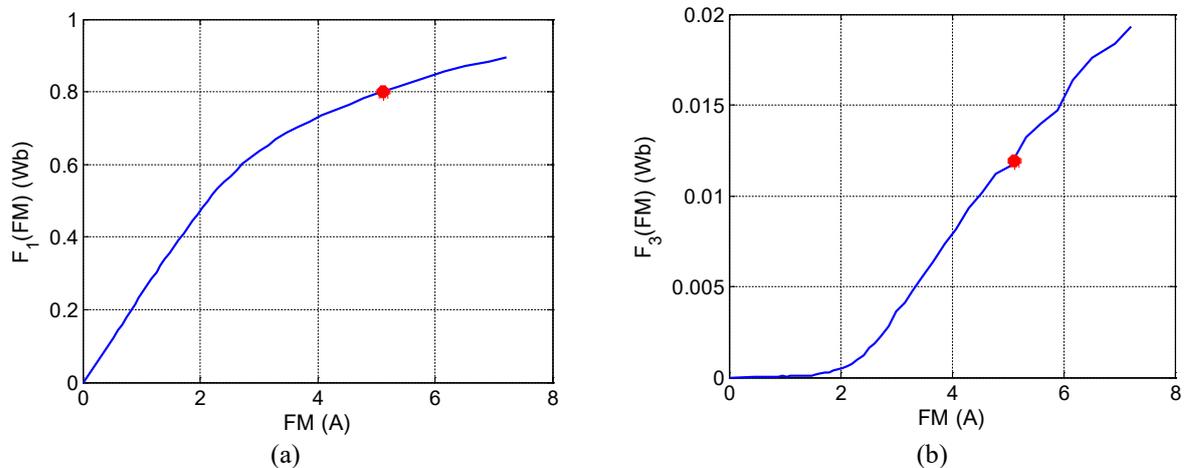
Tabela 6.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	229,99	229,58
V_{bc}	218,01	218,31
V_{ca}	222,20	222,72
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,73	2,74
I_{bc}	2,51	2,45
I_{ca}	2,03	2,13

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 6.6-(a) e 6.6-(b) está mostrado a localização do ponto de operação nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator, o gerador opera na região de saturação magnética.

Figura 6.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



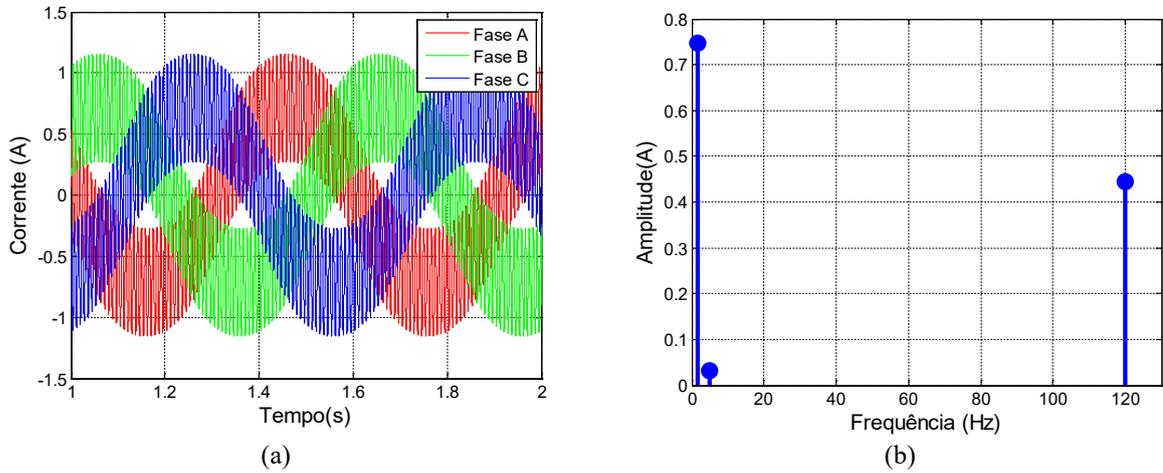
Fonte: Dados do autor.

Com o desequilíbrio de tensão tem-se, conseqüentemente, correntes desequilibradas, como pôde ser verificado tanto no ensaio experimental, Figura 6.3, quanto na análise teórica, Figura 6.5. Tais correntes podem ser decompostas em componentes simétricas, apresentando componentes de sequência positiva, negativa e zero (COSTA, 2012).

A componente da corrente de sequência negativa de estator induz tensões e correntes de dupla frequência nos enrolamentos de rotor (VANÇO, 2020). Desse modo, as correntes de rotor

apresentam, além da corrente relativa à componente de sequência positiva, uma componente de dupla frequência, resultando na corrente apresentada na Figura 6.7.

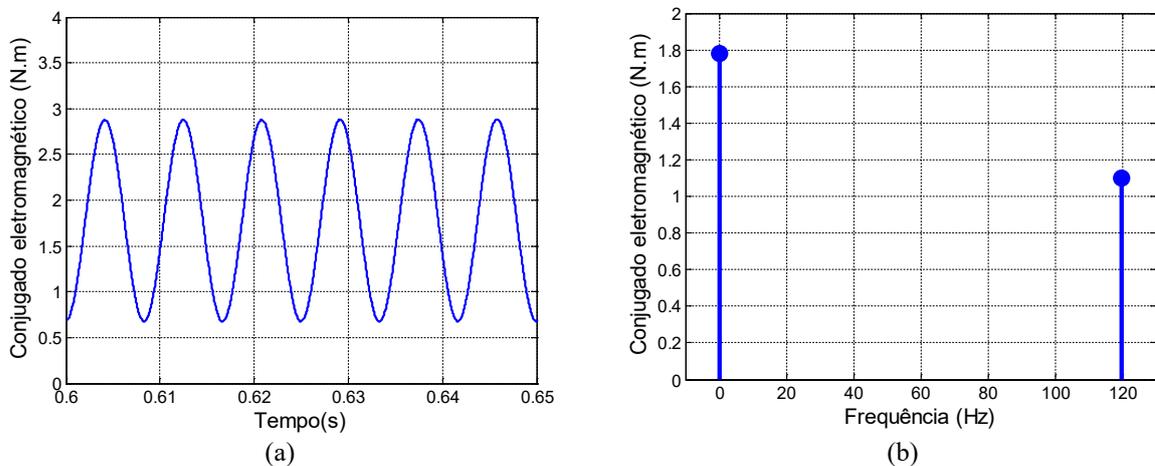
Figura 6.7 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Como o conjugado eletromagnético é dependente das correntes rotóricas, o que pode ser constatado na Equação (2.85), a componente de dupla frequência dá origem a oscilações significativas no conjugado, como está ilustrada na Figura 6.8. De acordo com Muljadi *et al.* (1999), esse fenômeno é conhecido como “conjugado pulsante”, sendo sua amplitude afetada pelo tamanho do valor da componente da corrente de sequência negativa (DONOLO *et al.*, 2016). Como consequência dessas oscilações, surgem problemas como vibrações, aquecimento e perda de rendimento (KEARNEY, 2013; OLIVEIRA, 2017).

Figura 6.8 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.

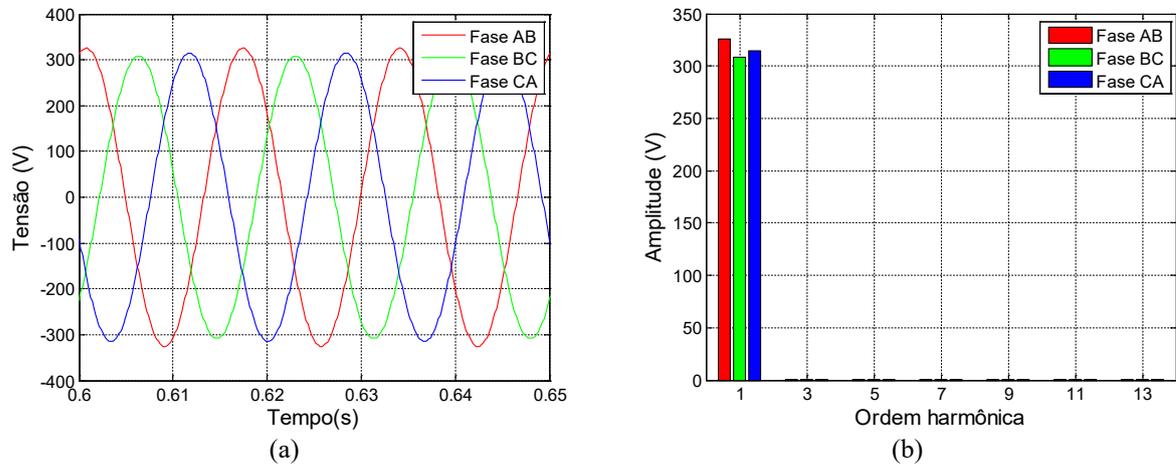


Fonte: Dados do autor.

6.2.2 Velocidade de 1900 rpm

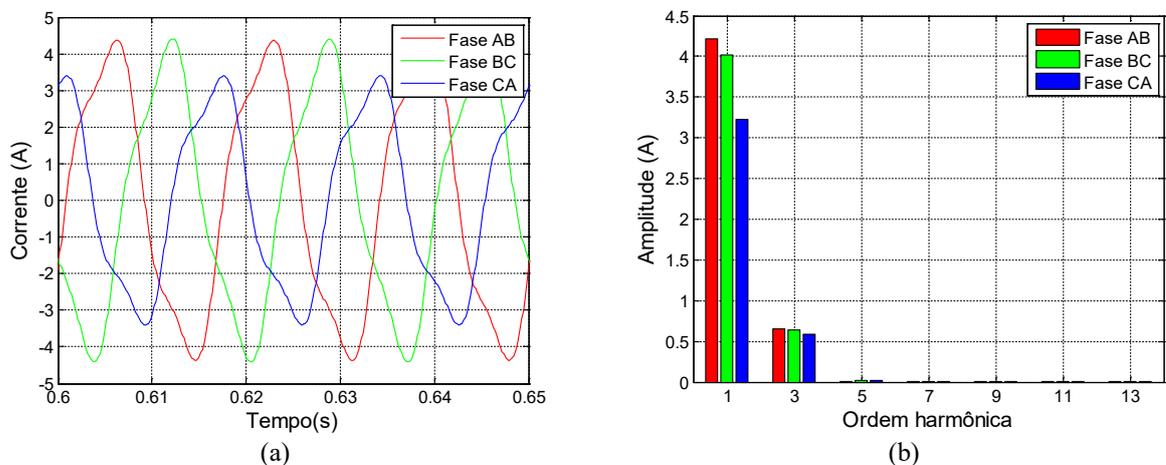
Esta seção apresenta os resultados obtidos para a velocidade rotórica de 1900 rpm, sendo considerados os valores de tensão indicados na Tabela 6.1. Os sinais das tensões e correntes obtidos no ensaio experimental estão mostrados nas Figuras 6.9 e 6.10, respectivamente. Observa-se que as correntes de fase de estator apresentam formas de onda semelhantes em relação ao caso anterior, mas com amplitudes maiores para as correntes da componente fundamental e aproximadamente os mesmos valores no que diz respeito à de terceiro harmônico.

Figura 6.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

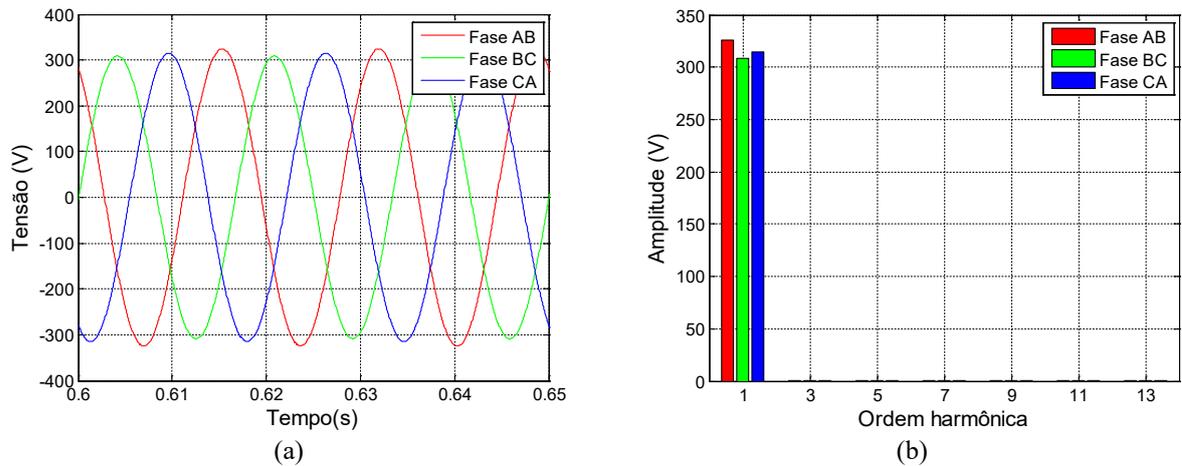
Figura 6.10 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

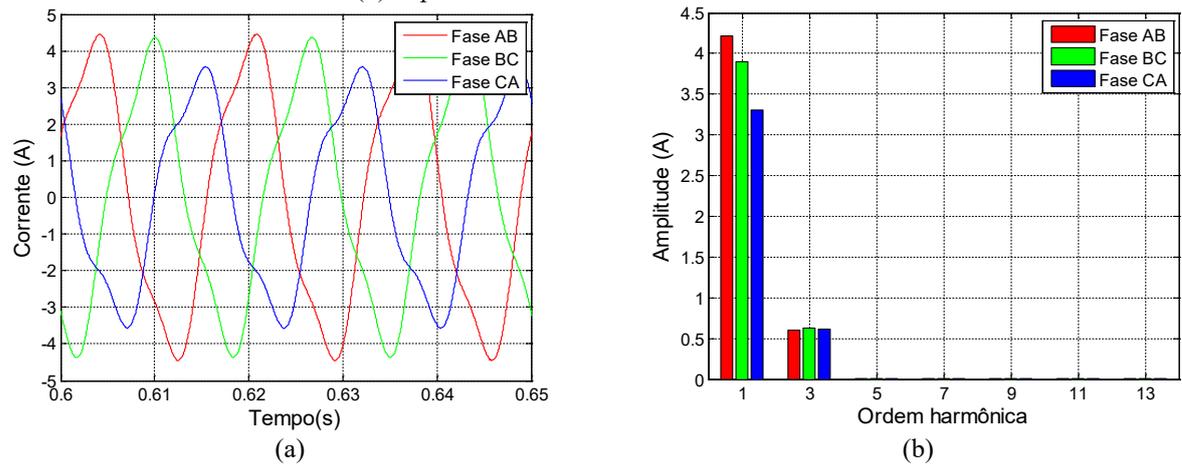
Em seguida, a simulação computacional foi realizada considerando as mesmas condições do ensaio experimental, tendo sido obtidos os sinais de tensão e corrente de estator que estão apresentados nas Figuras 6.11 e 6.12, respectivamente. Verifica-se novamente a adequada correspondência dos resultados teóricos com os experimentais, tanto no que se refere ao comportamento da componente fundamental da corrente quanto de terceiro harmônico.

Figura 6.11 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 6.12 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase; (b) Espectro harmônico das correntes de fase.



Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes das tensões e correntes estáticas relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional estão expostos na Tabela 6.3. Esses dados ratificam o bom

comportamento da modelagem matemática estudada no presente trabalho para casos envolvendo desequilíbrio de tensão.

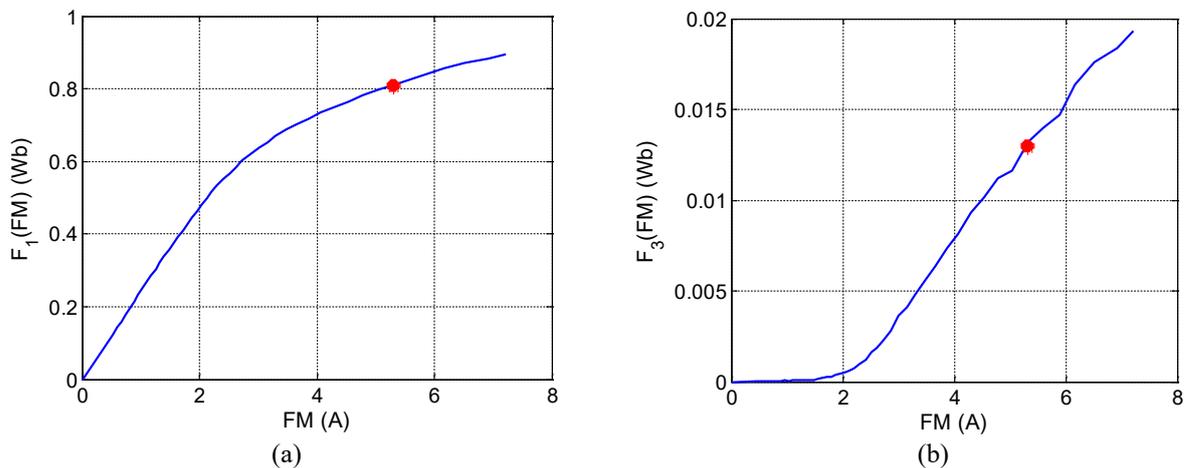
Tabela 6.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

Dados experimentais		Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	230,16	229,58
V_{bc}	218,12	218,31
V_{ca}	222,44	222,72
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	3,01	3,01
I_{bc}	2,87	2,79
I_{ca}	2,31	2,38

Fonte: Dados do autor.

O ponto de operação do gerador, no que diz respeito às funções harmônicas magnéticas, encontra-se apresentado na Figura 6.13, retratando a operação na região de saturação magnética.

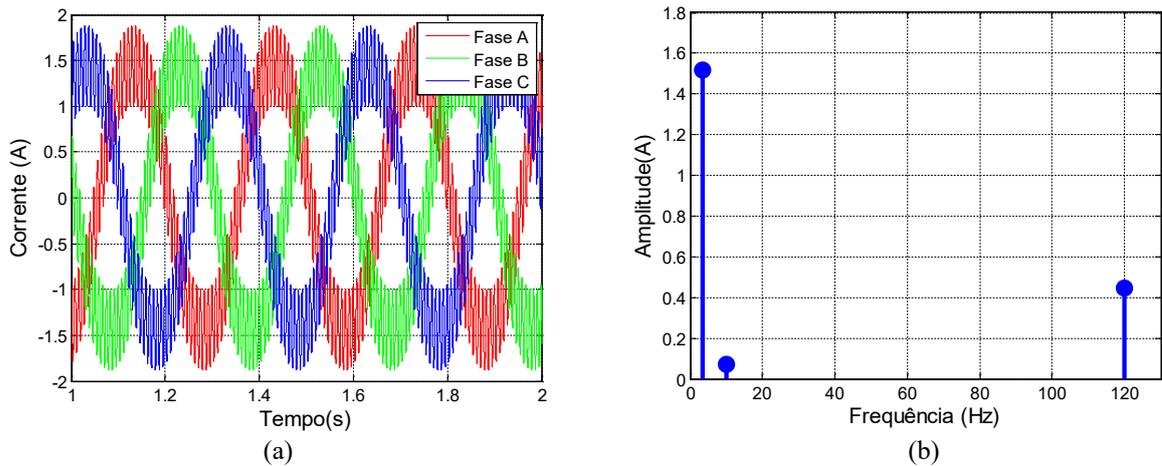
Figura 6.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(FM)$; (b) Gráfico da componente $F_3(FM)$.



Fonte: Dados do autor.

As correntes de rotor simuladas estão ilustradas na Figura 6.14, em que é possível observar que a maior parcela da deformação presente na forma de onda é causada pela corrente de dupla frequência.

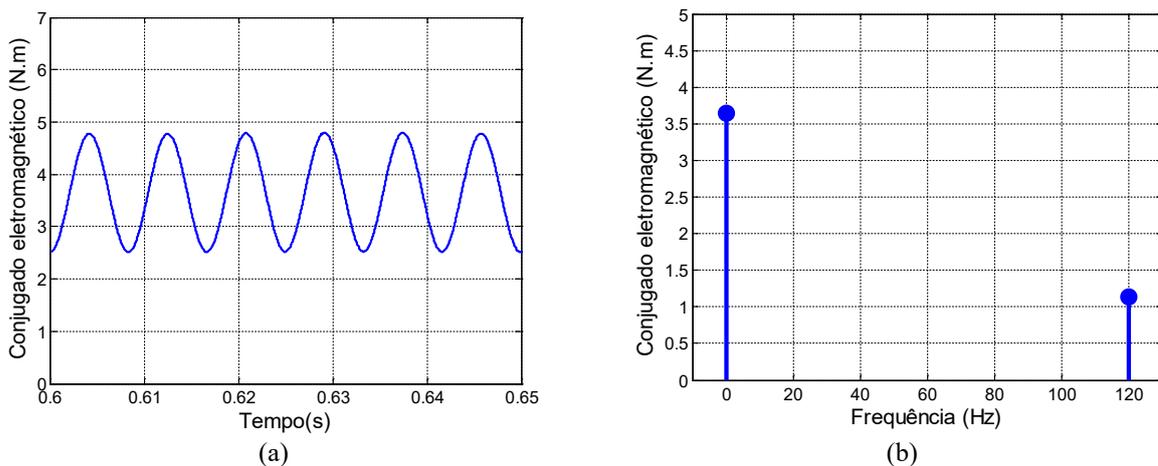
Figura 6.14 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

O comportamento do conjugado eletromagnético resultante da simulação digital está mostrado na Figura 6.15-(a). Ainda, é interessante observar que, mantendo-se o nível de desequilíbrio de tensão, mesmo com o aumento significativo do conjugado eletromagnético, aquele relacionado com a componente de dupla frequência manteve-se praticamente inalterado em relação ao caso anterior, o que pode ser constatado pelo espectro harmônico apresentado nas Figuras 6.8-(b) e 6.15-(b).

Figura 6.15 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



Fonte: Dados do autor.

6.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados e comparados os resultados obtidos em ensaios experimentais com os de simulações computacionais fundamentadas no modelo matemático empregado no presente trabalho, para a análise do gerador de indução de rotor bobinado conectado a um sistema elétrico com tensões desequilibradas. O estudo foi realizado para duas diferentes velocidades impostas pela máquina primária, sendo elas 1850 e 1900 rpm.

Além disso, visando a coerência do estudo, foram adotados como referência os limites estabelecidos pelo PRODIST para desequilíbrio de tensão, utilizando-se valores de tensões trifásicas que resultaram em um $FD\%$ de 2,93%. A comparação entre os resultados obtidos aponta para a eficácia da modelagem utilizada para as condições descritas acima.

Algumas constatações realizadas nesta etapa podem ser discutidas aqui. Primeiramente, verificou-se que o funcionamento do gerador ocorreu na região de saturação do material ferromagnético em ambos os casos analisados, em razão do aparecimento, na corrente de fase de estator, de uma componente de terceiro harmônico e pela localização do ponto em que o gerador opera nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$.

Outro aspecto que pôde ser observado nos resultados da simulação computacional é o aparecimento de uma componente de dupla frequência nas correntes de rotor em virtude do desequilíbrio de tensão. Dessa forma, como o conjugado eletromagnético está diretamente relacionado com as correntes rotóricas, oscilações bem mais significativas do que aquelas provenientes da saturação magnética são visualizadas.

Ainda, com relação a essa componente de dupla frequência que surge nas correntes rotóricas e no conjugado eletromagnético, percebe-se que sua amplitude se mantém praticamente constante frente à alteração da velocidade. Isso se deve, segundo os estudos mais aprofundados realizados por Donolo *et al.* (2016), à direta relação entre esse fenômeno e a componente de sequência negativa da tensão/corrente de estator que surge com o desequilíbrio de tensão. Como os valores de tensões adotados foram os mesmos para as duas condições de velocidade analisada, a amplitude da componente de dupla frequência na corrente rotórica e no conjugado, conseqüentemente, não sofreu alterações significativas.

7. ANÁLISE COM DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO

7.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação de distorções harmônicas de tensão ao gerador de indução de rotor bobinado operando à velocidade de 1850 e 1900 rpm, escolhidas para a padronização dos estudos de caso e garantir a integridade da máquina. Com o intuito de validação do modelo matemático não linear no domínio da fase estudado neste trabalho para essa situação, os resultados provenientes de simulações dinâmicas para os dois pontos de operação citados acima são confrontados com os dados experimentais.

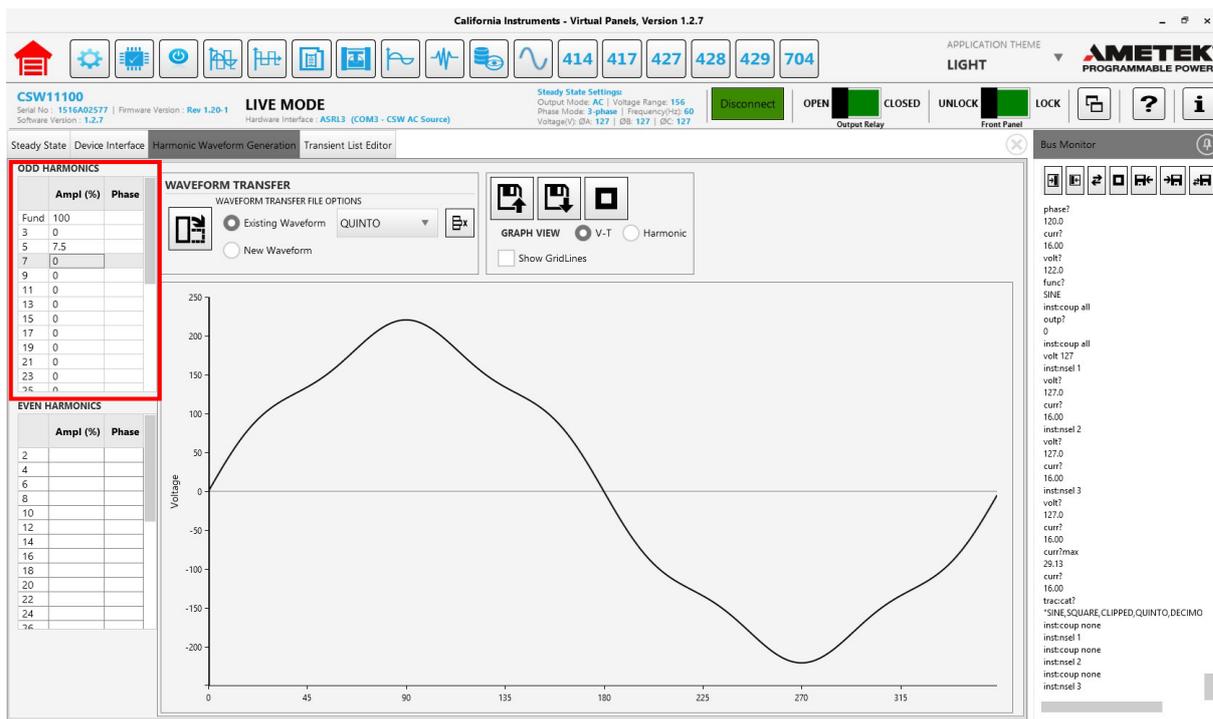
Portanto, as formas de onda de tensões e correntes do estator, bem como seus respectivos harmônicos são apresentados tanto para os resultados experimentais como os simulados. Outras informações relevantes provenientes da simulação, como correntes de rotor, conjugado eletromagnético e funções harmônicas magnéticas, são também apresentadas em forma gráfica.

Das distorções harmônicas listadas em 3.3, são analisadas aqui, de forma individual, aquelas originadas por componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3, mais especificamente, as de 5^a, 7^a e 13^a ordem. Para cada caso, uma componente harmônica de tensão com 7,5% de amplitude da componente fundamental é inserida ao sistema, respeitando assim os limites estabelecidos pelo PRODIST para a classe de tensão menor que 1 kV.

A geração de forma de onda com harmônicos através da fonte programável é realizada a partir da ferramenta *Harmonic Waveform Generation*, como está mostrada na Figura 7.1, presente no *software* de programação da fonte.

Todos os ensaios, tanto experimentais quanto de simulações, são realizados com o gerador operando com velocidade controlada. Por fim, é importante reiterar que os enrolamentos de estator são conectados em delta-paralelo, correspondente à tensão de 220 V, e os de rotor são curto-circuitados externamente.

Figura 7.1 – Interface de geração de forma de onda com harmônicos pela fonte programável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2 Resultados e discussões

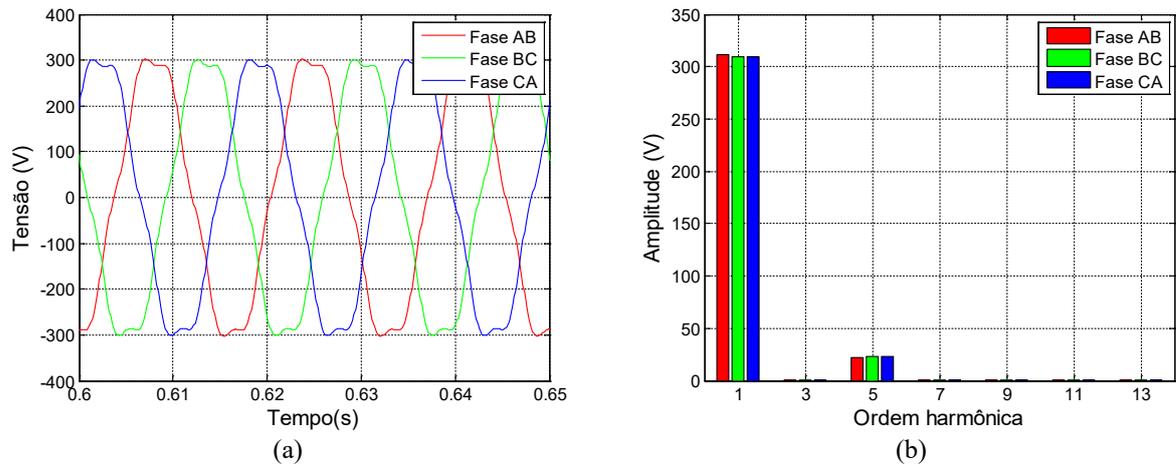
7.2.1 Velocidade de 1850 rpm

7.2.1.1 Componente fundamental com quinto harmônico

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no ensaio experimental e por meio da simulação computacional quando é inserida uma componente de quinto harmônico junto à componente fundamental da tensão do sistema em que o gerador de indução de rotor bobinado está conectado. A velocidade de operação imposta é de 1850 rpm.

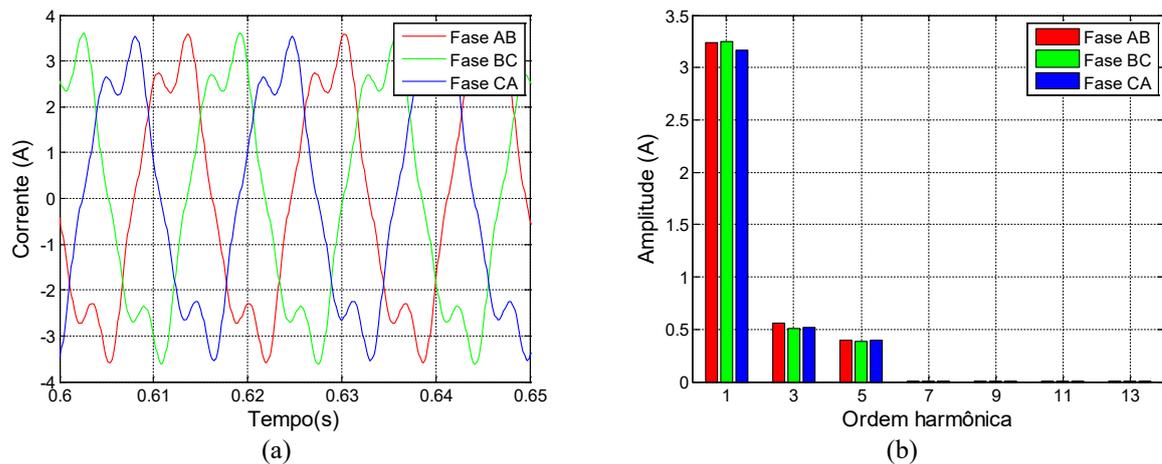
Nas Figuras 7.2 e 7.3 estão ilustradas as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator, respectivamente, provenientes do ensaio experimental. Neste caso, para uma distorção harmônica total na tensão igual a 7,5%, obteve-se 19,73% na corrente. Percebe-se pelo espectro harmônico da corrente, Figura 7.3-(b), o aparecimento de uma componente de terceiro e quinto harmônico.

Figura 7.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.3 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

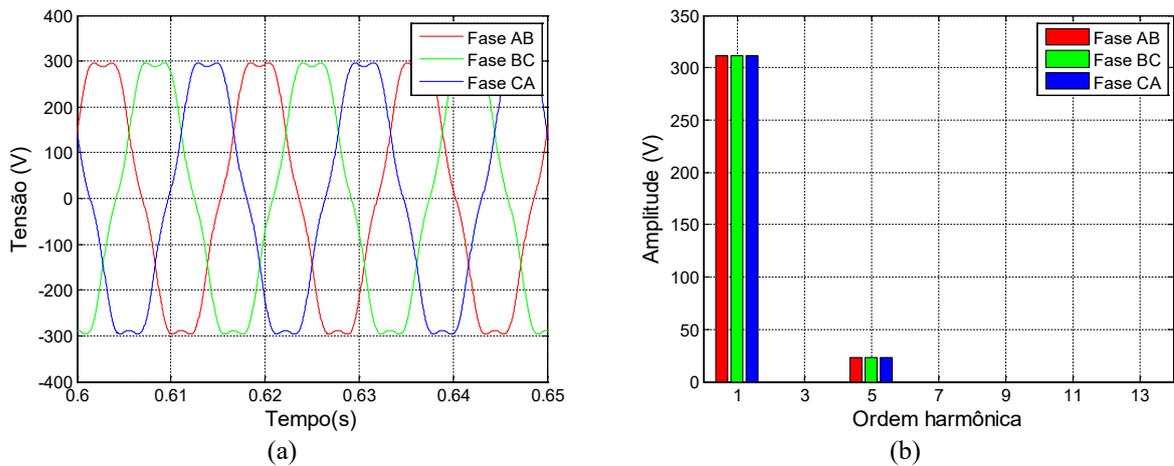


Fonte: Dados do autor.

A simulação computacional parametrizada como o ensaio experimental resultou no gráfico da tensão apresentado na Figura 7.4 e no da corrente, Figura 7.5. Nesse caso, para uma distorção harmônica total de tensão de 7,5%, obteve-se na corrente 19,70% de distorção harmônica total.

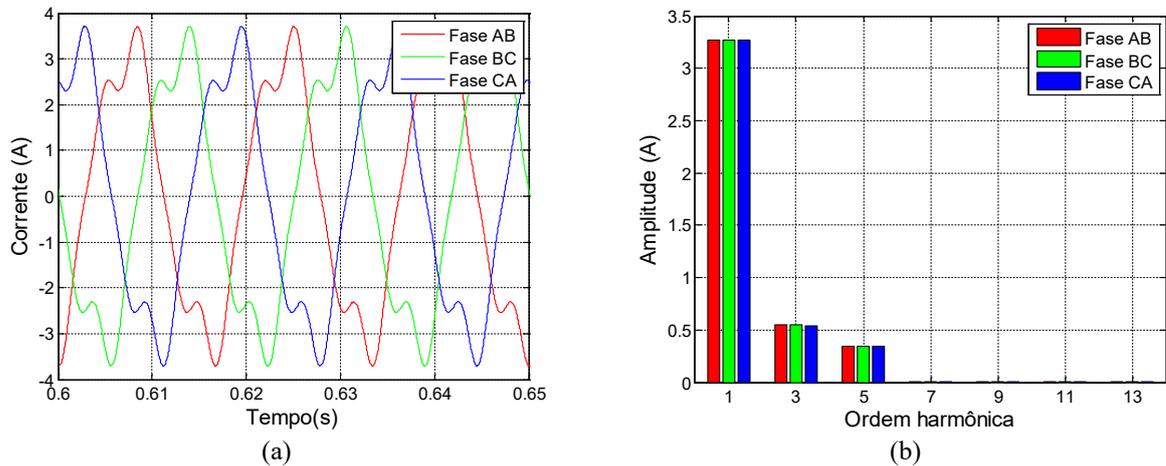
Na Tabela 7.1 estão mostrados os valores eficazes relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional, sendo possível observar um bom comportamento do modelo matemático frente às distorções harmônicas de tensão. Percebe-se pouca alteração dos valores eficazes de tensão e corrente com a inserção da componente de tensão de quinto harmônico em relação à análise efetuada em 5.2.1.

Figura 7.4 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.5 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Tabela 7.1 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

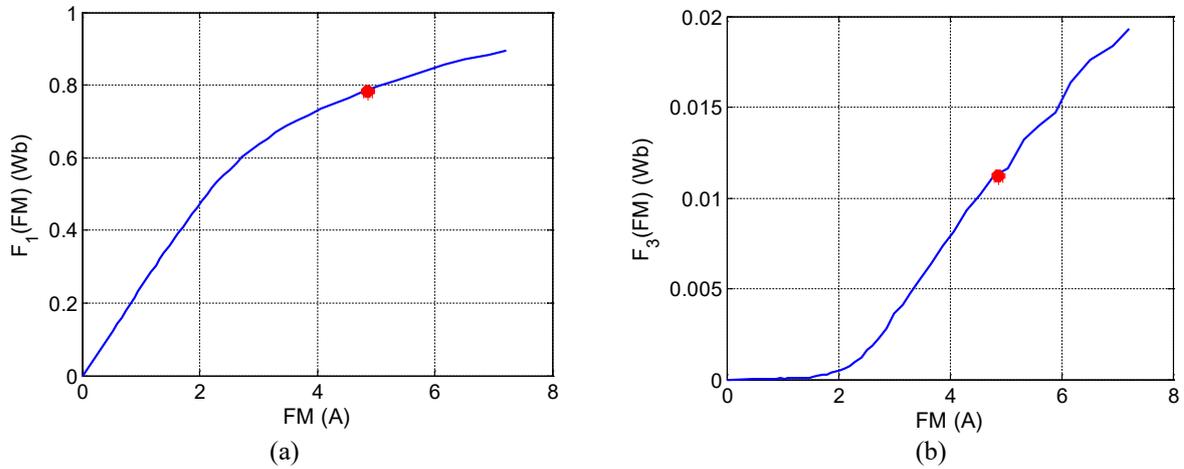
	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,54	220,45
V_{bc}	219,70	220,45
V_{ca}	219,58	220,45
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,34	2,35
I_{bc}	2,34	2,35
I_{ca}	2,28	2,35

Fonte: Dados do autor.

Está indicado nas Figuras 7.6-(a) e 7.6-(b) a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, o gerador

opera na região de saturação magnética, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator.

Figura 7.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.

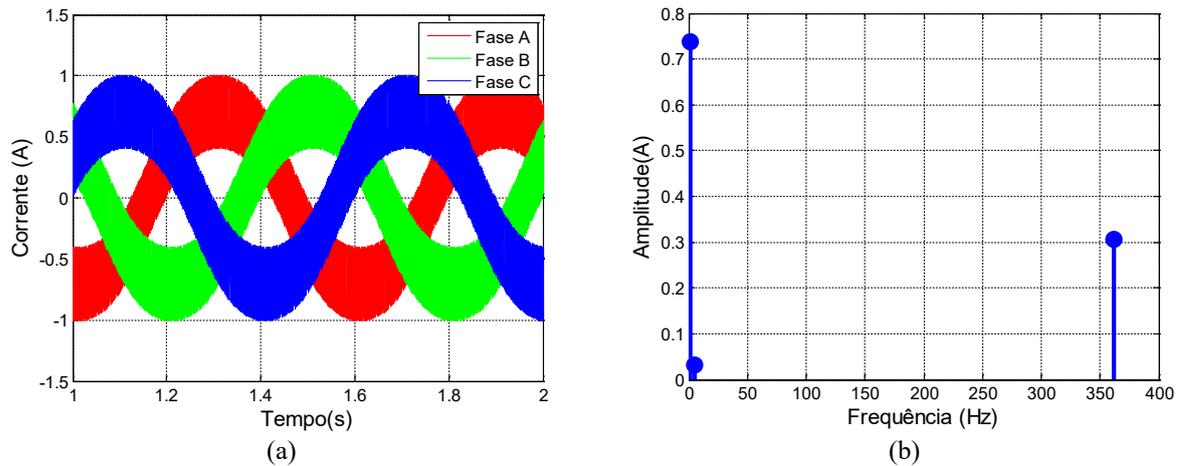


Fonte: Dados do autor.

Ao circular em pelos enrolamentos estáticos, as correntes de quinta ordem harmônica geram um campo magnético rotativo com velocidade igual a cinco vezes a velocidade do campo magnético criado pela corrente fundamental. Todavia, como a componente de quinta ordem harmônica é de sequência negativa (ver Quadro 3.2), o seu respectivo campo gira em sentido contrário a esse último. Em razão disso, esse campo enlaça os enrolamentos rotóricos com velocidade relativa de seis vezes o valor da velocidade síncrona (PIRES, 2010; OLIVEIRA, 2018; RAMAN *et al.*, 2020), induzindo nesses enrolamentos correntes de sexta ordem harmônica, como está mostrado na Figura 7.7.

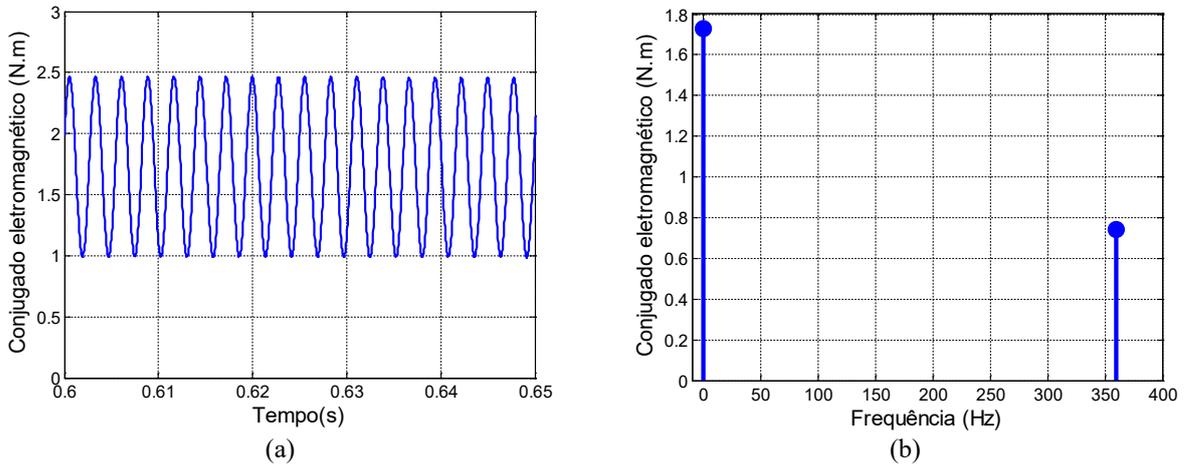
Como vem sendo abordado ao longo do presente trabalho, o conjugado eletromagnético do gerador é dependente das correntes rotóricas. Logo, assim como ocorre quando há desequilíbrio de tensão, verifica-se do mesmo modo o aparecimento do conjugado pulsante, como está ilustrado na Figura 7.8-(a). Entretanto, o valor da frequência de oscilação é diferente, conforme o espectro apresentado na Figura 7.8-(b), onde pode-se observar que a frequência que provoca a oscilação é a mesma que aparece nas correntes rotóricas.

Figura 7.7 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.8 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



Fonte: Dados do autor.

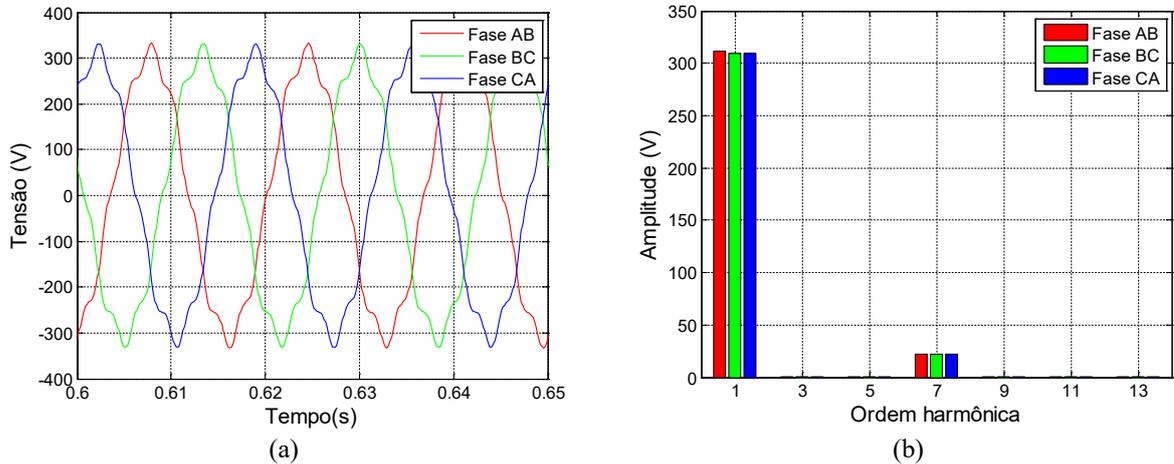
7.2.1.2 Componente fundamental com sétimo harmônico

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no ensaio experimental e por meio da simulação computacional quando é inserida uma componente de sétimo harmônico junto à componente fundamental da tensão do sistema em que o gerador de indução de rotor bobinado está conectado. A velocidade de operação imposta é de 1850 rpm.

Os gráficos de tensão e corrente de fase provenientes do ensaio experimental estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 7.9 e 7.10. Neste caso, para uma distorção harmônica total na tensão igual a 7,5%, obteve-se 18,94% na corrente. Percebe-se pelo espectro

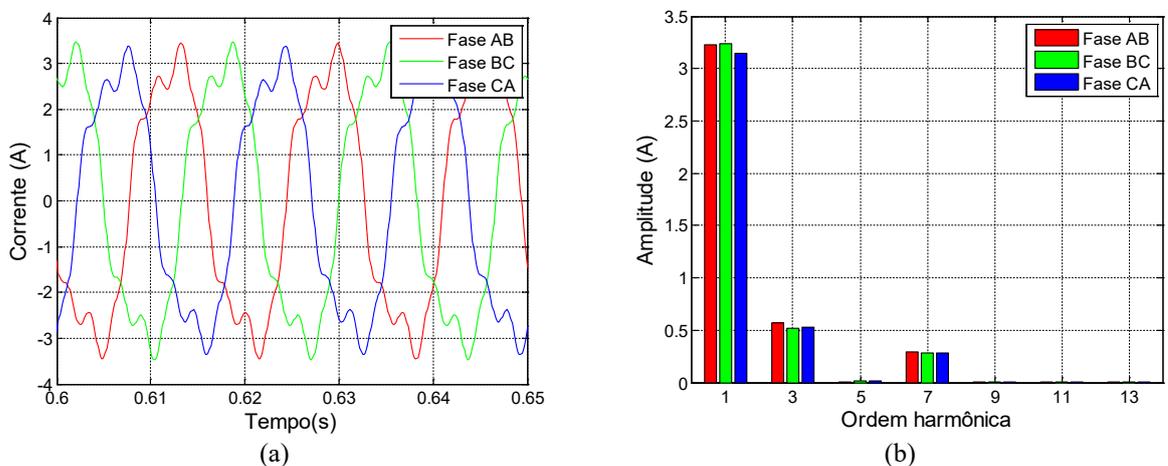
harmônico da corrente, Figura 7.10-(b), o aparecimento de uma componente de terceiro e sétimo harmônico.

Figura 7.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

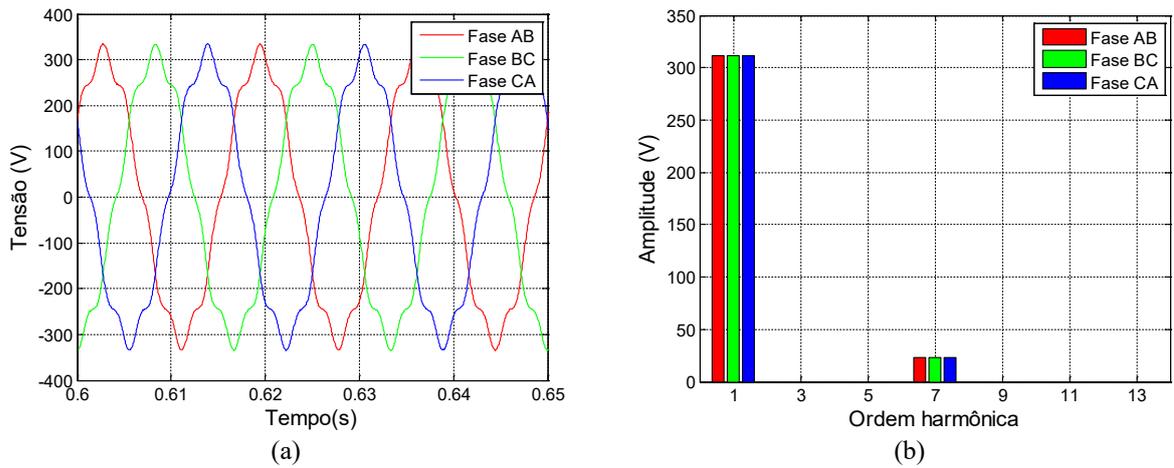
Figura 7.10 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

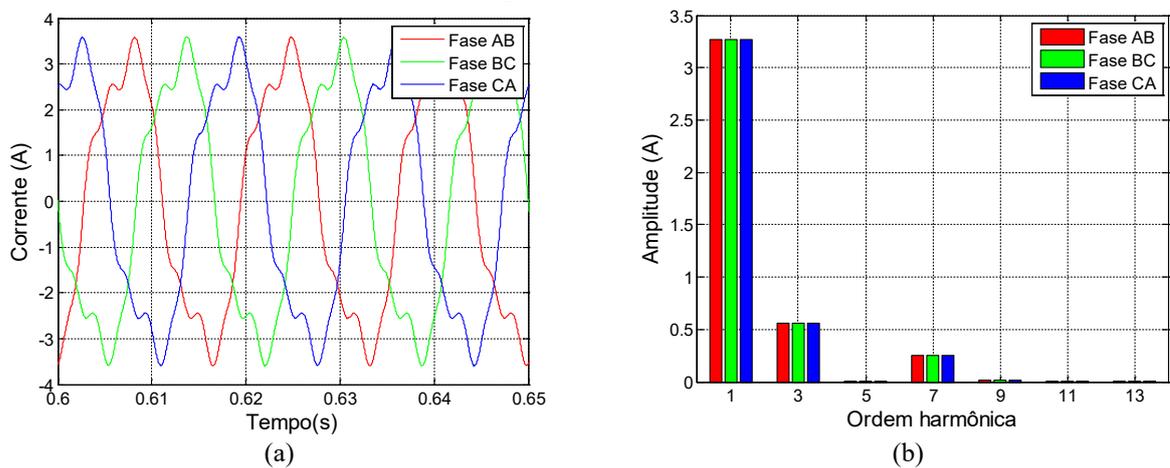
Realizando a simulação computacional com os mesmos dados de tensão e velocidade do ensaio experimental, foram obtidos os gráficos das tensões e correntes que estão mostrados nas Figuras 7.11 e 7.12, respectivamente. Nesse caso, para uma distorção harmônica total de tensão de 7,5%, obteve-se na corrente 18,60% de distorção harmônica total.

Figura 7.11 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.12 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Tabela 7.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

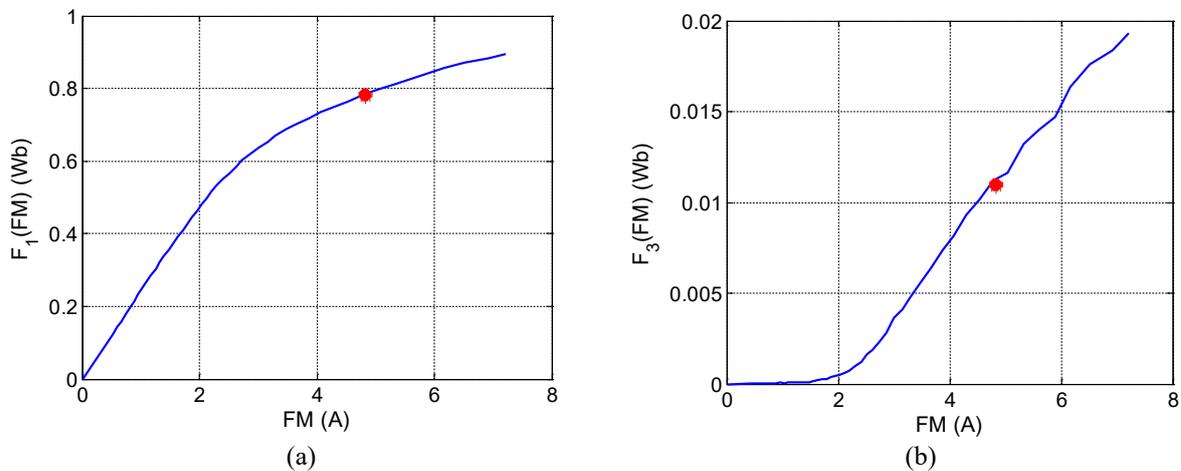
	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,53	220,47
V_{bc}	219,70	220,47
V_{ca}	219,53	220,47
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,32	2,35
I_{bc}	2,32	2,35
I_{ca}	2,26	2,35

Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes da tensão e corrente de fase de estator do ensaio experimental e da análise teórica estão apresentados na Tabela 7.2. Comparando-os, é possível perceber que os valores ficaram próximos.

Está indicado nas Figuras 7.13-(a) e 7.13-(b) a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, o gerador opera na região de saturação magnética, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator.

Figura 7.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.

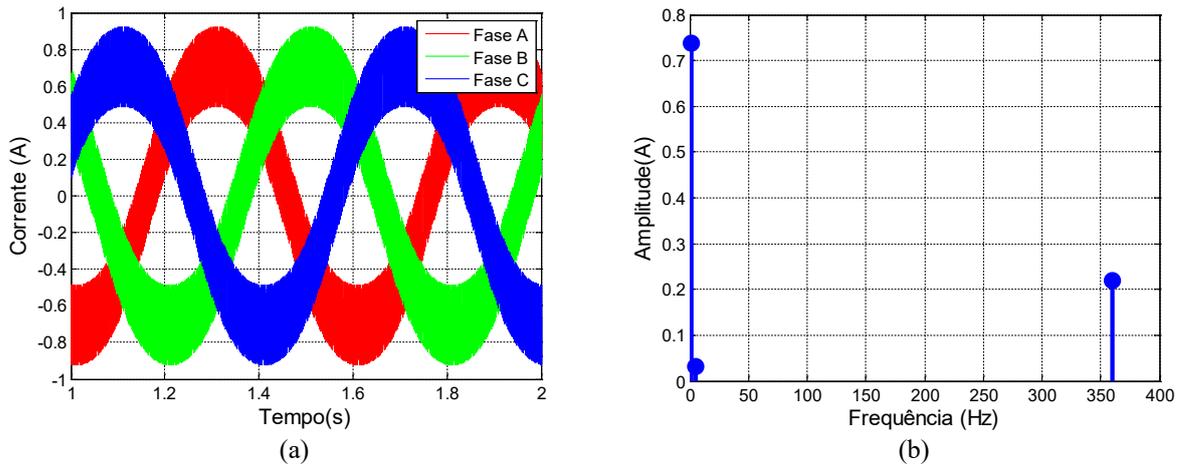


Fonte: Dados do autor.

A corrente de rotor proveniente da simulação está apresentada na Figura 7.14-(a), sendo possível verificar novamente a presença da componente harmônica de sexta ordem. A causa é semelhante ao do caso analisado anteriormente, todavia, a componente harmônica analisada agora é classificada como componente de sequência positiva. Isso significa que, tanto o campo magnético referente à componente fundamental quanto o da componente de sétima ordem giram no mesmo sentido. Com isso, a velocidade relativa é, outra vez, igual a seis vezes a frequência fundamental.

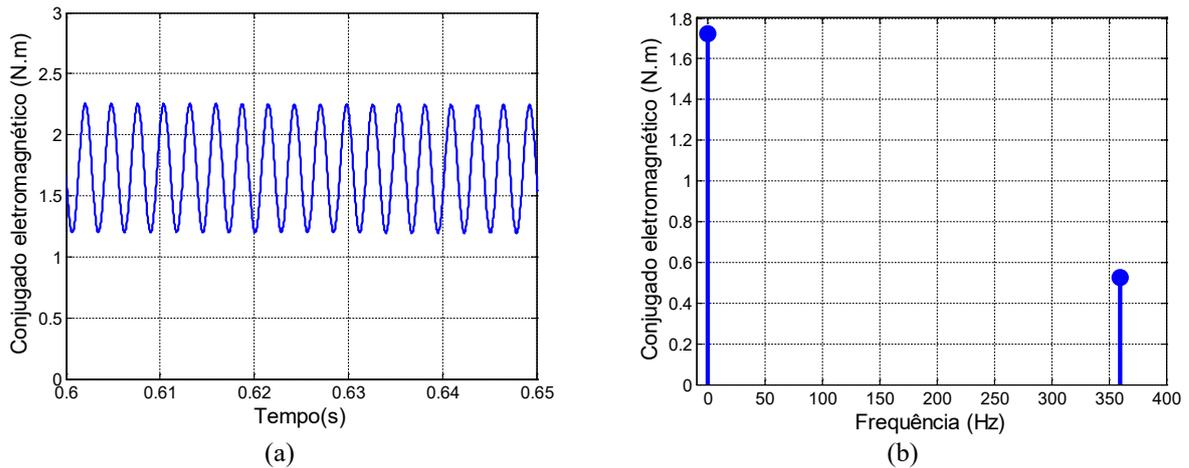
Na Figura 7.15 está ilustrado o conjugado eletromagnético, sendo possível observar novamente o fenômeno do conjugado pulsante, resultado da presença da componente de sexto harmônico na corrente rotórica.

Figura 7.14 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.15 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



Fonte: Dados do autor.

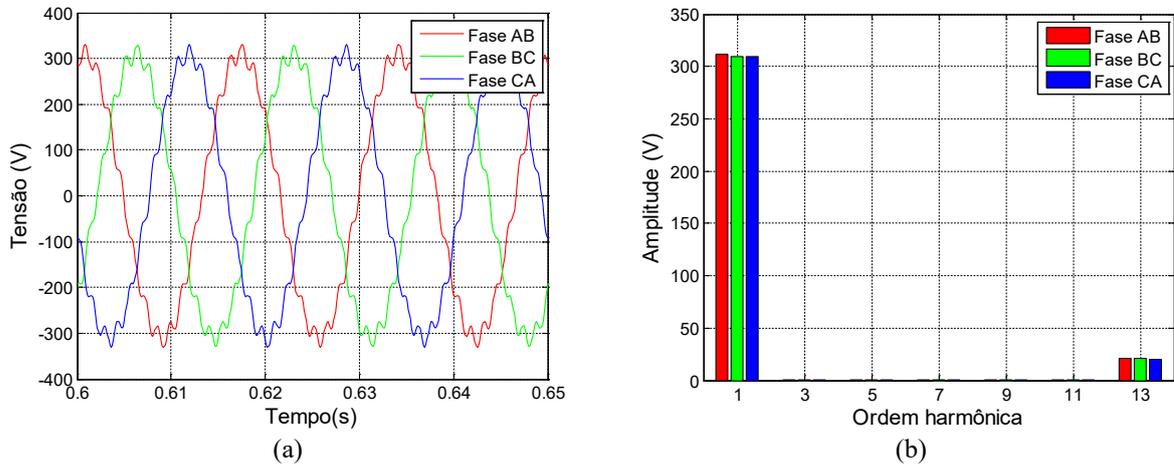
7.2.1.3 Componente fundamental com décimo terceiro harmônico

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no ensaio experimental e por meio da simulação computacional quando é inserida uma componente de décimo terceiro harmônico junto à componente fundamental da tensão do sistema em que o gerador de indução de rotor bobinado está conectado. A velocidade de operação imposta é de 1850 rpm.

Os gráficos de tensão e corrente referentes ao ensaio experimental estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 7.16 e 7.17. Nessa condição, para uma distorção harmônica total de tensão de 7,5%, obteve-se na corrente uma distorção igual a 17,36%. Observa-se pelo

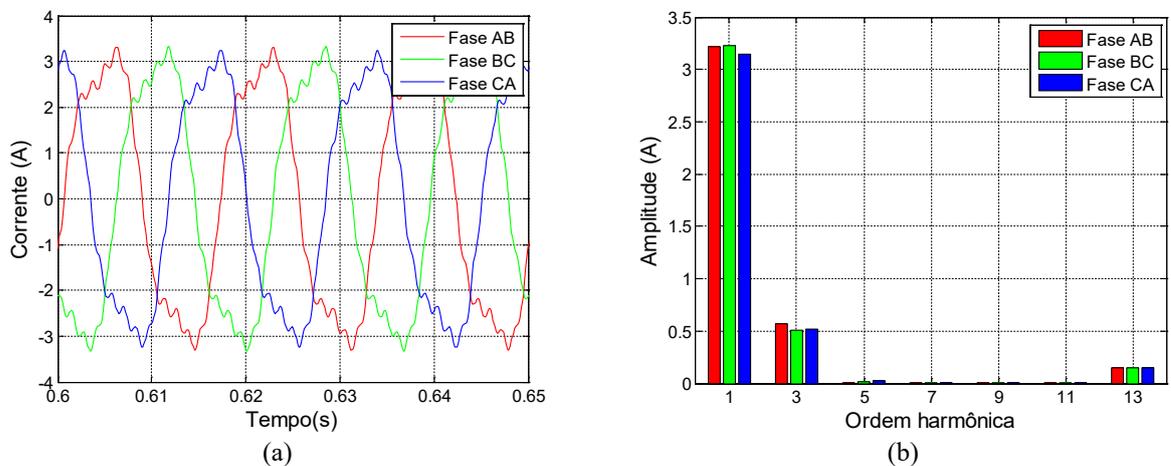
espectro harmônico da corrente, Figura 7.17-(b), o aparecimento de componentes de terceiro e décimo terceiro harmônico.

Figura 7.16 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

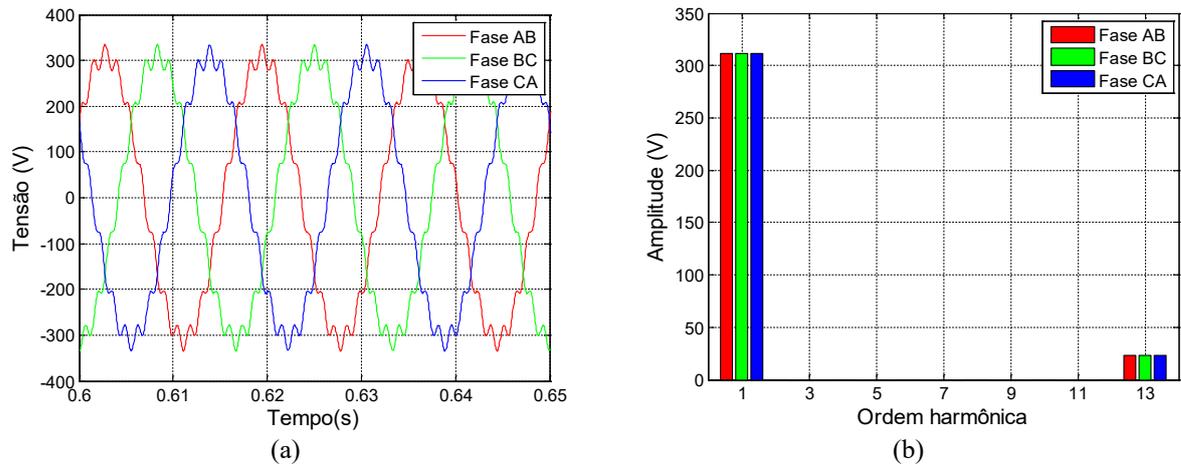
Figura 7.17 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

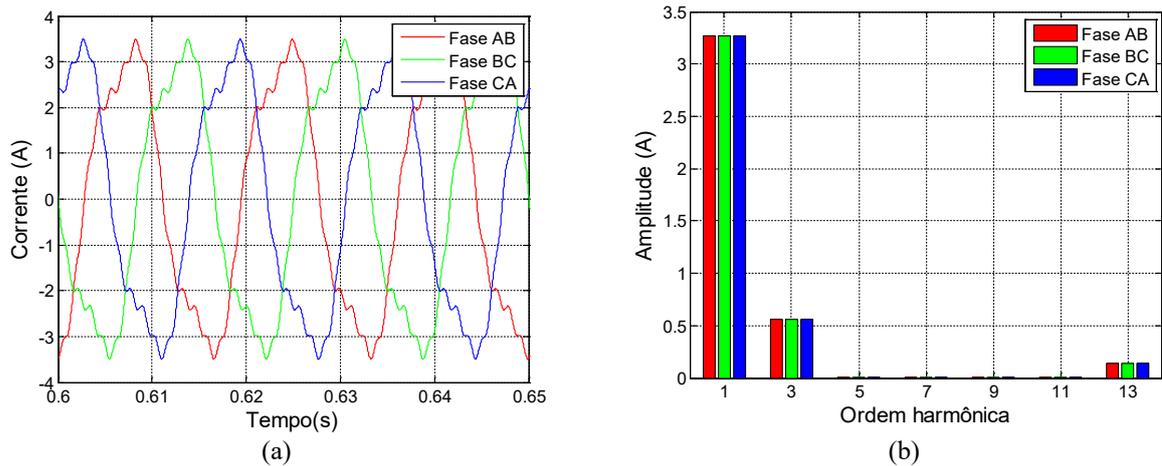
Os dados obtidos no ensaio teórico, ou seja, por meio da simulação computacional, são mostrados a seguir. Primeiramente, tem-se os gráficos e os espectros harmônicos das tensões e correntes ilustrados, respectivamente, nas Figuras 7.18 e 7.19. Para uma distorção harmônica total na tensão de 7,5% foi obtida uma distorção na corrente igual a 17,53%.

Figura 7.18 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.19 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Tabela 7.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

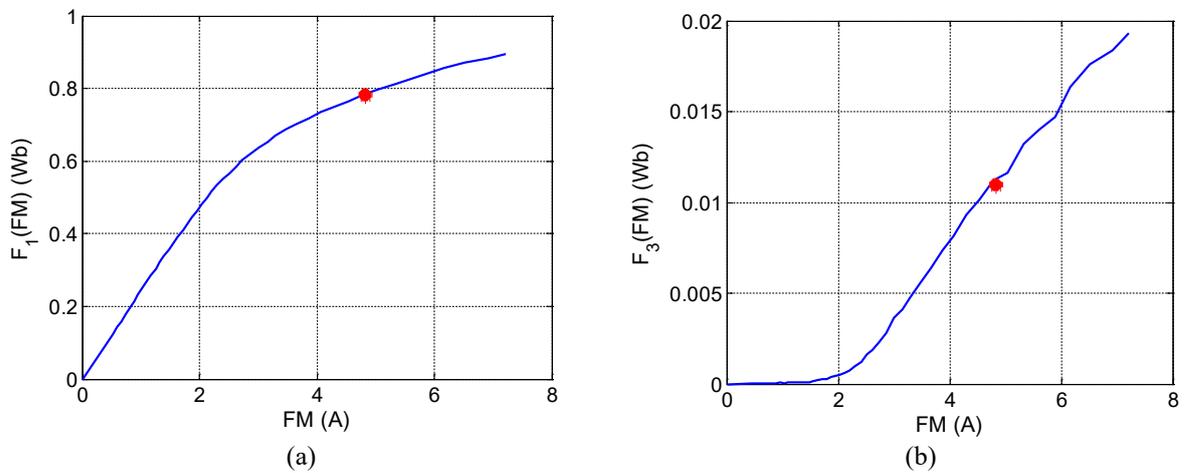
	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,40	220,47
V_{bc}	219,63	220,47
V_{ca}	219,42	220,47
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,31	2,34
I_{bc}	2,31	2,34
I_{ca}	2,25	2,34

Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes de tensão e corrente tanto do ensaio experimental quanto da simulação digital estão apresentados na Tabela 7.3. Comparando-os, é possível perceber que os valores ficaram próximos.

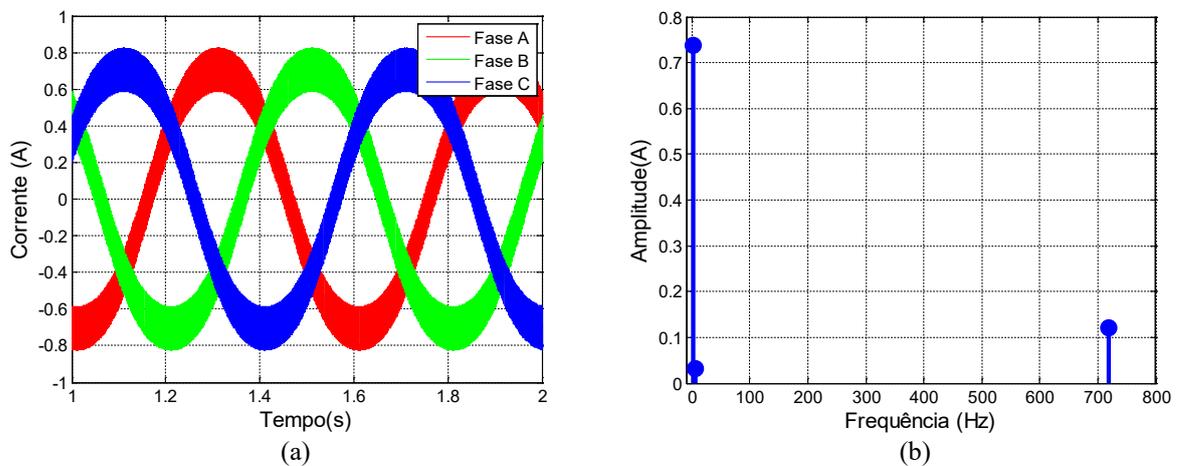
Está indicado nas Figuras 7.20-(a) e 7.20-(b) a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, o gerador opera na região de saturação magnética, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator.

Figura 7.20 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.21 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.

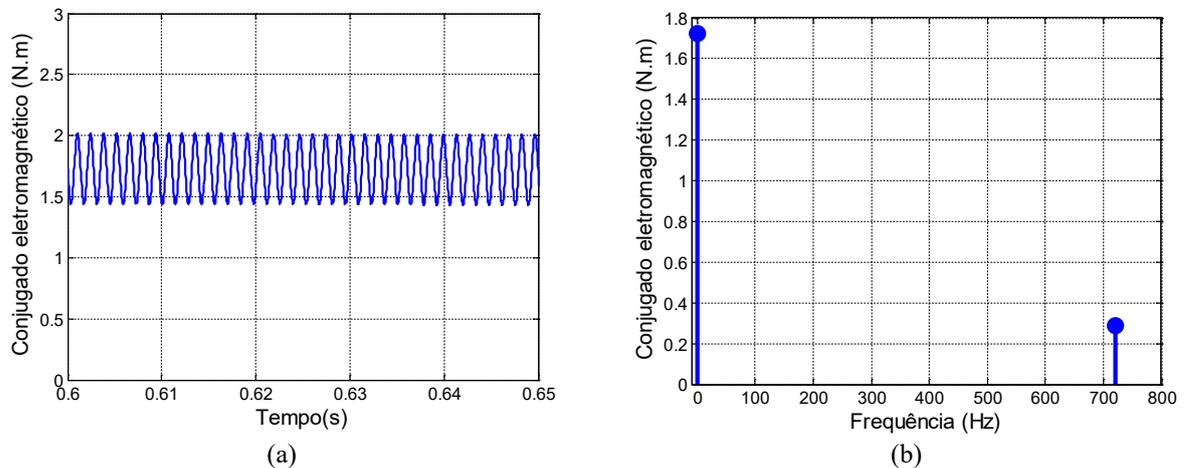


Fonte: Dados do autor.

Assim como a componente harmônica de sétima ordem, a de décima terceira também é classificada como componente harmônica de sequência positiva. Conseqüentemente, seu campo magnético gira no mesmo sentido que o da componente fundamental. Desse modo, a velocidade relativa com que essa componente de maior ordem enlaça os enrolamentos de rotor é igual a doze vezes a velocidade da componente fundamental, como está apresentado no espectro harmônico mostrado na Figura 7.21.

Na Figura 7.22 está ilustrado o conjugado eletromagnético, sendo possível observar, novamente, o fenômeno do conjugado pulsante, resultado da presença da componente de décima segunda ordem na corrente rotórica.

Figura 7.22 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



Fonte: Dados do autor.

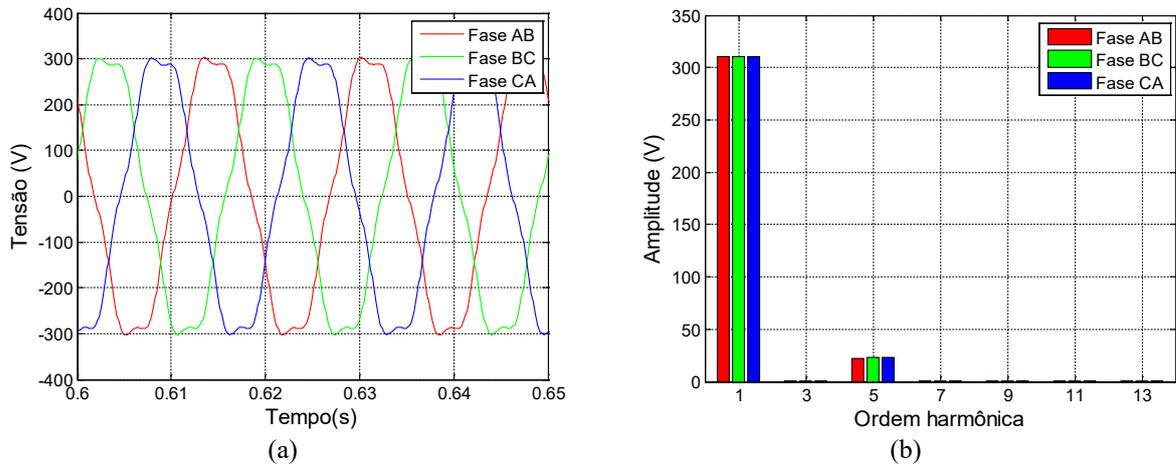
7.2.2 Velocidade de 1900 rpm

7.2.2.1 Componente fundamental com quinto harmônico

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no ensaio experimental e por meio da simulação computacional quando é inserida uma componente de quinto harmônico junto à componente fundamental da tensão do sistema em que o gerador de indução de rotor bobinado está conectado. A nova velocidade de operação imposta é de 1900 rpm.

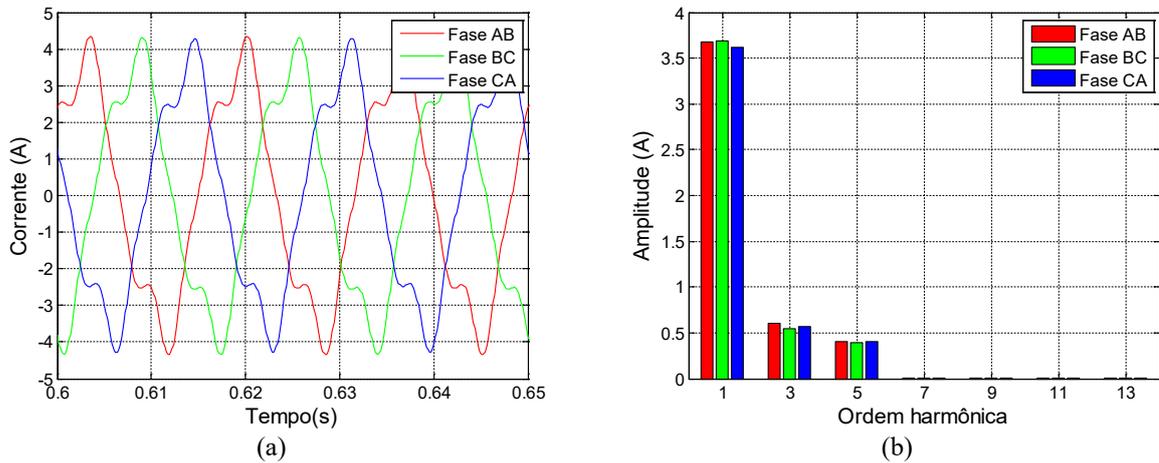
Nas Figuras 7.23 e 7.24 estão ilustradas as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator, respectivamente, provenientes do ensaio experimental. Neste caso, para uma distorção harmônica total na tensão igual a 7,5%, obteve-se 19,05% na corrente.

Figura 7.23 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.24 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

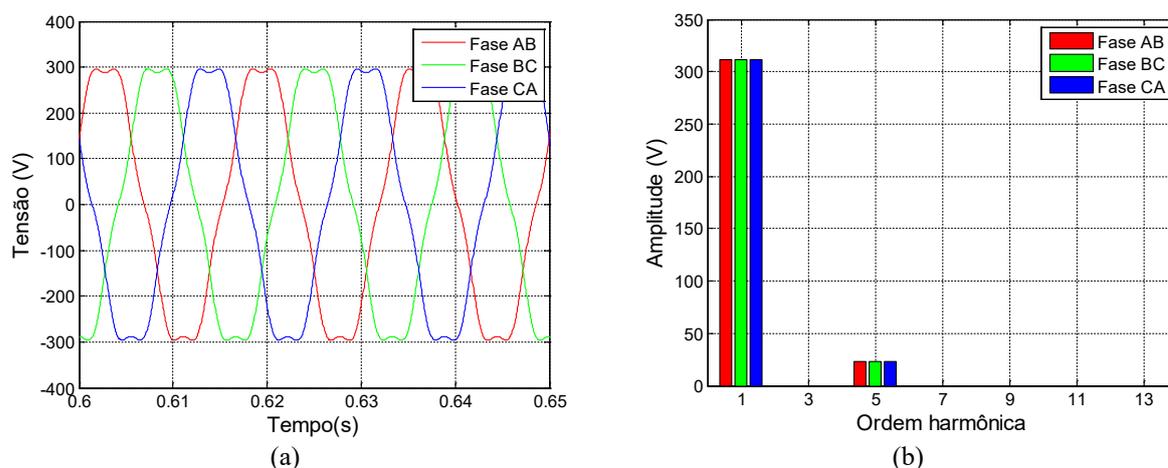


Fonte: Dados do autor.

A simulação computacional parametrizada como o ensaio experimental resultou no gráfico da tensão apresentado na Figura 7.25 e no da corrente, Figura 7.26. Nesse caso, para uma distorção harmônica total de tensão de 7,5%, obteve-se na corrente 18,19% de distorção harmônica total.

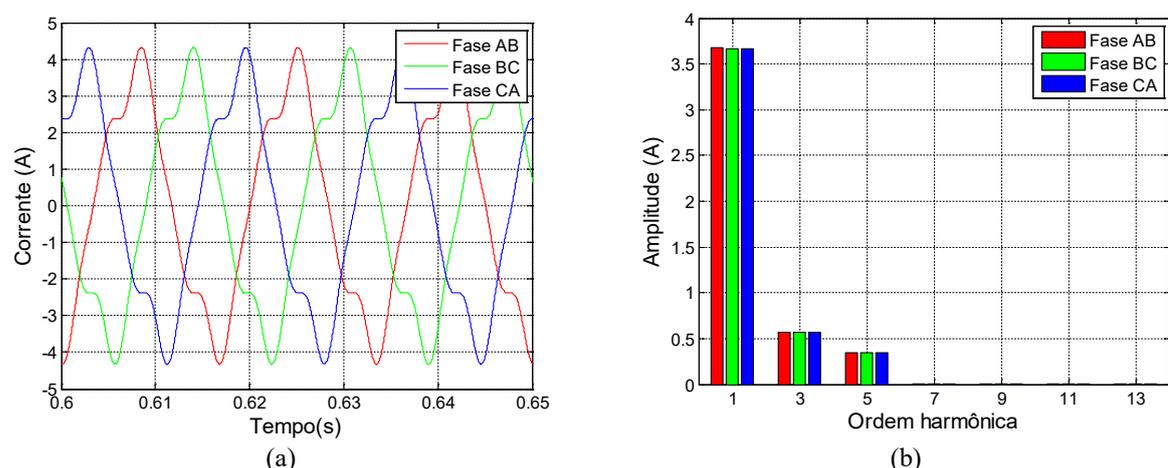
Na Tabela 7.4 estão mostrados os valores eficazes relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional, sendo possível observar um bom comportamento do modelo matemático frente às distorções harmônicas de tensão com o aumento de velocidade. Percebe-se pouca alteração dos valores eficazes de tensão e corrente com a inserção da componente de tensão de quinto harmônico em relação à análise efetuada em 5.2.2.

Figura 7.25 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.26 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Tabela 7.4 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

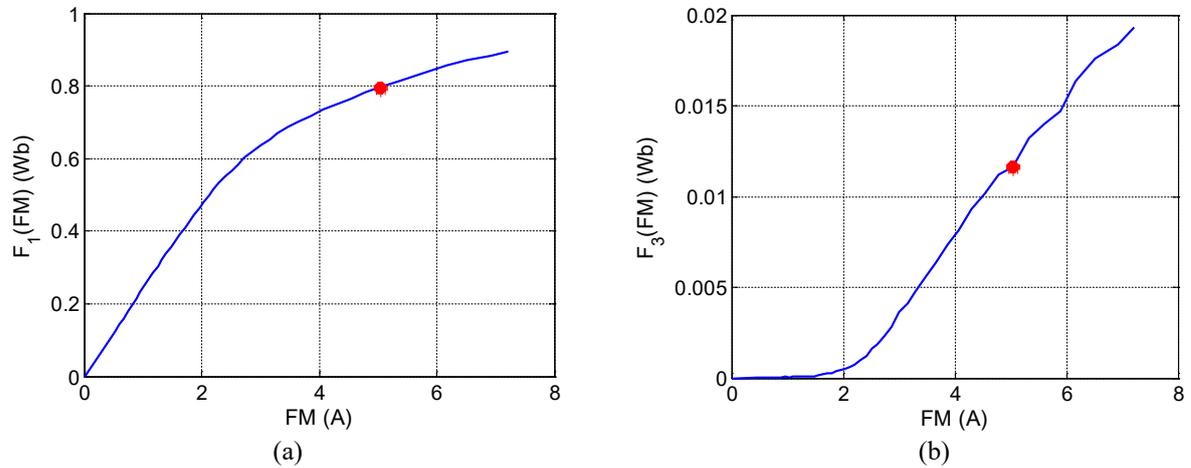
	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,43	220,37
V_{bc}	219,84	220,37
V_{ca}	219,89	220,37
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,65	2,63
I_{bc}	2,65	2,63
I_{ca}	2,60	2,63

Fonte: Dados do autor.

Está indicado nas Figuras 7.6-(a) e 7.6-(b) a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, o gerador

opera na região de saturação magnética, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator.

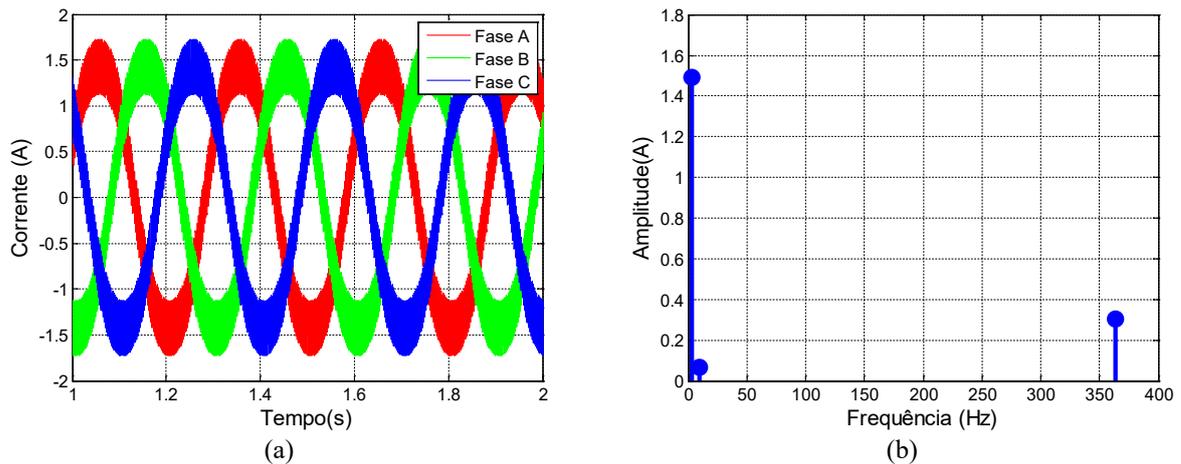
Figura 7.27 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(FM)$; (b) Gráfico da componente $F_3(FM)$.



Fonte: Dados do autor.

Pelas mesmas razões descritas em 7.2.1.1, a componente de quinto harmônico da corrente de estator resulta em uma componente de sexto harmônico na corrente de rotor e no conjugado eletromagnético, como pode ser visualizado nas Figuras 7.28 e 7.29, respectivamente.

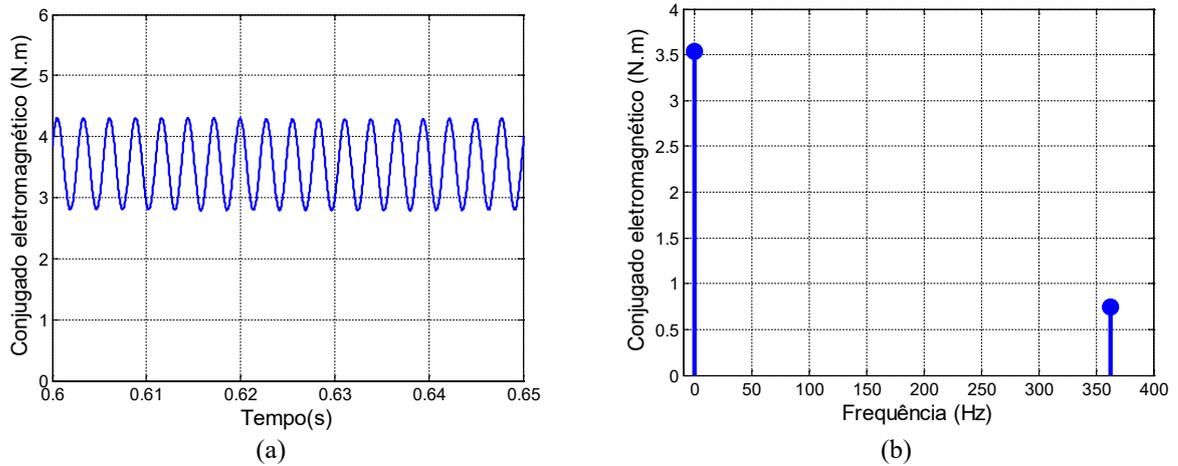
Figura 7.28 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Constata-se que, com o aumento da velocidade, a componente de sexto harmônico da corrente de rotor e do conjugado mantém-se praticamente inalterada. O mesmo ocorre com a componente de quinto harmônico da corrente de estator.

Figura 7.29 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de quinta ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



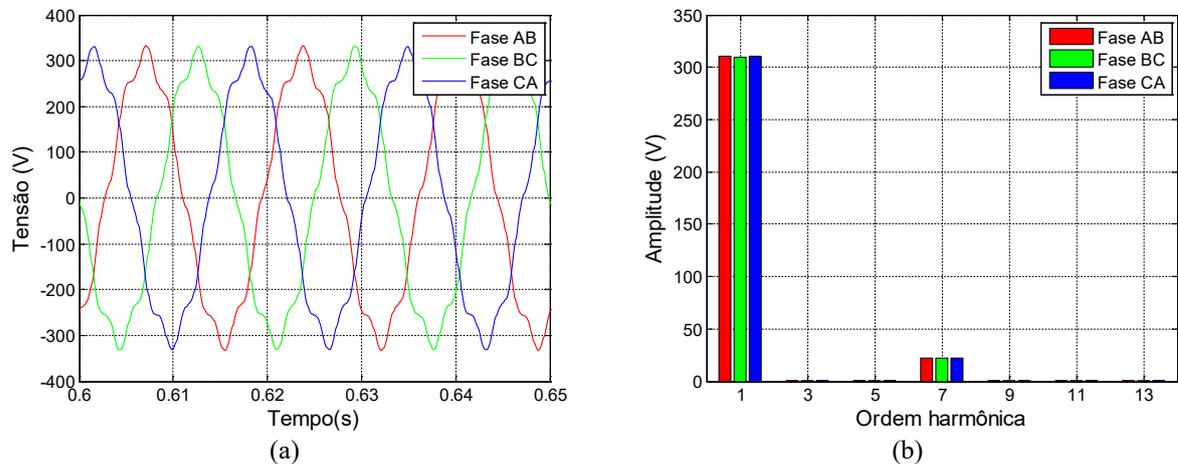
Fonte: Dados do autor.

7.2.2.2 Componente fundamental com sétimo harmônico

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no ensaio experimental e por meio da simulação computacional quando é inserida uma componente de sétimo harmônico junto à componente fundamental da tensão do sistema em que o gerador de indução de rotor bobinado está conectado. A velocidade de operação imposta é de 1900 rpm.

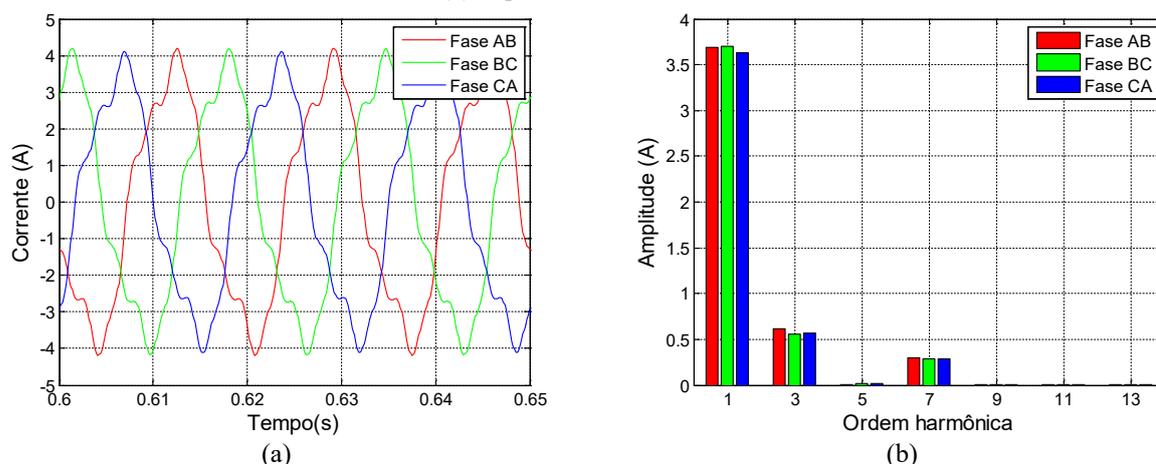
Os gráficos de tensão e corrente de fase provenientes do ensaio experimental estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 7.30 e 7.31. Neste caso, para uma distorção harmônica total na tensão igual a 7,5%, obteve-se 17,71% na corrente. Percebe-se pelo espectro harmônico da corrente, Figura 7.31-(b), o aparecimento de componentes de terceiro e sétimo harmônico.

Figura 7.30 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.31 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

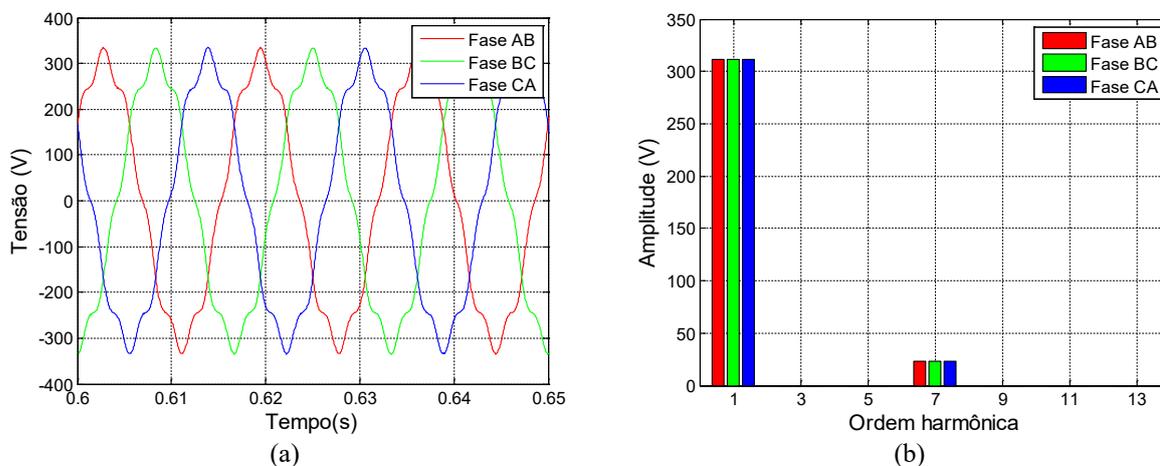


Fonte: Dados do autor.

Realizando a simulação computacional com os mesmos dados de tensão e velocidade do ensaio experimental, foram obtidos os gráficos das tensões e correntes que estão mostrados nas Figuras 7.32 e 7.33, respectivamente. Nesse caso, para uma distorção harmônica total de tensão de 7,5%, obteve-se na corrente 17,18% de distorção harmônica total.

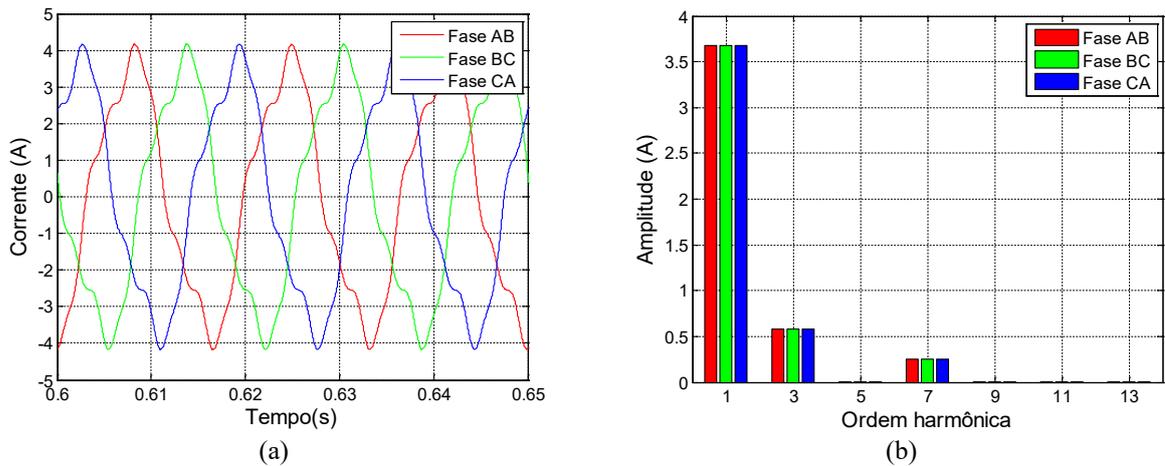
Assim como foi observado no caso anterior, o aumento da velocidade aqui também pouco interfere nas componentes harmônicas de corrente de estator, o que pode ser verificado comparando-se as Figuras 7.31 e 7.33 com as suas correspondentes obtidas em 7.2.1.2.

Figura 7.32 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.33 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Tabela 7.5 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

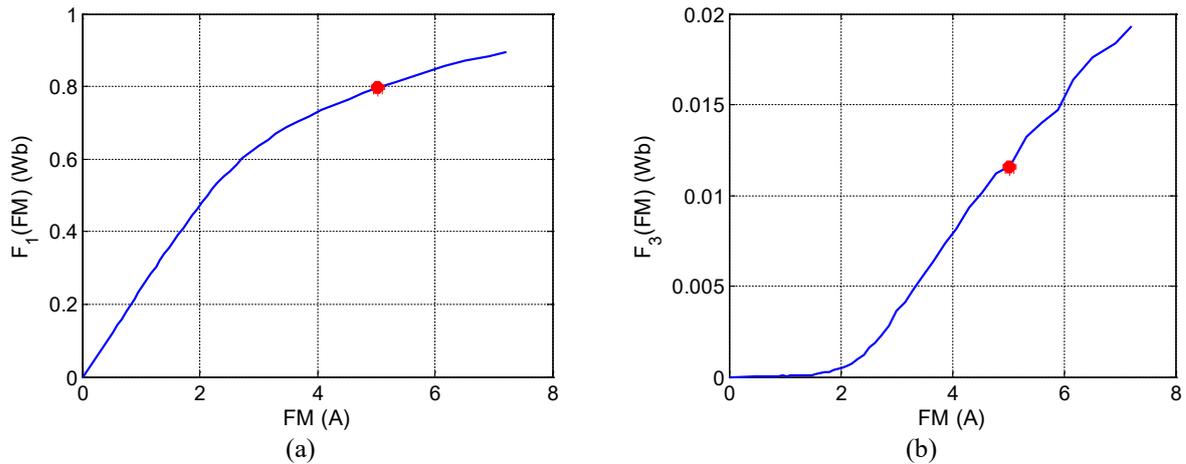
	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,41	220,37
V_{bc}	219,72	220,37
V_{ca}	219,76	220,37
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,65	2,63
I_{bc}	2,65	2,63
I_{ca}	2,60	2,63

Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes da tensão e corrente de fase de estator do ensaio experimental e da simulação computacional estão apresentados na Tabela 7.5. Comparando-os, é possível perceber que os valores ficaram próximos.

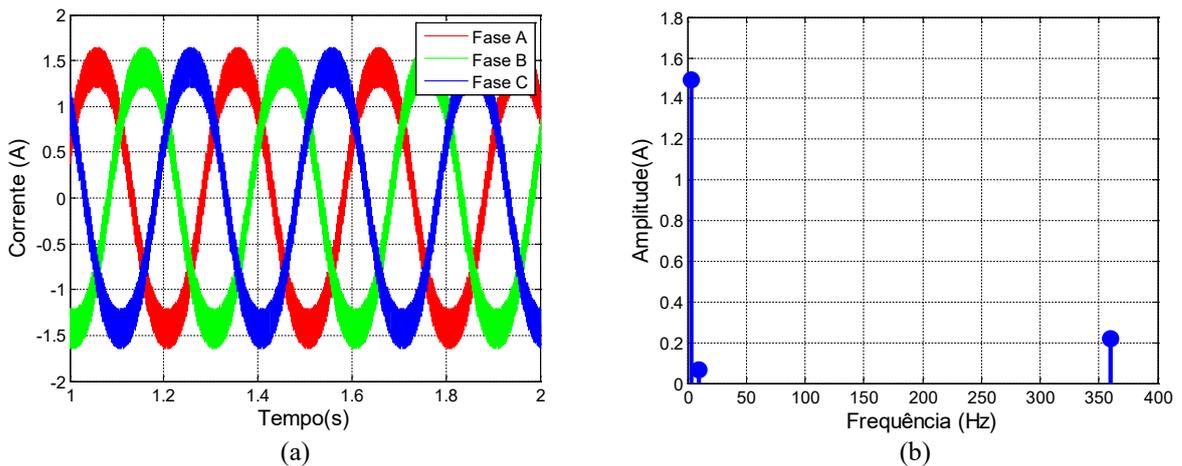
Está indicado nas Figuras 7.34-(a) e 7.34-(b) a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, o gerador opera na região de saturação magnética, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator.

Figura 7.34 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

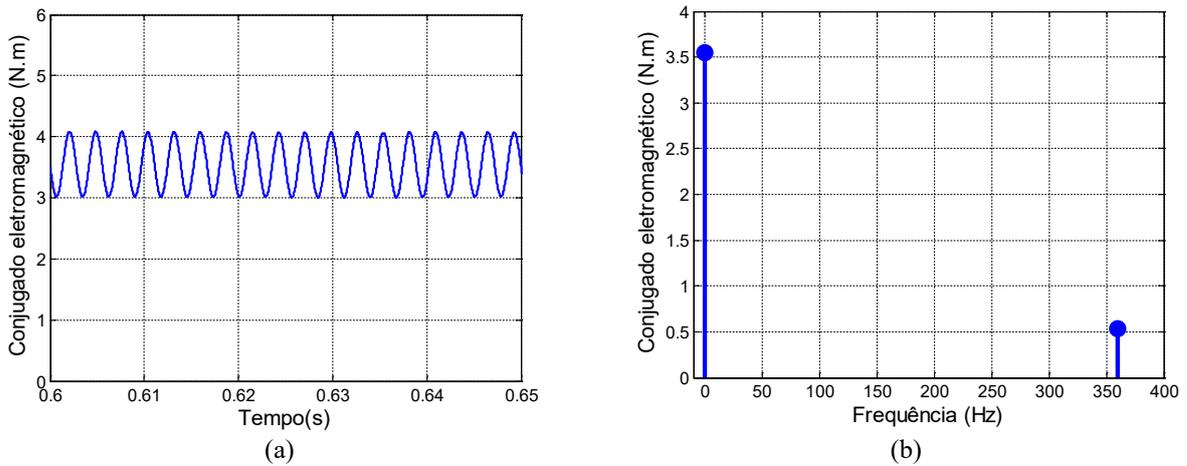
Figura 7.35 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Pelas mesmas razões descritas em 7.2.1.2, a componente de sétimo harmônico da corrente de estator resulta em uma componente de sexto harmônico na corrente de rotor e no conjugado eletromagnético, como pode ser visualizado nas Figuras 7.35 e 7.36, respectivamente. Constata-se que, com o aumento da velocidade, a componente de sexto harmônico da corrente de rotor e do conjugado mantém-se praticamente inalterada.

Figura 7.36 – Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de sétima ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



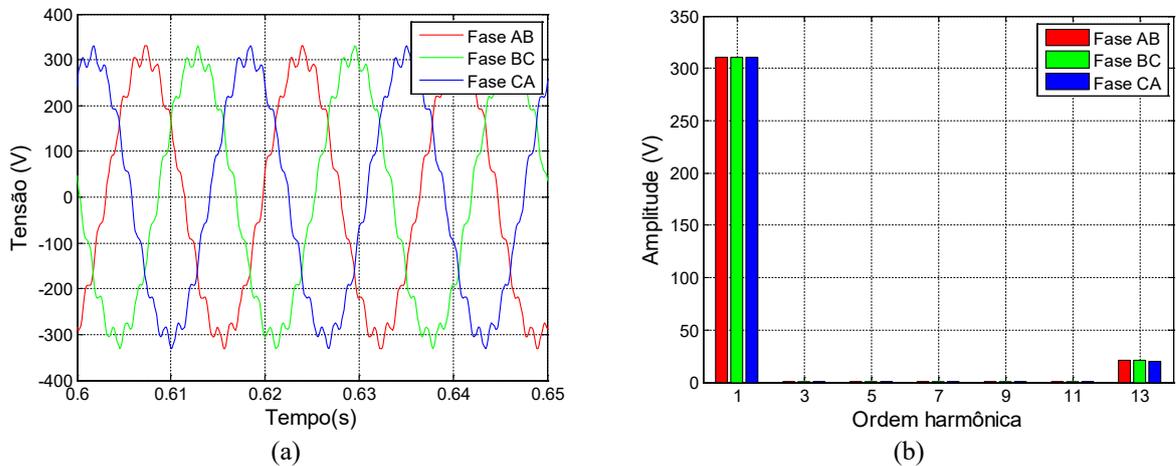
Fonte: Dados do autor.

7.2.2.3 Componente fundamental com décimo terceiro harmônico

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no ensaio experimental e por meio da simulação computacional quando é inserida uma componente de décimo terceiro harmônico junto à componente fundamental da tensão do sistema em que o gerador de indução de rotor bobinado está conectado. A velocidade de operação imposta é de 1900 rpm.

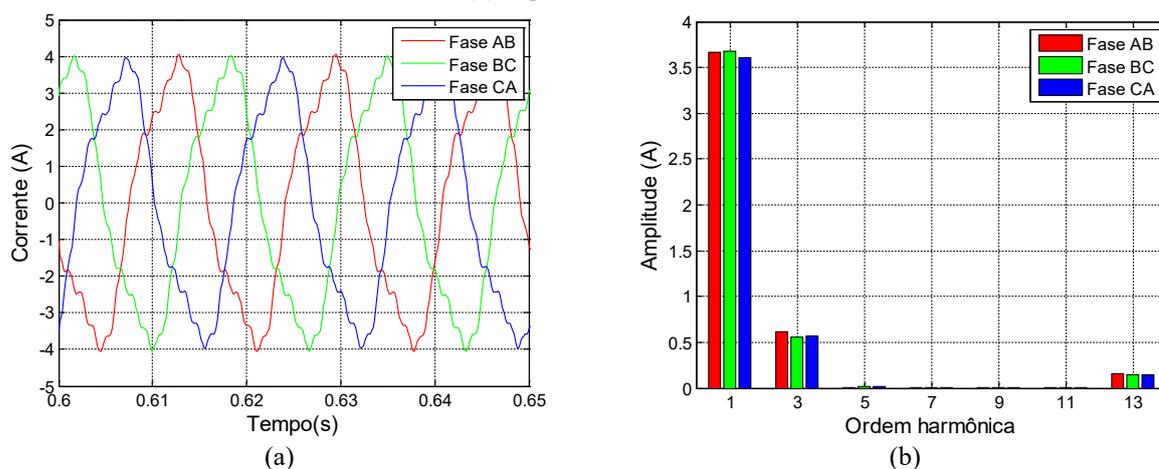
Os gráficos de tensão e corrente para o ensaio experimental estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 7.37 e 7.38. Nessa condição, para uma distorção harmônica total de tensão de 7,5%, obteve-se na corrente uma distorção igual a 16,37%. Observa-se pelo espectro harmônico da corrente, Figura 7.17-(b), o aparecimento de uma componente de terceiro e décimo terceiro harmônico.

Figura 7.37 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.38 – Ensaio experimental com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

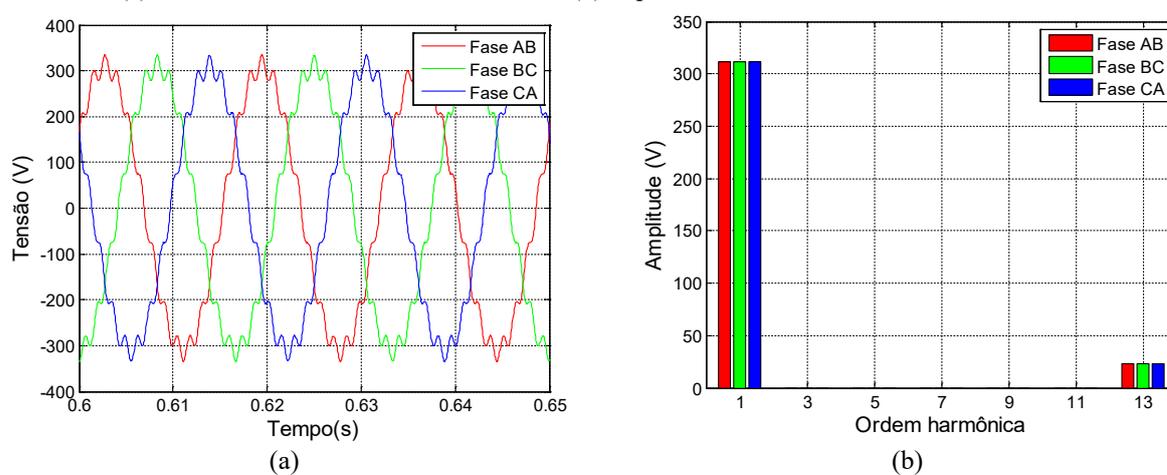


Fonte: Dados do autor.

Os dados obtidos no ensaio teórico, ou seja, por meio da simulação computacional, são mostrados a seguir. Primeiramente, tem-se os gráficos e os espectros harmônicos das tensões e correntes ilustrados, respectivamente, nas Figuras 7.39 e 7.40. Para uma distorção harmônica total na tensão de 7,5%, foi obtida uma distorção na corrente igual a 16,17%.

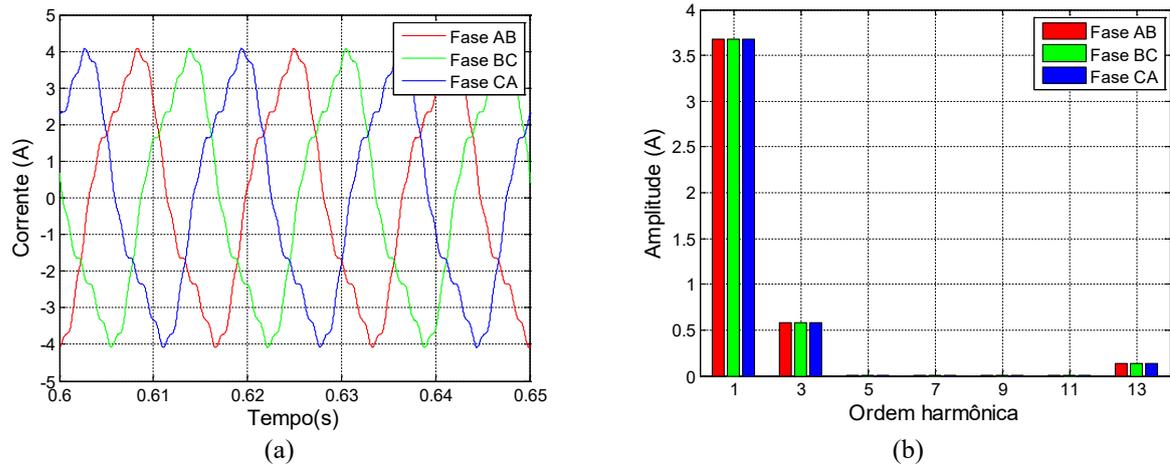
Assim como foi observado nos casos anteriores, o aumento da velocidade aqui também pouco interfere nas componentes harmônicas de corrente de estator, o que pode ser verificado comparando-se as Figuras 7.38 e 7.40 com as suas correspondentes obtidas em 7.2.1.3.

Figura 7.39 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 7.40 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Tabela 7.6 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

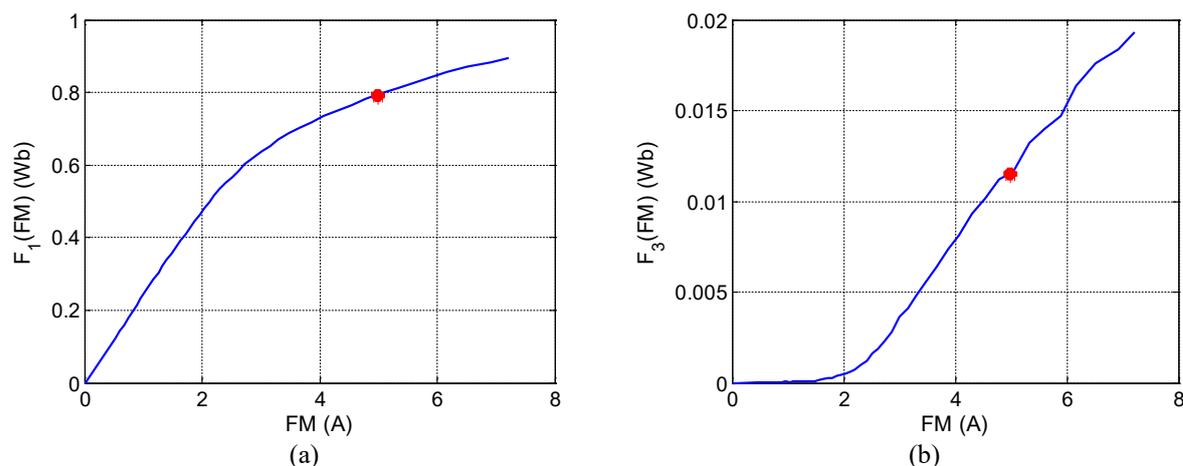
	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	220,34	220,37
V_{bc}	219,72	220,37
V_{ca}	219,76	220,37
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,63	2,63
I_{bc}	2,63	2,63
I_{ca}	2,58	2,63

Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes de tensão e corrente tanto do ensaio experimental quanto da simulação digital estão apresentados na Tabela 7.6. Comparando-os, é possível perceber que os valores ficaram próximos.

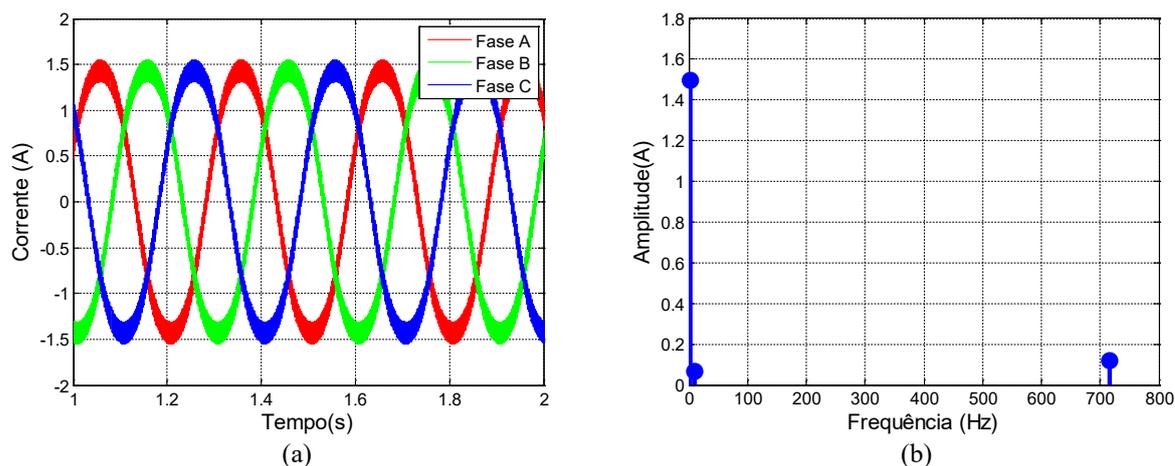
Está indicado nas Figuras 7.41-(a) e 7.41-(b) a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, o gerador opera na região de saturação magnética, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator.

Figura 7.41 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

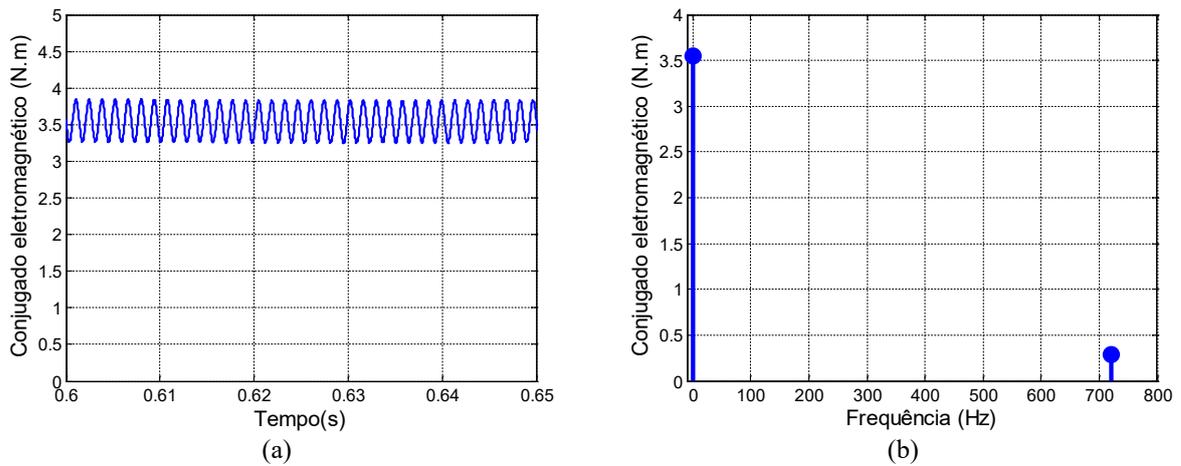
Figura 7.42– Simulação computacional com a rede trifásica com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico das correntes de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Pelas mesmas razões descritas em 7.2.1.3, a componente de décimo terceiro harmônico da corrente de estator resulta em uma componente de décimo segundo harmônico na corrente de rotor e no conjugado eletromagnético, como pode ser visualizado nas Figuras 7.42 e 7.43, respectivamente. Constata-se que com o aumento da velocidade a componente de décimo segundo harmônico da corrente de rotor e do conjugado mantém-se praticamente inalterada.

Figura 7.43 – Simulação computacional com a rede trifásica balanceada e com harmônico de décima terceira ordem: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



Fonte: Dados do autor.

7.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados e comparados os resultados obtidos em ensaios experimentais com os de simulações computacionais fundamentadas no modelo matemático empregado no presente trabalho para a análise do gerador de indução de rotor bobinado conectado a um sistema elétrico com a presença de distorções harmônicas de tensão. O estudo foi realizado para duas diferentes velocidades impostas pela máquina primária, sendo elas 1850 e 1900 rpm.

Além disso, visando a coerência do estudo, foram empregados como referência os limites estabelecidos pelo PRODIST para distorções harmônicas de tensão, cujo limite é de 7,5% para as ordens harmônicas analisadas, a saber de 5^a, 7^a e 13^a ordem, e para a classe de tensão menor que 1 kV. Os efeitos das distorções foram estudados realizando a inserção individual de cada ordem junto à componente fundamental da tensão. A comparação entre os dados obtidos experimentalmente e através de simulação computacional aponta para a eficácia da modelagem quando há distorções harmônicas de tensão.

Algumas constatações realizadas nesta etapa podem ser discutidas aqui. Primeiramente, verificou-se que o funcionamento do gerador ocorreu na região de saturação do material ferromagnético em todos os casos analisados, em razão do aparecimento, na corrente de fase de estator, de uma componente de terceiro harmônico e pela localização do ponto em que o gerador opera nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$.

Outro aspecto que pôde ser observado nos resultados da simulação computacional é que a ordem harmônica que aparece tanto nas correntes rotóricas quanto no conjugado eletromagnético difere daquela inserida nas tensões estatóricas. Como foi explicado ao longo do capítulo, isso se deve à velocidade relativa com que os campos magnéticos originados pelas componentes harmônicas enlaçam os enrolamentos rotóricos. Para aquelas classificadas como componentes de sequência positiva, a velocidade relativa de giro é de $(h \cdot \omega - \omega)$, enquanto para as de sequência negativa passa a ser $(h \cdot \omega + \omega)$, em que h é a ordem harmônica inserida e ω a velocidade angular da componente fundamental.

8. ANÁLISE COM DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO EM CONJUNTO COM DISTORÇÕES HARMÔNICAS

8.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação de tensões desequilibradas juntamente com distorções harmônicas ao gerador de indução de rotor bobinado operando à velocidade de 1850 e 1900 rpm, escolhidas para a padronização dos estudos de caso e garantir a integridade da máquina. Com o intuito de validação do modelo matemático não linear no domínio da fase estudado neste trabalho para essa situação, os resultados provenientes de simulações dinâmicas para os dois pontos de operação citados acima são confrontados com os dados experimentais.

Portanto, as formas de onda de tensões e correntes do estator, bem como seus respectivos harmônicos são apresentados tanto para os resultados experimentais como os simulados. Outras informações relevantes provenientes da simulação, como correntes de rotor, conjugado eletromagnético e funções harmônicas magnéticas, são também apresentadas em forma gráfica.

Para a realização deste ensaio são adotadas as mesmas ordens harmônicas empregadas no Capítulo 7, a saber de 5^a, 7^a e 13^a ordem, contudo, aplicadas de forma simultânea. Assim, no sentido de observar os limites do PRODIST quanto à distorção harmônica total de tensão, foram utilizadas as seguintes porcentagens para cada ordem: 3% de 5^a, 2,5% de 7^a e 2% de 13^a ordem.

Novamente, com o intuito de respeitar o PRODIST quanto ao limite estabelecido para desequilíbrio de tensão, os mesmos valores empregados no Capítulo 6 são utilizados aqui. Por conveniência, a Tabela 6.1 é repetida a seguir.

Tabela 8.1 – Níveis de tensão para o ensaio com desequilíbrio de tensão em conjunto com distorções harmônicas.

	Tensão (Vrms)
V_{ab}	229,510
V_{bc}	218,275
V_{ca}	222,663

Fonte: Dados do autor.

Todos os ensaios, tanto experimentais quanto de simulações, são realizados com o gerador operando com velocidade controlada. Por fim, é importante reiterar que os

enrolamentos de estator são conectados em delta-paralelo, correspondente à tensão de 220 V, e os de rotor são curto-circuitados externamente.

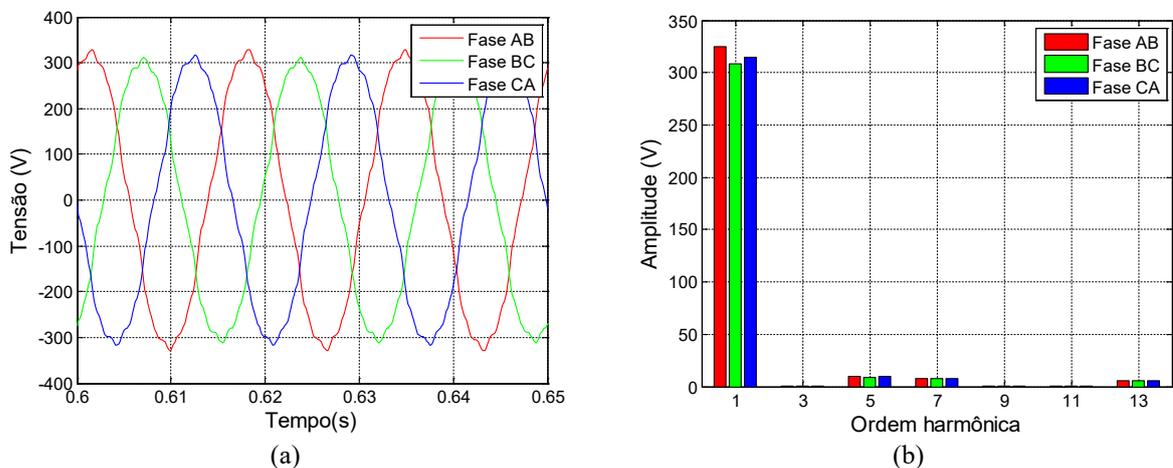
8.2 Resultados e discussões

8.2.1 Velocidade de 1850 rpm

O ensaio realizado nesta etapa, em que a MIRB é acionada pela máquina primária à velocidade de 1850 rpm, conduziu aos resultados experimentais e teóricos que são apresentados a seguir.

Primeiramente, nas Figuras 8.1-(a) e 8.1-(b) estão mostrados os sinais das tensões nos terminais do gerador e o seu espectro harmônico, respectivamente. É possível verificar por essas figuras a presença da distorção nas formas de onda causadas pelas componentes harmônicas de 5^a, 7^a e 13^a ordem. Da mesma forma, observa-se, principalmente pela componente fundamental da tensão, a presença do desequilíbrio de tensão entre as fases do sistema.

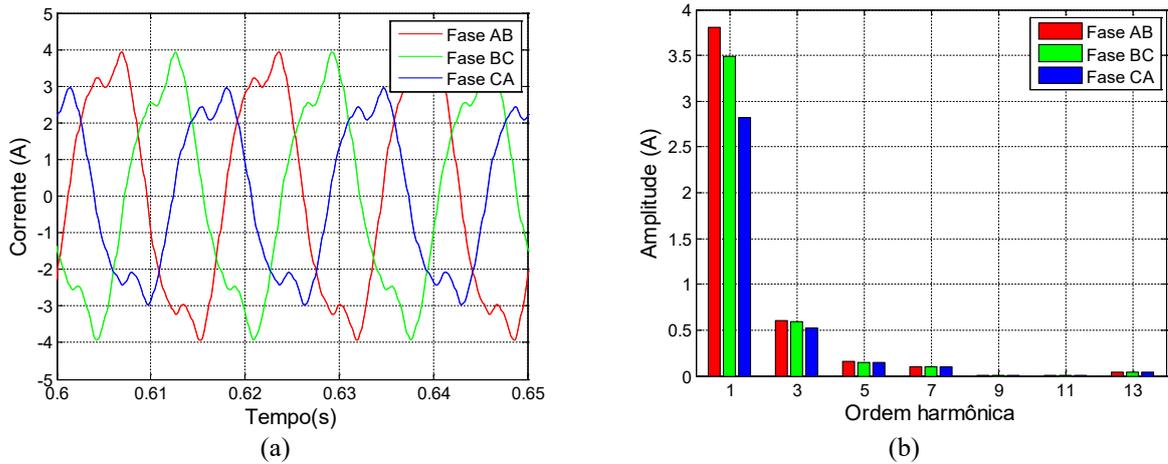
Figura 8.1 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os sinais das correntes nas fases de estator do gerador para o ensaio experimental estão expostos na Figura 8.2-(a) e seu espectro harmônico na Figura 8.2-(b). As correntes das três fases apresentam-se bastante distorcidas e desequilibradas. Além disso, é possível observar que a componente de terceiro harmônico é a que possui amplitude mais expressiva.

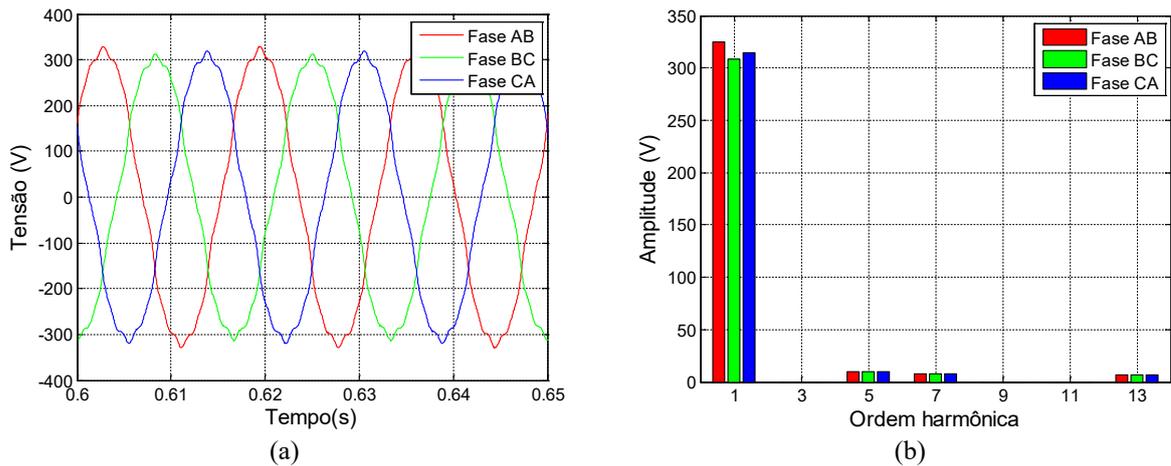
Figura 8.2 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

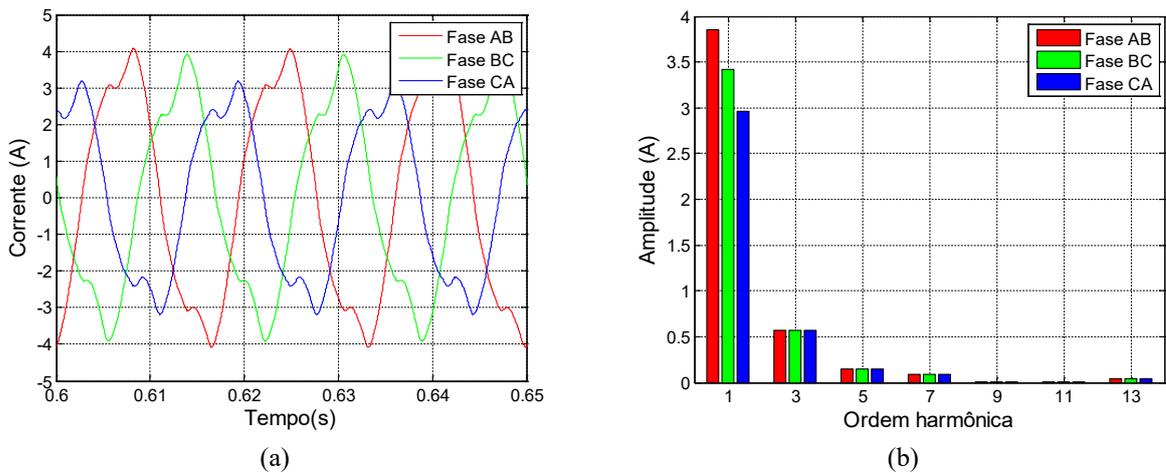
Para a realização da simulação computacional foi considerado que a tensão apresentasse os mesmos aspectos daqueles observados no ensaio experimental, ou seja, desequilíbrios e distorções harmônicas, como está ilustrado na Figura 8.3. As correntes obtidas na simulação estão mostradas na Figura 8.4. Observa-se uma grande semelhança entre as formas de onda das correntes da simulação e do ensaio experimental.

Figura 8.3 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 8.4 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes de tensão e corrente relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional estão apresentados na Tabela 8.2, sendo ambos referentes às grandezas de fase. É possível verificar a grande semelhança entre os valores experimentais e teóricos.

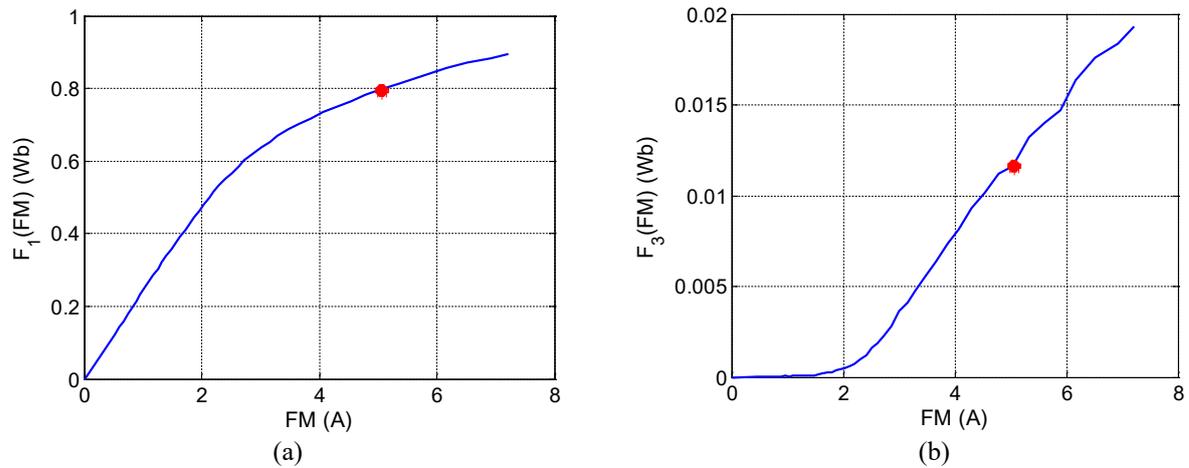
Tabela 8.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	229,80	229,60
V_{bc}	218,00	218,71
V_{ca}	222,36	222,84
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,73	2,75
I_{bc}	2,50	2,45
I_{ca}	2,03	2,13

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 8.5-(a) e 8.5-(b) está mostrado a localização do ponto de operação nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, em virtude do aparecimento da componente de terceiro harmônico na corrente de fase de estator, o gerador opera na região de saturação magnética.

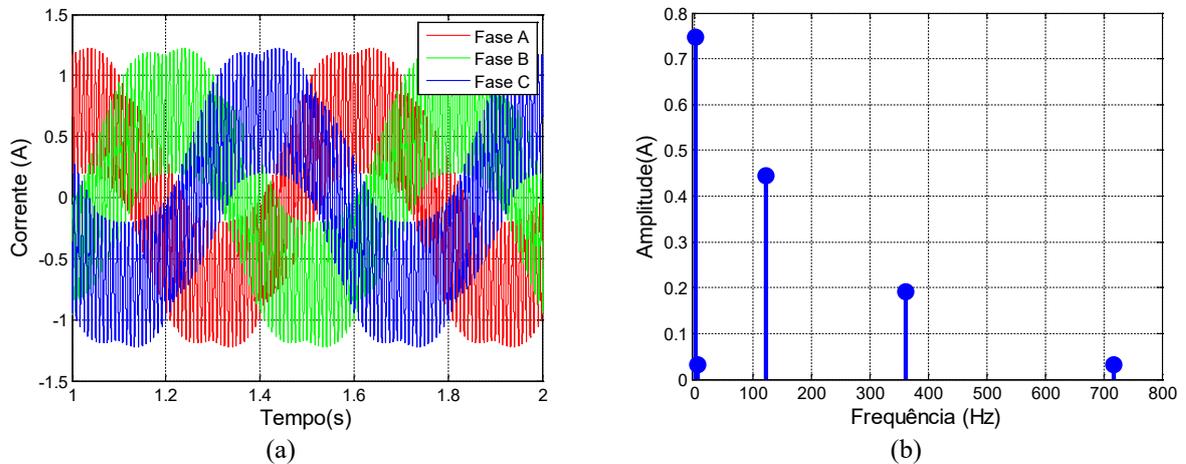
Figura 8.5 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(FM)$; (b) Gráfico da componente $F_3(FM)$.



Fonte: Dados do autor.

Devido ao desequilíbrio e a inserção de componentes harmônicas junto à tensão do sistema em que o gerador se encontra conectado, diversas componentes harmônicas surgem na corrente rotórica, como está ilustrado na Figura 8.6. Além da componente fundamental, mais expressiva, e daquela relacionada à saturação, de menor amplitude, tem-se a componente de 120 Hz devido ao desequilíbrio de tensão (abordado no Capítulo 6), e a de 360 Hz e de 720 Hz provenientes das componentes de quinto e sétimo, e de décimo terceiro da corrente de estator, respectivamente (discutido no Capítulo 7).

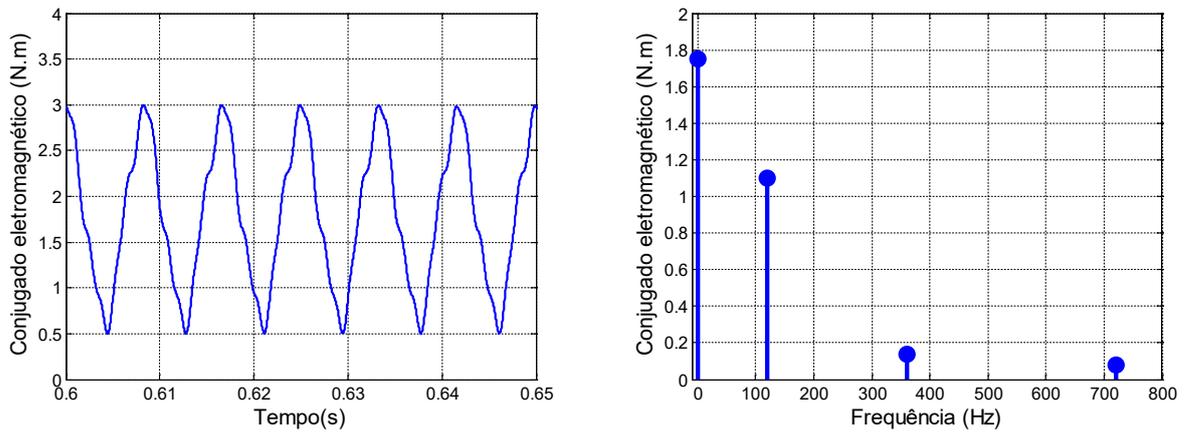
Figura 8.6 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Na Figura 8.7 está mostrado o gráfico do conjugado eletromagnético. Como tal grandeza depende diretamente das correntes rotóricas, tem-se um sinal com diversas componentes harmônicas presentes.

Figura 8.7 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.

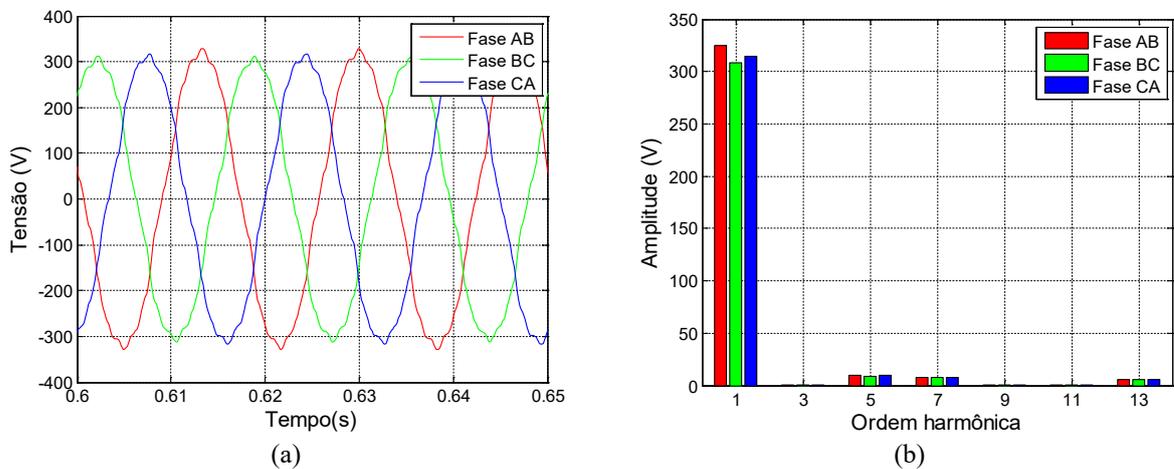


Fonte: Dados do autor.

8.2.2 Velocidade de 1900 rpm

Em uma nova condição de operação, a velocidade imposta pela máquina primária passou a ser de 1900 rpm. As tensões do sistema, que estão apresentadas na Figura 8.8, não sofreram alterações em relação ao caso anterior.

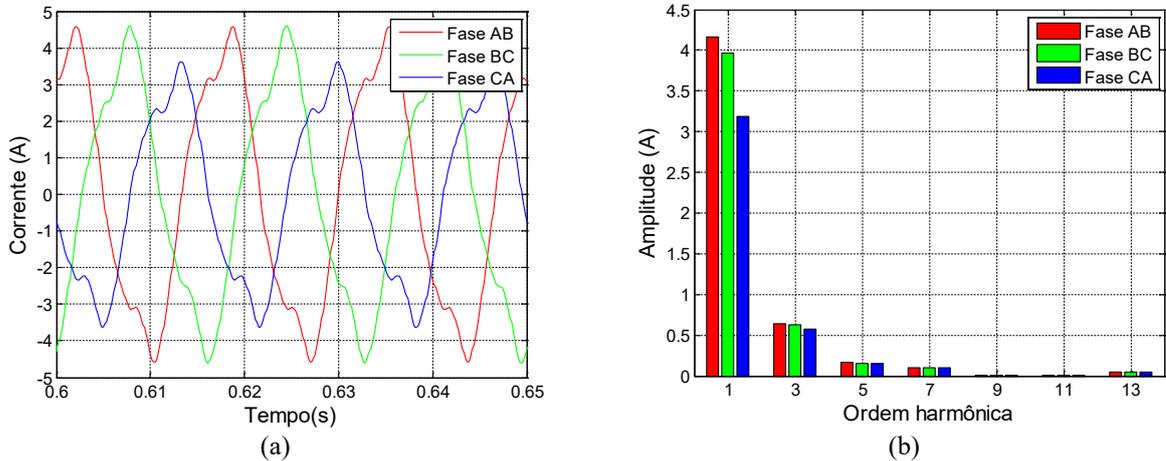
Figura 8.8 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

No que tange às correntes experimentais de fase, Figura 8.9, é perceptível o aumento da amplitude da corrente relacionada à componente fundamental com o aumento da velocidade. Já as correntes referentes às demais componentes mantiveram-se praticamente inalteradas.

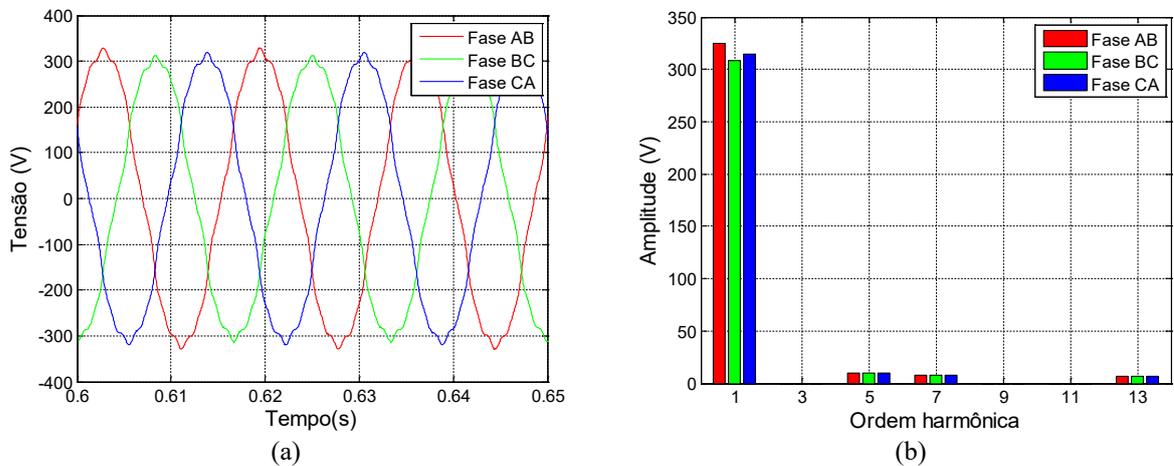
Figura 8.9 – Ensaio experimental com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

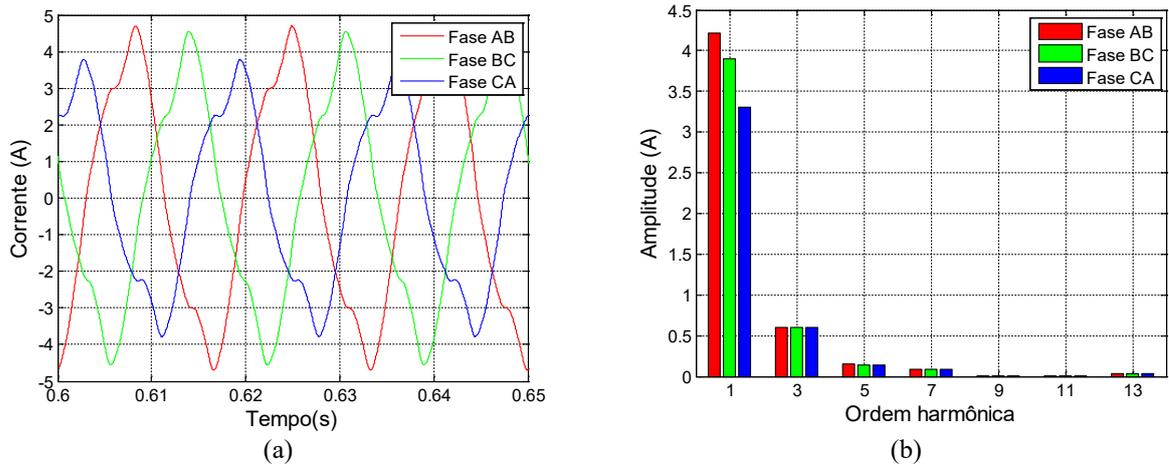
Os gráficos dos sinais de tensão e corrente obtidos com a simulação encontram-se apresentados nas Figuras 8.10 e 8.11, respectivamente. Comparando-os com os do ensaio experimental, Figuras 8.8 e 8.9 respectivamente, é novamente perceptível a semelhança entre as formas de onda.

Figura 8.10 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 8.11 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes de tensão e de corrente, ambos de fase, estão mostrados na Tabela 8.3, sendo mais fácil constatar a elevação da corrente em consequência do aumento da velocidade mecânica. Além disso, verifica-se, novamente, a coerência entre os resultados experimentais e teóricos.

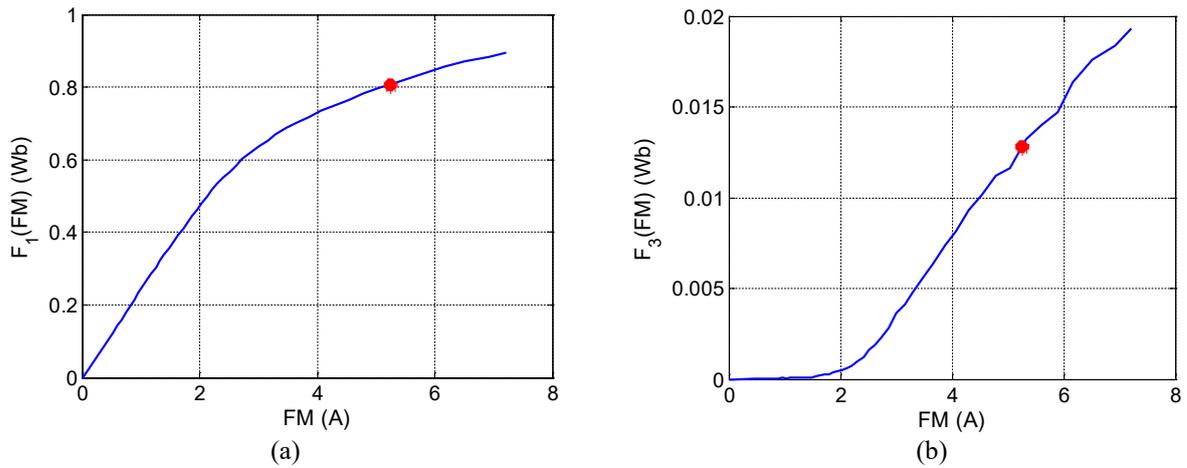
Tabela 8.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	229,91	229,51
V_{bc}	218,03	218,50
V_{ca}	222,43	222,89
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	2,98	3,01
I_{bc}	2,84	2,79
I_{ca}	2,29	2,38

Fonte: Dados do autor.

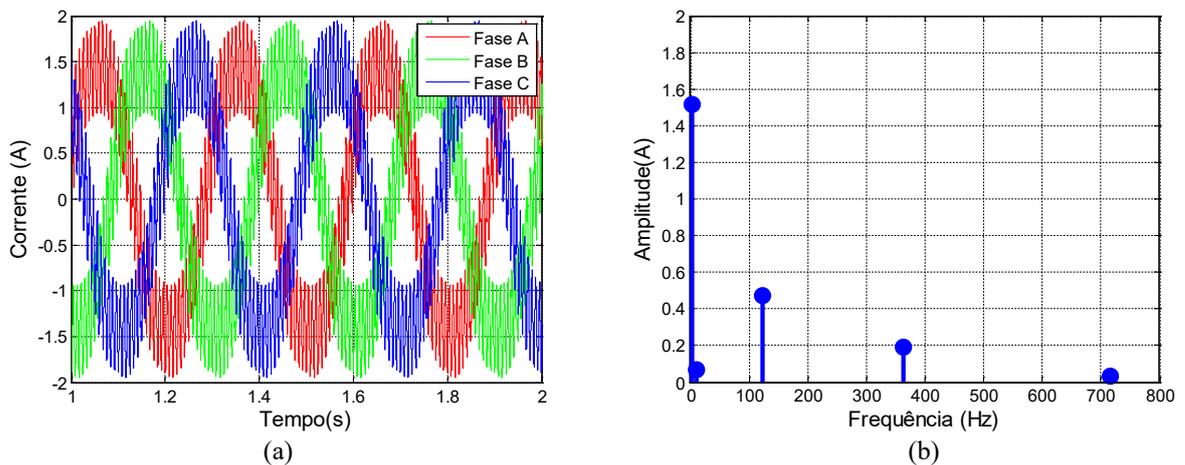
Nas Figuras 8.12-(a) e 8.12-(b) está mostrado a localização do ponto de operação nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Como era de se esperar, a máquina também opera na região de saturação magnética com o aumento da velocidade.

Figura 8.12 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(FM)$; (b) Gráfico da componente $F_3(FM)$.



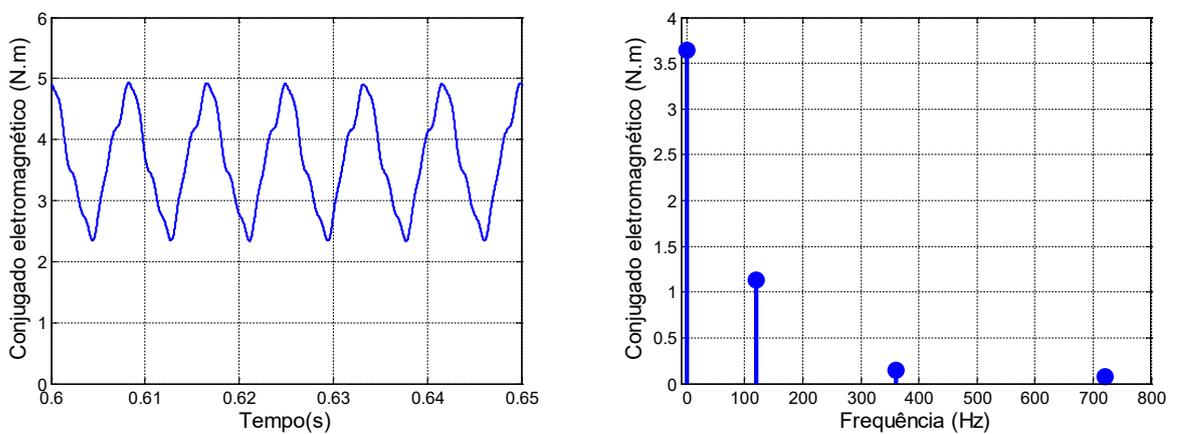
Fonte: Dados do autor.

Figura 8.13 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Figura 8.14 – Simulação computacional com a rede trifásica desequilibrada e com distorções harmônicas: (a) Gráfico do conjugado eletromagnético; (b) Espectro harmônico do conjugado eletromagnético.



Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 8.13 e 8.14 estão apresentados, respectivamente, as correntes de rotor e o conjugado eletromagnético referentes à simulação computacional. O comportamento de ambas as grandezas se assemelha ao caso anterior.

8.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados e comparados os resultados obtidos em ensaios experimentais com os de simulações computacionais fundamentadas no modelo matemático empregado no presente trabalho para a análise do gerador de indução de rotor bobinado conectado a um sistema elétrico com a presença de desequilíbrio e distorções harmônicas de tensão. O estudo foi realizado para duas diferentes velocidades impostas pela máquina primária, sendo elas 1850 e 1900 rpm.

Objetivando a coerência do estudo, foram empregados como referência os mesmos valores de tensões desequilibradas utilizados no Capítulo 6. No que tange às distorções harmônicas de tensão, foram inseridas em conjunto com a componente fundamental, as harmônicas de ordem 5^a, 7^a e 13^a ordem, respeitando o limite de 7,5% de distorção harmônica total de tensão estabelecida pelo PRODIST para a classe de tensão menor que 1 kV.

A comparação entre os dados obtidos experimentalmente e através de simulação computacional aponta para a eficácia da modelagem quando há desequilíbrio em conjunto com distorções harmônicas de tensão.

Observou-se que o funcionamento do gerador ocorreu na região de saturação magnética nas duas condições de velocidade analisada, em virtude do aparecimento, na corrente de fase de estator, de uma componente de terceiro harmônico e pela localização do ponto em que o gerador opera nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$.

Os mesmos efeitos verificados nas análises individuais de desequilíbrio de tensão (Capítulo 6) e de distorções harmônicas de tensão (Capítulo 7) foram constatados quando estão em conjunto. Resumidamente, podem ser citados o aparecimento de uma componente de dupla frequência, de sexto e décima segunda ordem nas correntes rotóricas e no conjugado eletromagnético.

9. ANÁLISE COM VARIAÇÕES DE TENSÃO

9.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação de afundamento e elevação de tensão ao gerador de indução de rotor bobinado para dois pontos de operação, a saber 1850 e 1900 rpm, escolhidas para a padronização dos estudos de caso e garantir a integridade da máquina. Com o intuito de validação do modelo matemático não linear no domínio da fase estudado neste trabalho, os resultados provenientes de simulações dinâmicas para os dois pontos de operação citados acima são confrontados com os dados experimentais.

Portanto, as formas de onda de tensões e correntes do estator, bem como seus respectivos harmônicos são apresentados tanto para os resultados experimentais como os simulados. Outras informações relevantes provenientes da simulação, como correntes de rotor, conjugado eletromagnético e funções harmônicas magnéticas, são também apresentadas em forma gráfica.

Figura 9.1 – Interface para edição de transientes da fonte programável.

The screenshot displays the 'Transient List Editor' window within the California Instruments - Virtual Panels software. The interface includes a top navigation bar with icons for home, settings, and various measurement tools. The main area is divided into several sections:

- PHASE SELECTION:** Includes dropdown menus for phase selection (OA, OB, OC).
- EXECUTION MODE:** Options for 'Run: 1 Times' and 'Continuous'.
- DATA MODES:** Options for 'Absolute', 'Relative (%)', and 'Time in Cycles'.
- TRANSIENT LIST:** A table with columns for Type, Slew Time (sec), Delay (sec), Frequency, VoltageA, Func A, VoltageB, Func B, VoltageC, Func C, Repeat, and Start Phase. One row is highlighted in red.
- CONTROL PANELS:** Includes 'GENERATE OUTPUT TRIGGER PULSE', 'TRIGGER SOURCE', 'TRIGGER STEP', and 'Return to Steady State' options.
- STATUS BAR:** Shows 'LIVE MODE' and 'Steady State Settings'.
- RIGHT PANEL:** A 'Bus Monitor' window displaying various electrical parameters like current (curr?), voltage (volt?), and frequency (freq?).

Type	Slew Time (sec)	Delay (sec)	Frequency	VoltageA	Func A	VoltageB	Func B	VoltageC	Func C	Repeat	Start Phase
Voltage Sweep	0.01	0.01		127	SINE	127	SINE	127	SINE	0	
Voltage Step	0.001	50		88.9	SINE	88.9	SINE	88.9	SINE	0	
Voltage Sweep	0.01	0.001		127	SINE	127	SINE	127	SINE	0	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse sentido, a partir da ferramenta *Transient List Editor*, Figura 9.1, presente no *software* da fonte, são simulados experimentalmente o afundamento e a elevação temporária de tensão. Para o primeiro caso é adotado um valor de 0,3 p.u e para o segundo 1,15 p.u da tensão nominal de operação da máquina, ambos com duração de 50 segundos. Esses valores foram escolhidos de acordo com os limites para variações de tensão apresentados pelo PRODIST e expostos no Quadro 3.3.

Todos os ensaios, tanto experimentais quanto de simulações, são realizados com o gerador operando com velocidade controlada antes da ocorrência do distúrbio. Por fim, é importante reiterar que os enrolamentos de estator são conectados em delta-paralelo, correspondente à tensão de 220 V, e os de rotor são curto-circuitados externamente.

9.2 Resultados e discussões

9.2.1 Ensaio com afundamento de tensão

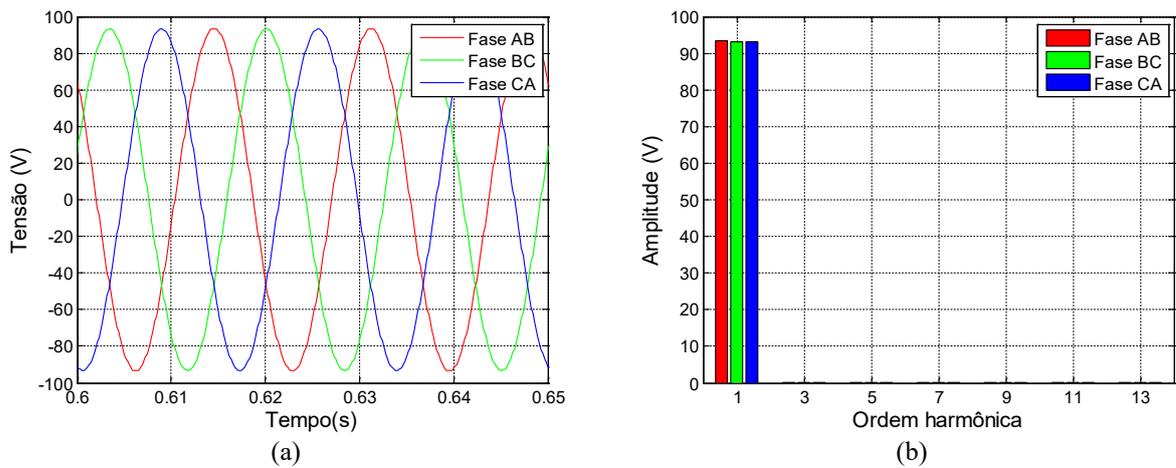
9.2.1.1 Velocidade de 1850 rpm

Neste primeiro momento são expostos os resultados do ensaio experimental e da simulação computacional quando ocorre um afundamento de tensão e o gerador encontra-se operando em 1850 rpm.

Nas Figuras 9.2 e 9.3 estão apresentados, respectivamente, as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator do ensaio experimental, referentes ao intervalo em que o gerador opera no afundamento de tensão. Observa-se, em relação à operação em condições normais (analisado no Capítulo 5), uma expressiva atenuação da distorção na forma de onda da corrente em virtude da diminuição da componente de terceiro harmônico da corrente.

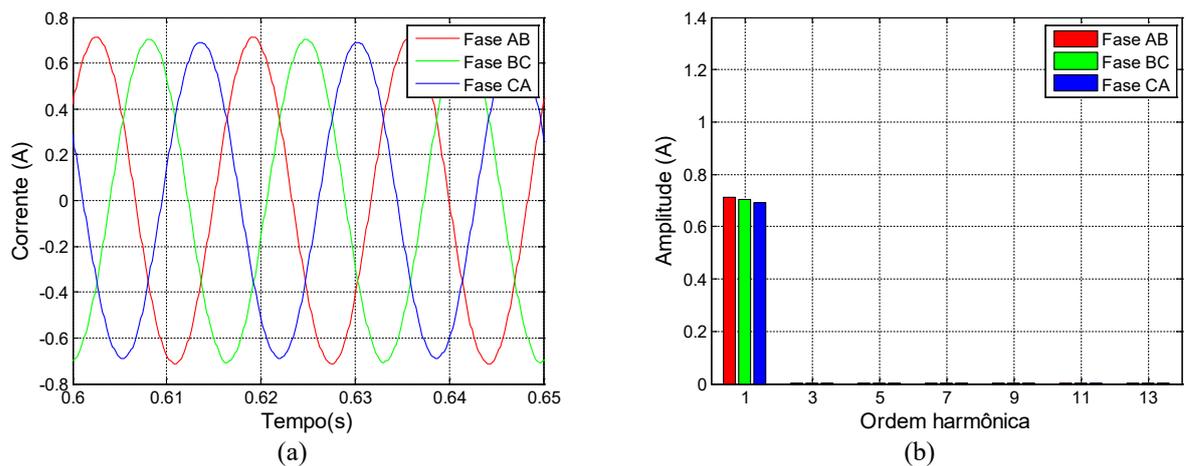
Com relação à velocidade mecânica do gerador na ocasião do afundamento de tensão, obteve-se um valor igual a 1876 rpm a partir de um tacômetro digital. Este aumento de velocidade é consequência da diminuição da “carga” que o gerador impõe sobre a máquina primária em função da queda de tensão, além da ausência de um sistema de controle que possa atuar diante do distúrbio no sistema elétrico.

Figura 9.2 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.3 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

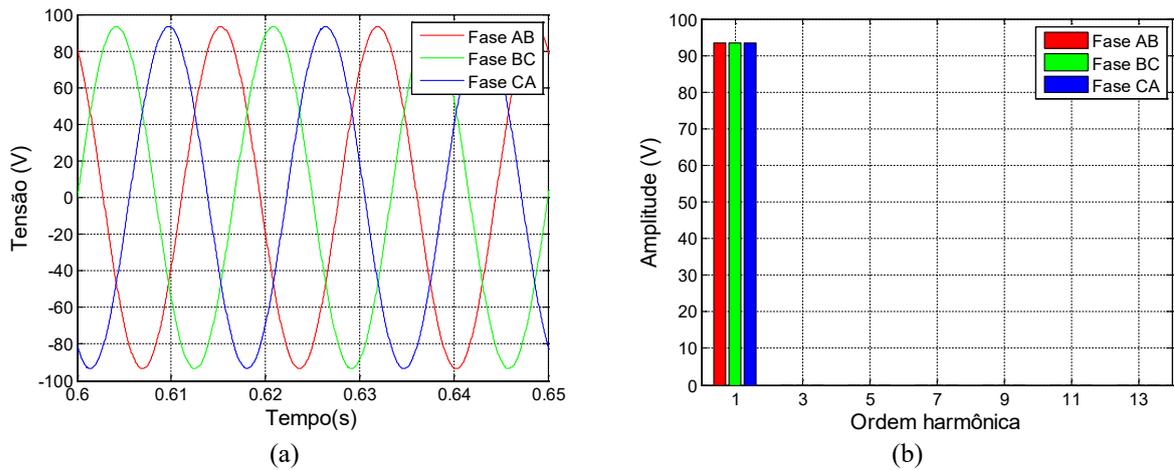


Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.4 e 9.5 estão ilustradas as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator obtidas com a simulação computacional. Verifica-se uma grande semelhança entre esses resultados com aqueles obtidos no ensaio experimental.

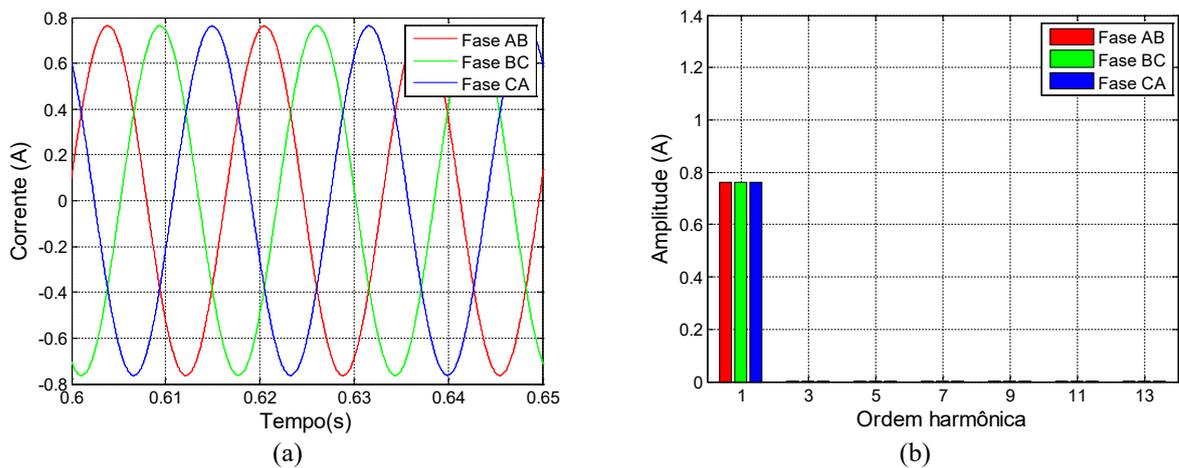
Os valores eficazes da tensão e da corrente referente ao ensaio experimental e à simulação encontram-se mostrados na Tabela 9.1. Comparando tais valores com aqueles expostos na Tabela 5.1, pertinentes ao ensaio experimental em condições normais de tensão para a velocidade de 1850 rpm, pode-se observar a diminuição expressiva da corrente em função da queda de tensão.

Figura 9.4 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.5 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

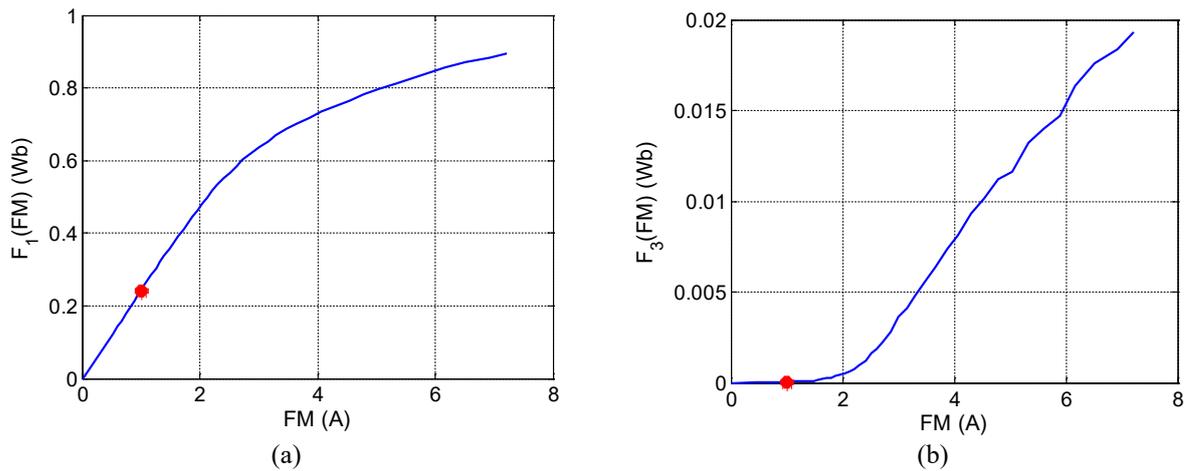
Tabela 9.1 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	66,09	65,99
V_{bc}	65,89	65,99
V_{ca}	65,87	65,99
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	0,50	0,53
I_{bc}	0,49	0,53
I_{ca}	0,48	0,53

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.6-(a) e 9.6-(b) está mostrado a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Nota-se que durante o afundamento de tensão o gerador passa a operar na região linear da curva de magnetização, razão pela qual foi observada a diminuição da componente de terceiro harmônico da corrente estatórica, assumindo um valor praticamente nulo.

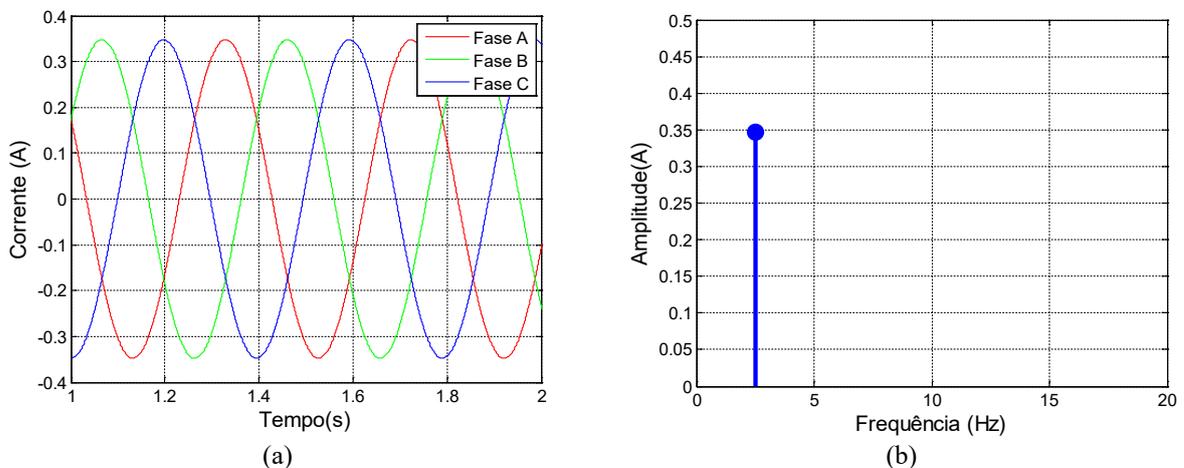
Figura 9.6 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

No que tange à corrente rotórica, verifica-se na Figura 9.7 que as formas de onda são perfeitamente senoidais. Além disso, houve uma significativa redução da amplitude devido ao afundamento de tensão.

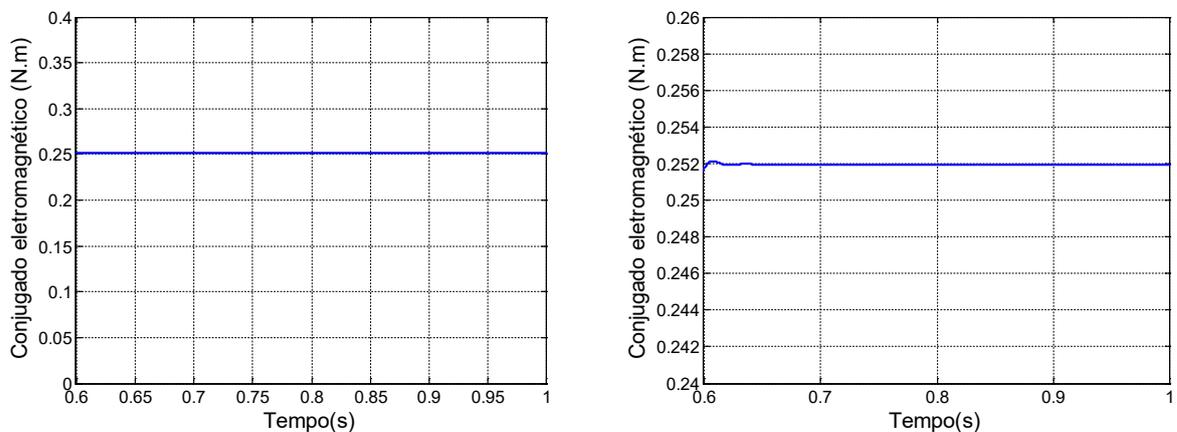
Figura 9.7 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

O conjugado eletromagnético desenvolvido pelo gerador está apresentado na Figura 9.8. Observa-se um menor valor neste caso quando comparado com aquele obtido em condições normais de tensão (Figura 5.8). Isso esclarece melhor a redução da “carga” imposta pelo gerador à máquina primária em função do afundamento de tensão, conforme discutido anteriormente. Além disso, como o afundamento de tensão analisado é simétrico, ou seja, igual para as três fases, não há componente de sequência negativa na tensão, o que justifica o comportamento praticamente linear do conjugado durante o distúrbio.

Figura 9.8 – Gráfico do conjugado eletromagnético com afundamento de tensão relativo à simulação computacional.



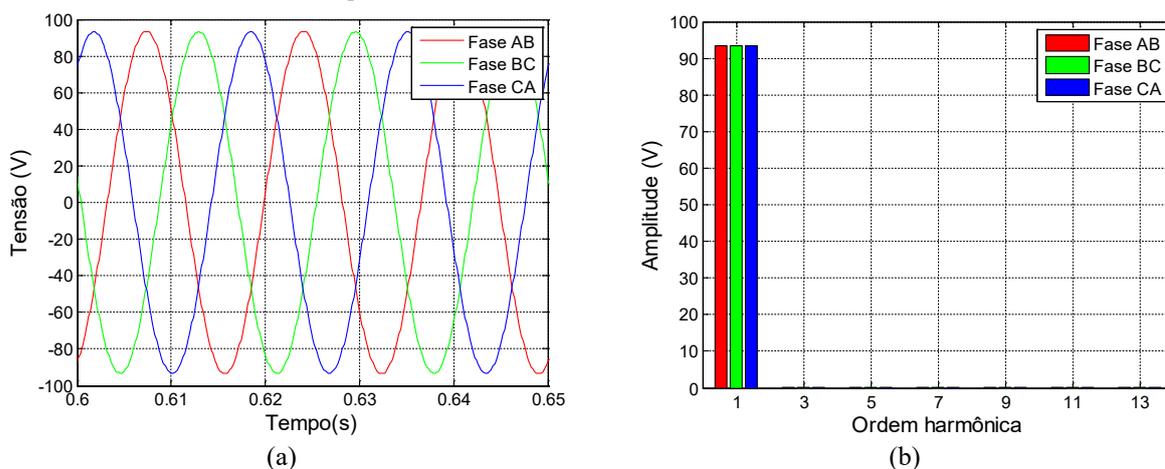
Fonte: Dados do autor.

9.2.1.2 Velocidade de 1900 rpm

Nas Figuras 9.9 e 9.10 estão apresentados os gráficos de tensão e corrente de fase de estator, respectivamente, relativos ao ensaio experimental para o afundamento temporário de tensão ocorrendo na velocidade de 1900 rpm.

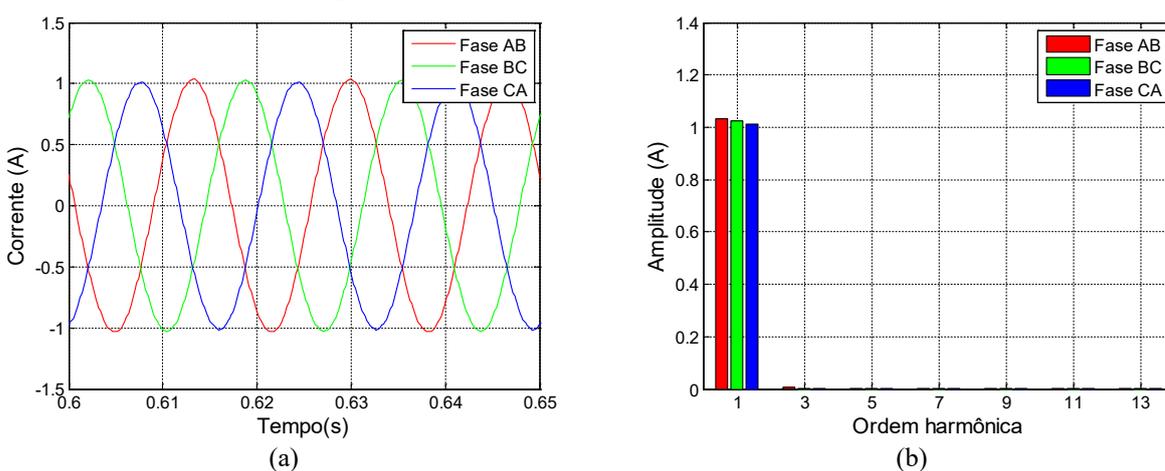
Com relação à velocidade mecânica do gerador na ocasião do afundamento de tensão, obteve-se um valor igual a 1963 rpm a partir de um tacômetro digital. Assim como no caso anterior, este aumento de velocidade é consequência da diminuição da “carga” que o gerador impõe sobre a máquina primária em função da queda de tensão, além da ausência de um sistema de controle que possa atuar diante do distúrbio no sistema elétrico.

Figura 9.9 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.10 – Ensaio experimental com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

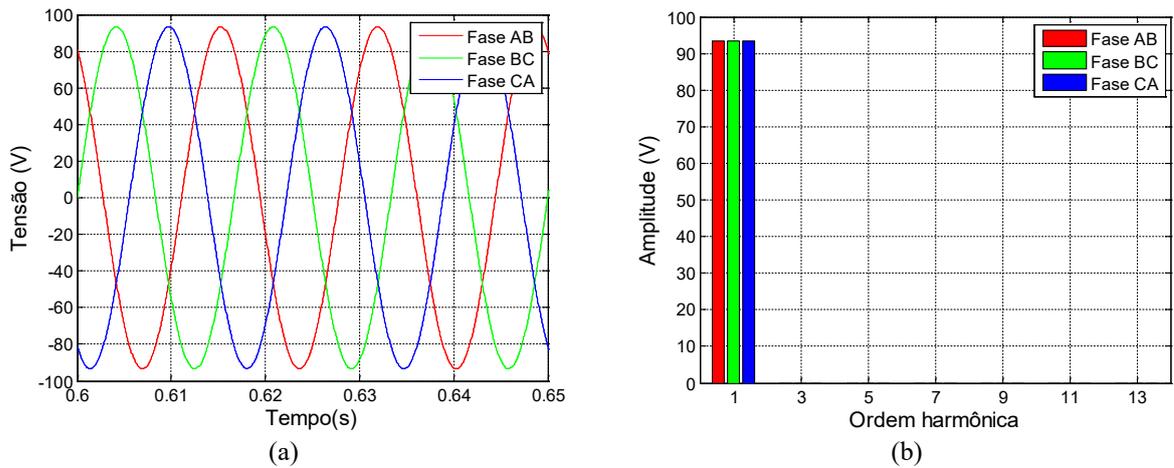


Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.11 e 9.12 estão ilustradas as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator obtidas com a simulação computacional. Verifica-se uma grande semelhança entre esses resultados com aqueles obtidos no ensaio experimental.

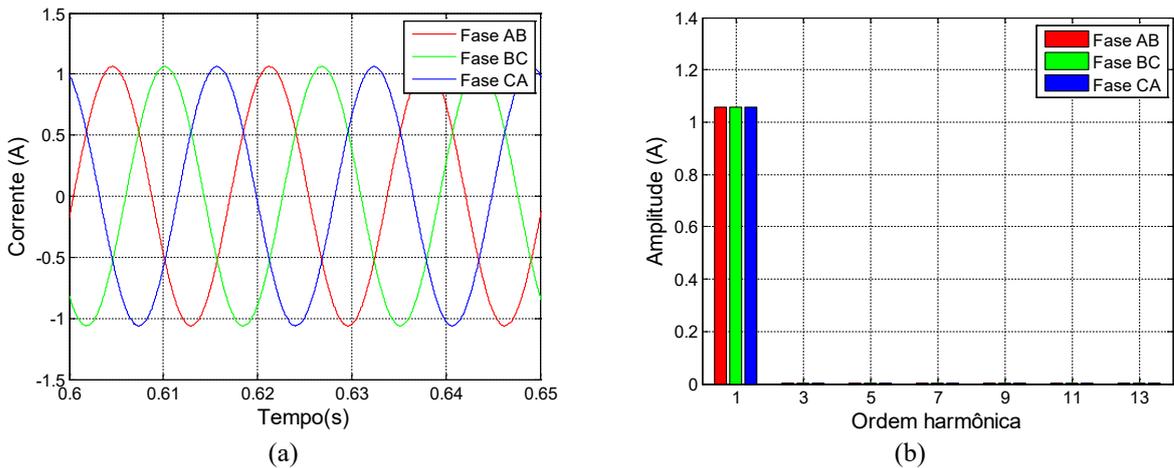
Os valores eficazes da tensão e da corrente referente ao ensaio experimental e à simulação estão expostos na Tabela 9.2. Comparando tais valores com aqueles expostos na Tabela 5.2, pertinentes ao ensaio experimental em condições normais de tensão para a velocidade de 1900 rpm, pode-se observar novamente a diminuição expressiva da corrente em função da queda de tensão.

Figura 9.11 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.12 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

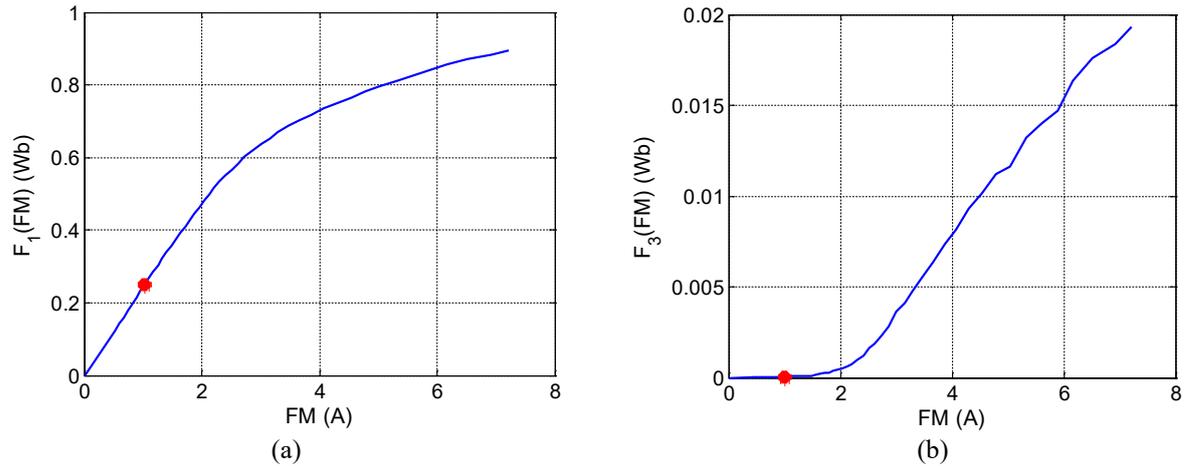
Tabela 9.2 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	66,13	65,99
V_{bc}	65,94	65,99
V_{ca}	65,94	65,99
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	0,72	0,74
I_{bc}	0,72	0,74
I_{ca}	0,71	0,74

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.13-(a) e 9.13-(b) está indicado a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Observa-se que durante o afundamento de tensão, mesmo para uma velocidade maior, o gerador ainda opera na região linear da curva de magnetização, resultando em uma componente de terceiro harmônico na corrente de estator nula.

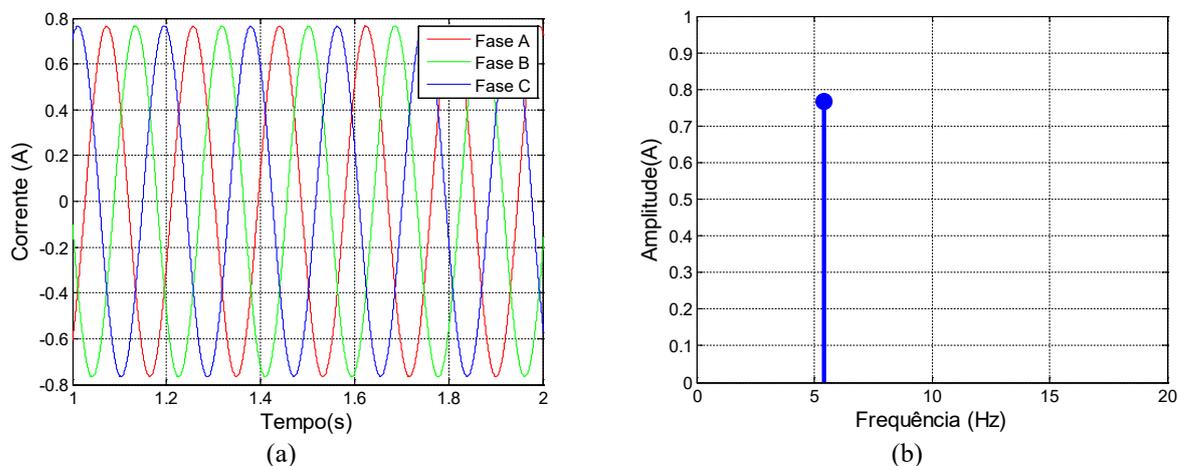
Figura 9.13 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

Percebe-se, novamente, que a corrente rotórica, Figura 9.14, possui deformações insignificantes, com uma considerável redução da amplitude em virtude do afundamento de tensão.

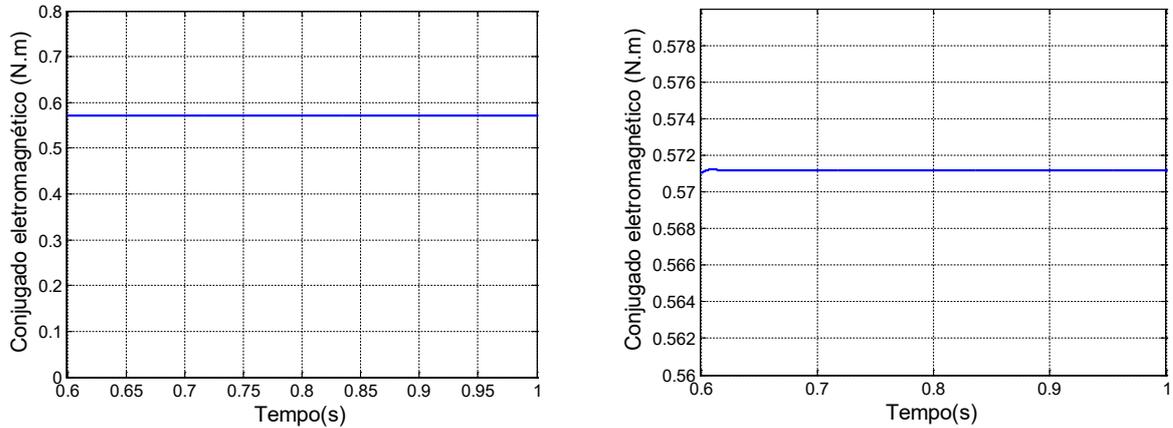
Figura 9.14 – Simulação computacional com afundamento de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

O conjugado eletromagnético na ocasião do afundamento de tensão está ilustrado na Figura 9.15, sendo possível observar o mesmo comportamento verificado no caso anterior.

Figura 9.15 – Gráfico do conjugado eletromagnético com afundamento de tensão relativo à simulação computacional.



Fonte: Dados do autor.

9.2.2 Ensaio com elevação de tensão

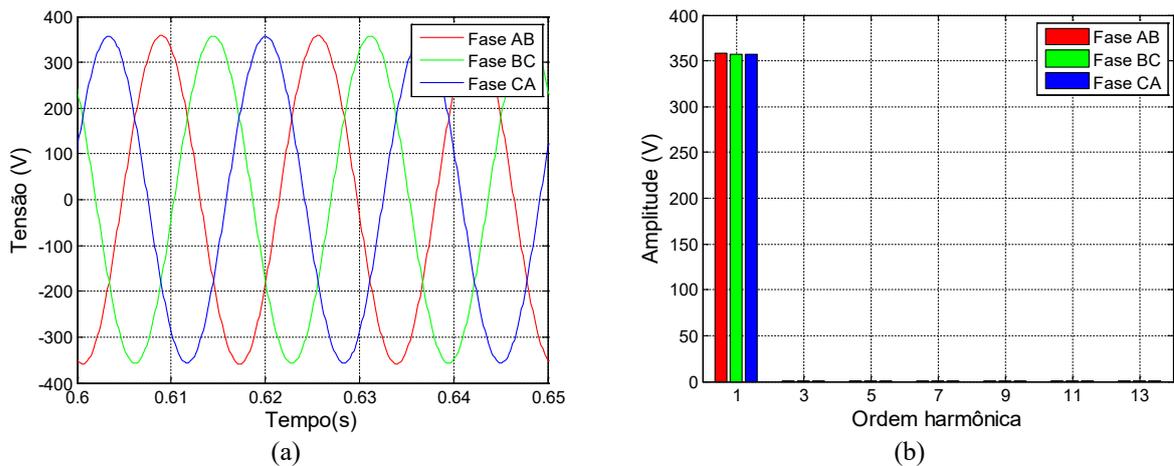
9.2.2.1 Velocidade de 1850 rpm

Neste primeiro momento são expostos os resultados do ensaio experimental e da simulação computacional quando ocorre uma elevação de tensão e o gerador encontra-se operando em 1850 rpm.

Nas Figuras 9.16 e 9.17 estão apresentados, respectivamente, as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator do ensaio experimental, referentes ao intervalo em que o gerador opera na elevação de tensão. Observa-se, em relação à operação em condições normais (analisado no Capítulo 5), um expressivo aumento da distorção na forma de onda da corrente em virtude da elevação da componente de terceiro harmônico da corrente.

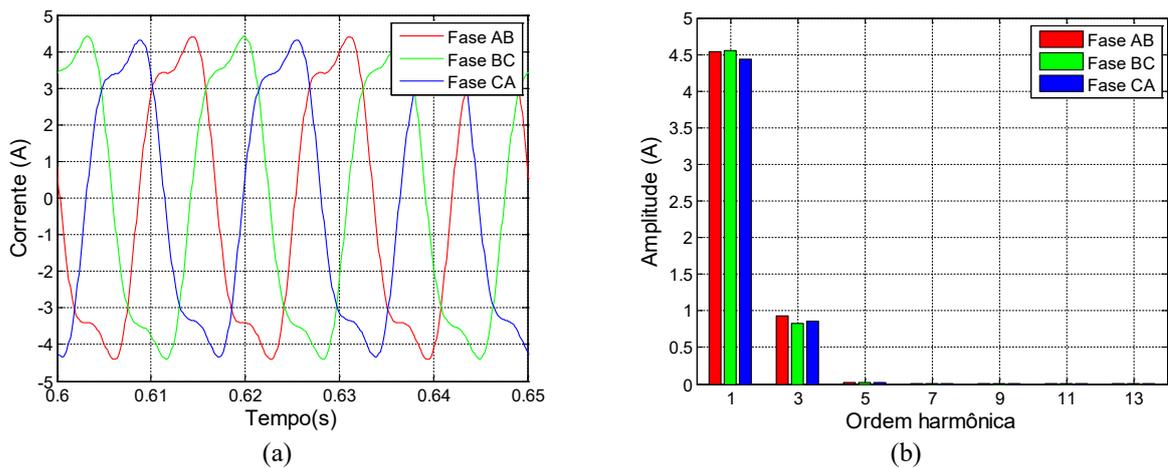
Com relação à velocidade mecânica do gerador na ocasião da elevação de tensão, obteve-se um valor igual a 1844 rpm a partir de um tacômetro digital. Esta diminuição de velocidade é consequência do aumento da “carga” que o gerador impõe sobre a máquina primária em função da elevação de tensão, além da ausência de um sistema de controle que possa atuar diante do distúrbio no sistema elétrico.

Figura 9.16 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.17 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

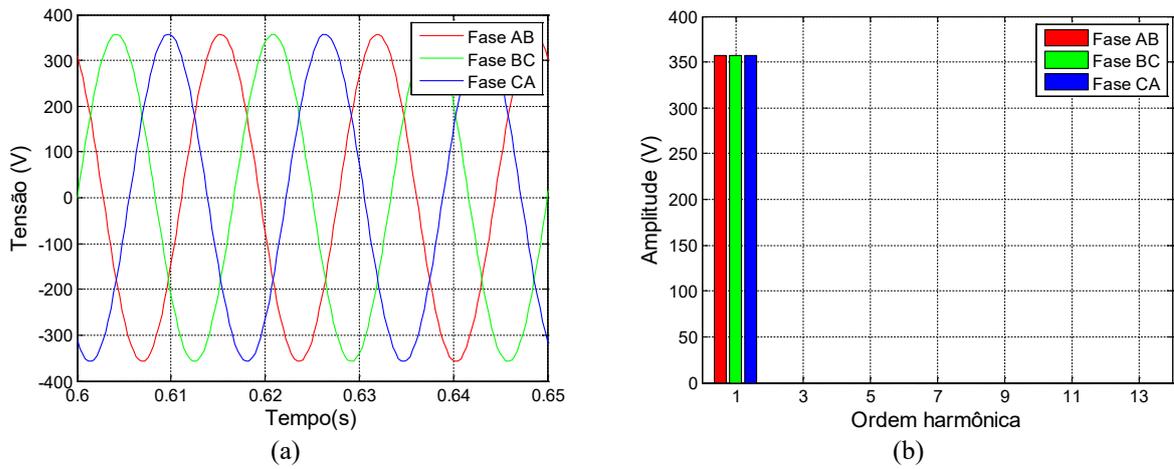


Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.18 e 9.19 estão ilustradas as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator obtidas com a simulação computacional. Verifica-se um bom comportamento entre esses resultados com aqueles obtidos no ensaio experimental.

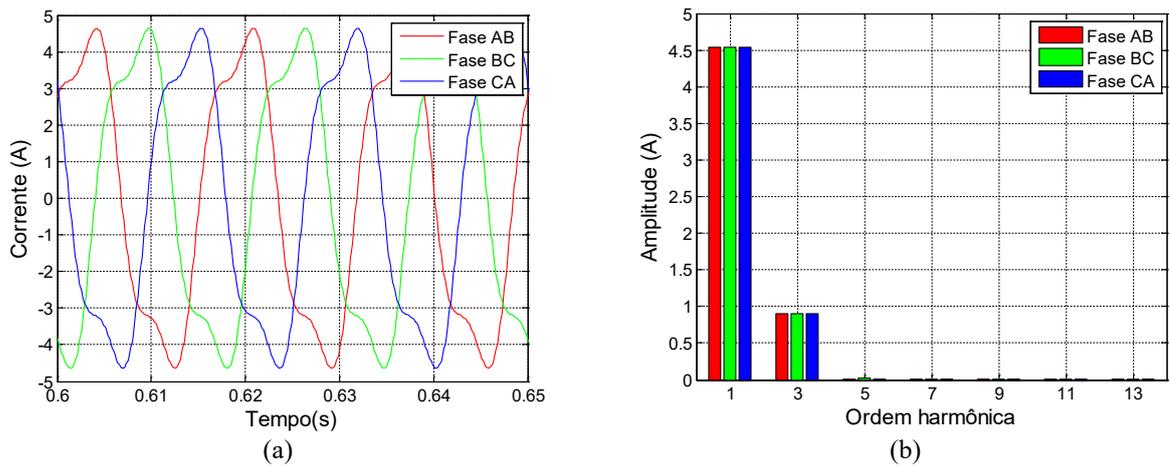
Os valores eficazes da tensão e da corrente referente ao ensaio experimental e à simulação encontram-se mostrados na Tabela 9.3. Comparando tais valores com aqueles expostos na Tabela 5.1, pertinentes ao ensaio experimental em condições normais de tensão para a velocidade de 1850 rpm, pode-se observar o aumento da corrente em função do aumento de tensão.

Figura 9.18 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.19 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

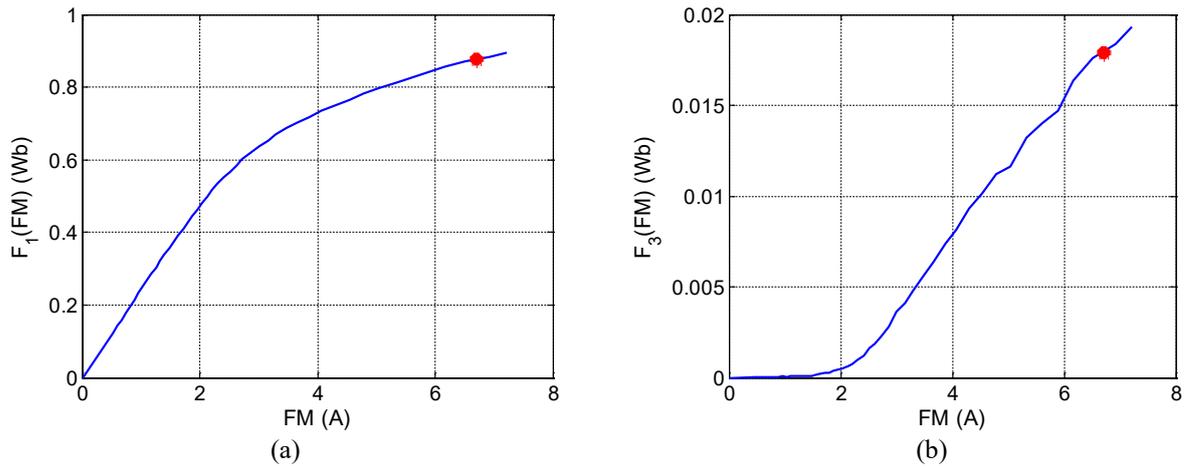
Tabela 9.3 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	253,50	253,00
V_{bc}	252,46	253,00
V_{ca}	252,20	253,00
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	3,27	3,27
I_{bc}	3,26	3,27
I_{ca}	3,19	3,27

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.20-(a) e 9.20-(b) está indicado a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Observa-se que durante o aumento de tensão, mesmo para uma velocidade menor, o gerador opera em uma região de elevada saturação, o que implica em uma maior componente de terceiro harmônico na corrente de estator.

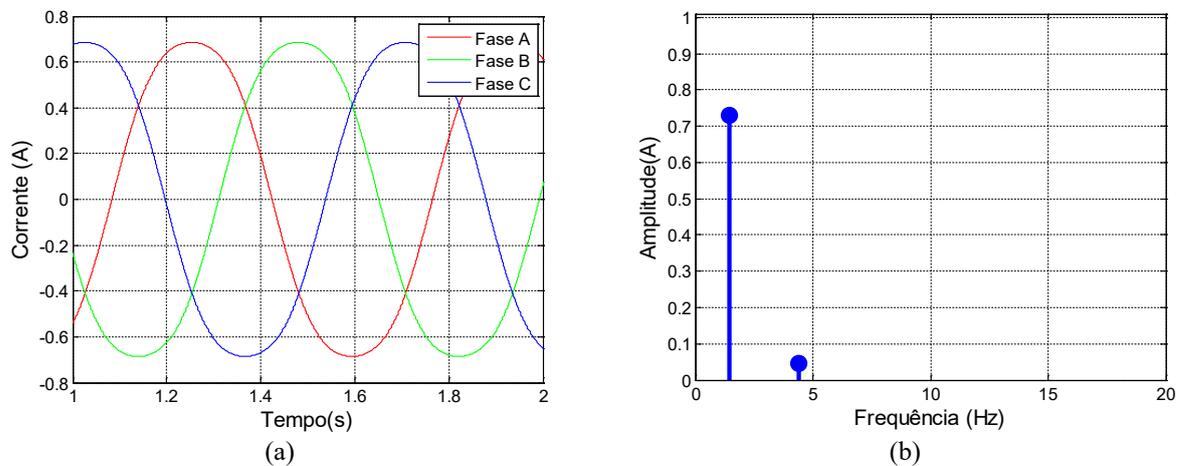
Figura 9.20 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

As correntes rotóricas estão ilustradas na Figura 9.21, em que é possível verificar que um aumento de 15% da tensão não influencia de maneira significativa em relação à operação em condições normais de tensão.

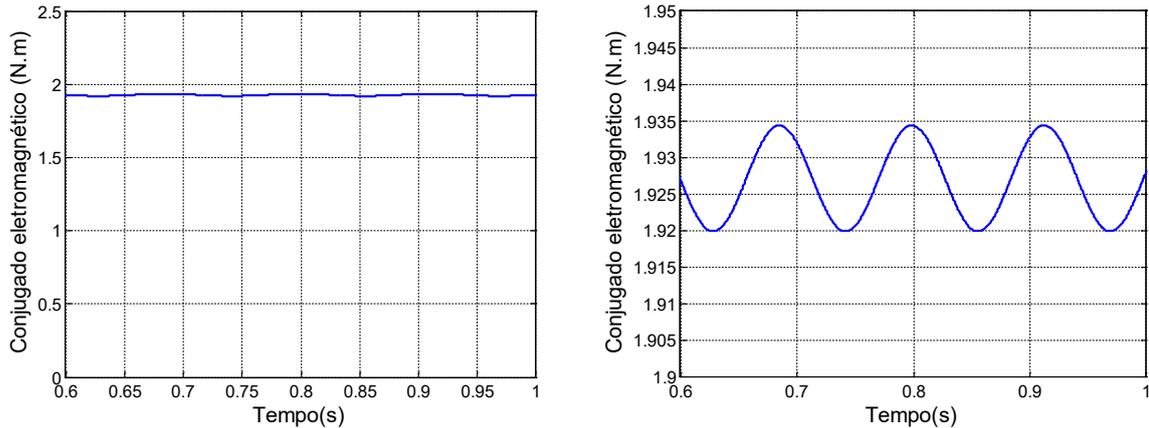
Figura 9.21 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

Analisando a curva do conjugado eletromagnético, Figura 9.22, percebe-se seu aumento em relação ao apresentado na Figura 5.8, referente àquele observado em condições normais de tensão. Como a elevação de tensão analisada é simétrica, ou seja, igual para as três fases, não há componente de sequência negativa, sendo assim, as oscilações observadas estão exclusivamente atreladas à operação na região de saturação magnética.

Figura 9.22 – Gráfico do conjugado eletromagnético com elevação de tensão relativo à simulação computacional.



Fonte: Dados do autor.

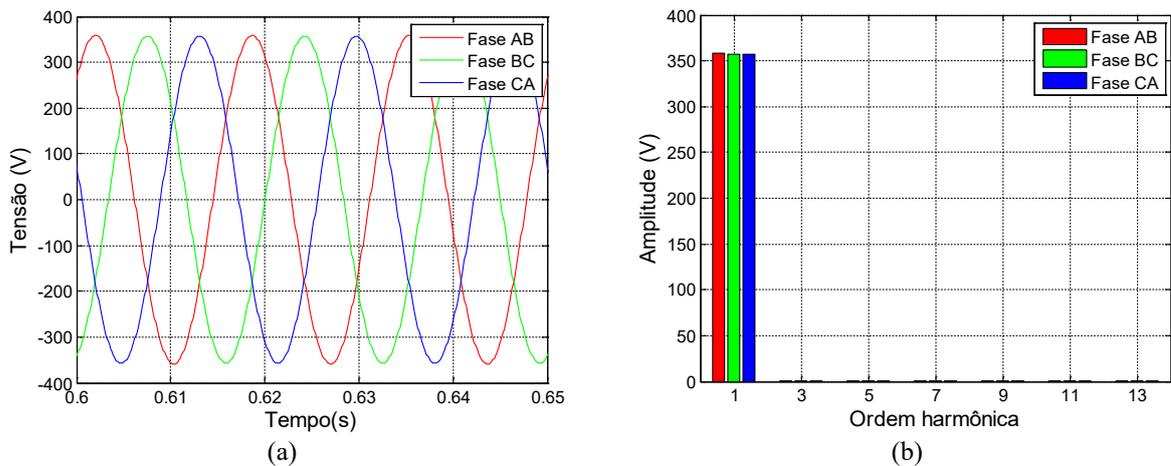
9.2.2.2 Velocidade de 1900 rpm

Nesta seção são expostos os resultados do ensaio experimental e da simulação computacional quando ocorre uma elevação de tensão e o gerador encontra-se operando em 1900 rpm.

Nas Figuras 9.23 e 9.24 estão apresentados, respectivamente, as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator do ensaio experimental, referentes ao intervalo em que o gerador opera na elevação de tensão. Observa-se, em relação à operação em condições normais (analisado no Capítulo 5), um expressivo aumento da distorção na forma de onda da corrente em virtude da elevação da componente de terceiro harmônico da corrente.

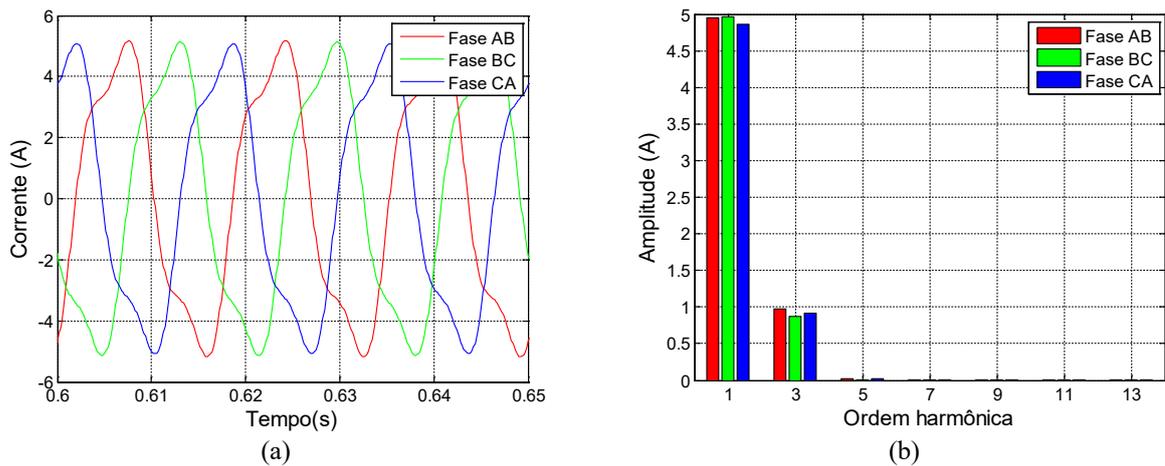
Com relação à velocidade mecânica do gerador na ocasião da elevação de tensão, obteve-se um valor igual a 1891 rpm a partir de um tacômetro digital. Esta diminuição de velocidade é consequência do aumento da “carga” que o gerador impõe sobre a máquina primária em função da elevação de tensão, além da ausência de um sistema de controle que possa atuar diante do distúrbio no sistema elétrico.

Figura 9.23 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.24 – Ensaio experimental com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.

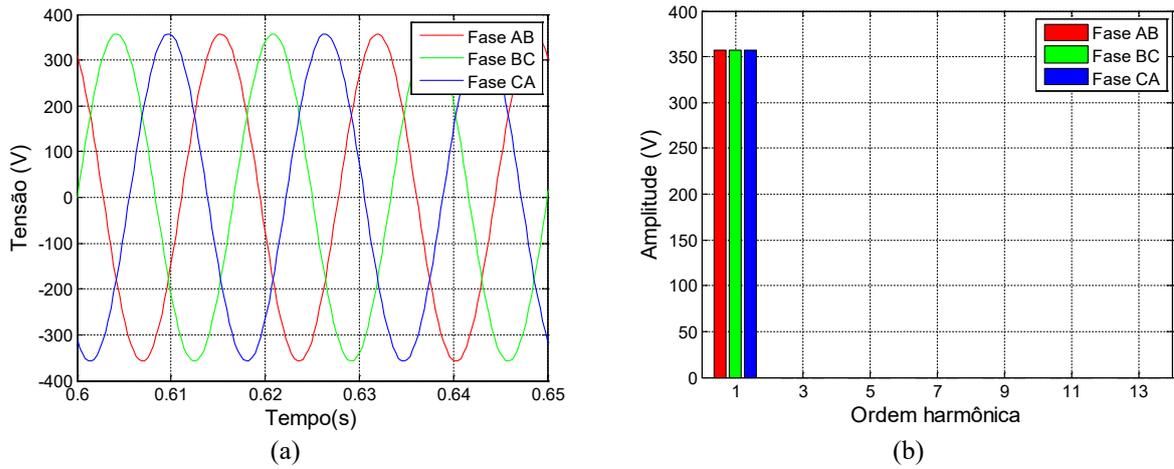


Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.25 e 9.26 estão ilustradas as formas de onda das tensões e correntes de fase de estator obtidas com a simulação computacional. Verifica-se um bom comportamento entre esses resultados com aqueles obtidos no ensaio experimental.

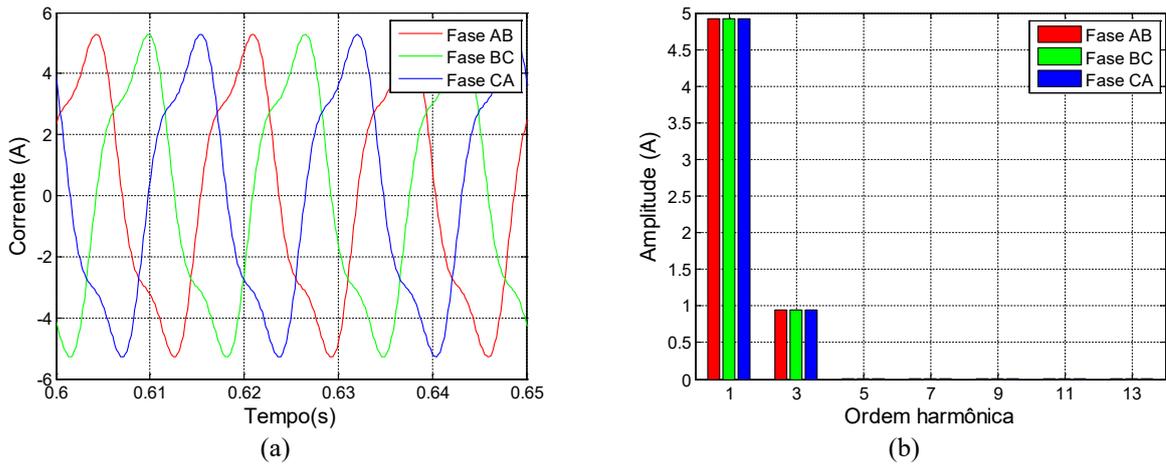
Os valores eficazes da tensão e da corrente referente ao ensaio experimental e à simulação encontram-se mostrados na Tabela 9.4. Comparando tais valores com aqueles expostos na Tabela 5.2, pertinentes ao ensaio experimental em condições normais de tensão para a velocidade de 1900 rpm, pode-se observar o aumento da corrente em função do aumento de tensão.

Figura 9.25 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das tensões de fase de estator; (b) Espectro harmônico das tensões de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

Figura 9.26 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de estator; (b) Espectro harmônico das correntes de fase de estator.



Fonte: Dados do autor.

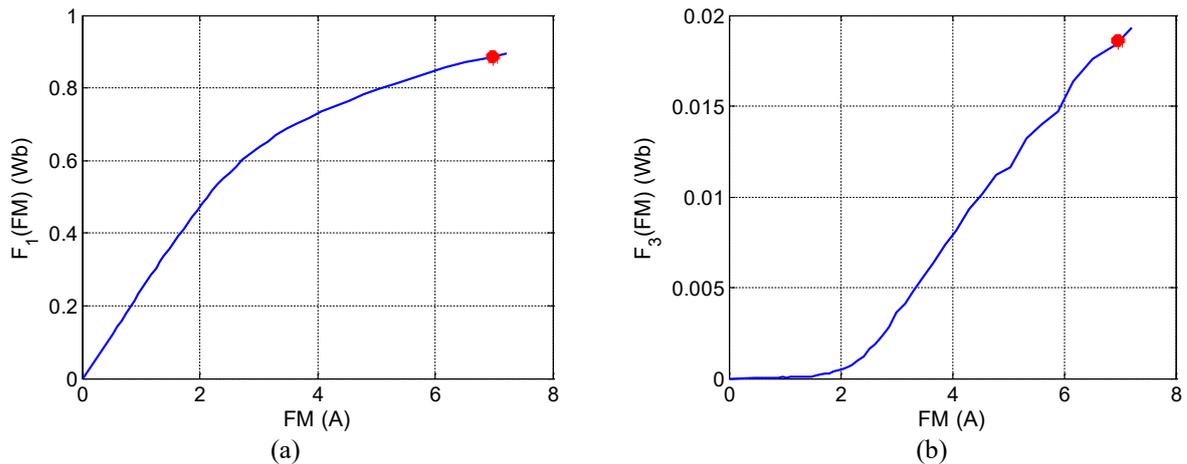
Tabela 9.4 – Valores eficazes das tensões e correntes de fase de estator relativos ao ensaio experimental e à simulação computacional.

	Dados experimentais	Dados de simulação
Tensões de fase	Valor (V_{RMS})	Valor (V_{RMS})
V_{ab}	253,60	253,00
V_{bc}	252,52	253,00
V_{ca}	252,32	253,00
Correntes de fase	Valor (A_{RMS})	Valor (A_{RMS})
I_{ab}	3,56	3,53
I_{bc}	3,56	3,53
I_{ca}	3,49	3,53

Fonte: Dados do autor.

Nas Figuras 9.27-(a) e 9.27-(b) está indicado a localização do ponto de operação do gerador nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$, respectivamente. Observa-se que durante o aumento de tensão, mesmo para uma velocidade menor, o gerador opera em uma região de elevada saturação, o que implica em uma maior componente de terceiro harmônico na corrente de estator.

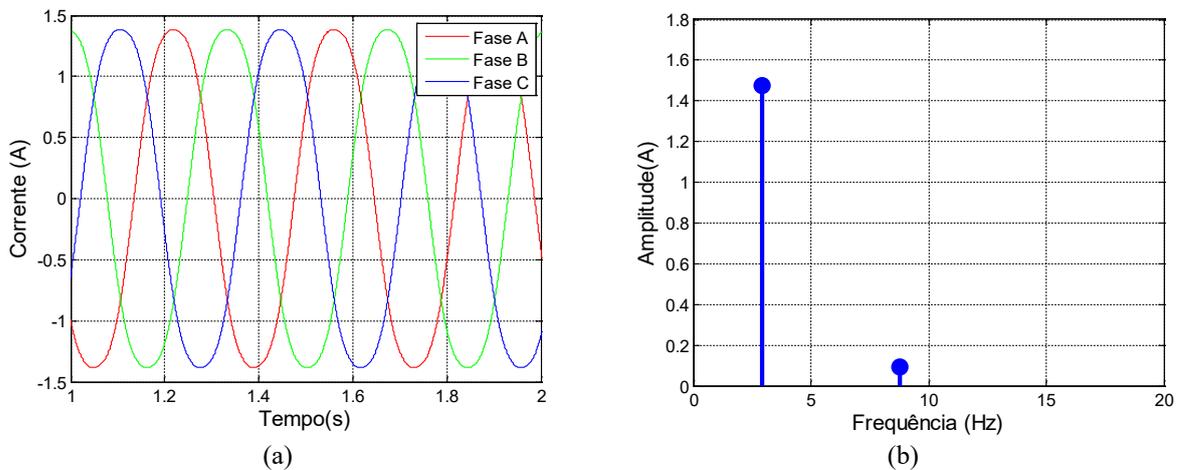
Figura 9.27 – Localização do ponto de operação nos gráficos das funções harmônicas magnéticas: (a) Gráfico da componente $F_1(\overline{FM})$; (b) Gráfico da componente $F_3(\overline{FM})$.



Fonte: Dados do autor.

As correntes rotóricas estão ilustradas na Figura 9.28, em que é possível verificar, novamente, que um aumento de 15% da tensão não influencia de maneira significativa em relação à operação em condições normais de tensão.

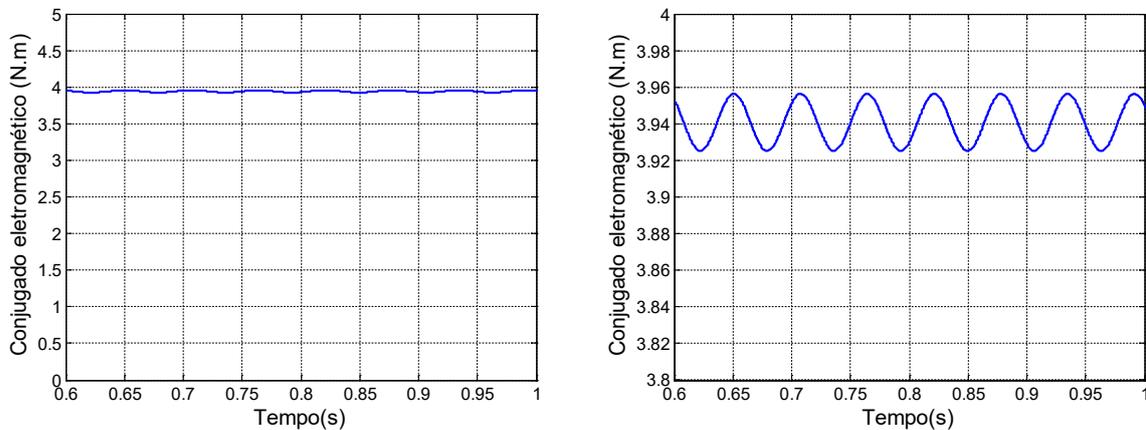
Figura 9.28 – Simulação computacional com elevação de tensão: (a) Gráfico das correntes de fase de rotor; (b) Espectro harmônico da corrente de fase de rotor.



Fonte: Dados do autor.

O conjugado eletromagnético na ocasião da elevação de tensão está ilustrado na Figura 9.29, sendo possível observar o mesmo comportamento verificado no caso anterior.

Figura 9.29 – Gráfico do conjugado eletromagnético com elevação de tensão relativo à simulação computacional.



Fonte: Do autor.

9.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados e comparados os resultados obtidos em ensaios experimentais com os de simulações computacionais fundamentadas no modelo matemático empregado no presente trabalho para a análise do gerador de indução de rotor bobinado conectado a um sistema elétrico em que há variações na tensão. O estudo foi realizado para duas diferentes velocidades impostas pela máquina primária, sendo elas 1850 e 1900 rpm.

Visando a coerência do estudo, foram empregados como referência os limites estabelecidos pelo PRODIST para variações de tensão. A comparação entre os resultados obtidos aponta para a eficácia da modelagem utilizada para as condições descritas acima.

Observou-se pelo ponto de operação nas curvas $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ e $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$ que o funcionamento do gerador na ocasião do afundamento de tensão para as duas condições de velocidade analisadas ocorreu fora da região de saturação magnética. Em contrapartida, a operação durante a elevação de tensão já se deu em uma região com maior nível de saturação do que aquela verificada na operação em condições normais de tensão.

10. CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

10.1 Conclusões finais

Este trabalho estudou o comportamento do gerador de indução trifásico de rotor bobinado frente a diversas situações de operação. Para isto, foi utilizado uma plataforma de ensaios experimentais contendo o gerador de indução, emuladores de velocidade e da rede de suprimento. Os resultados experimentais foram contrastados com os resultados provenientes da simulação digital para diversos pontos de operação do gerador, levando em consideração desequilíbrios, distorções harmônicas e variações de tensão, na rede de suprimento.

Para o levantamento dos resultados de simulação foi utilizada a modelagem no domínio da fase que leva em consideração o modelo físico da máquina, além dos aspectos de saturação do material magnético. Os resultados apresentados apontam que o modelo matemático se mostrou adequado para apresentar de forma bastante fidedigna as grandezas de corrente e tensão da máquina, levando a concluir que os demais sinais são também retratados de forma bastante fiel, mesmo diante de condições adversas de operação. Os resultados de simulação para situações de desequilíbrio, distorções harmônicas e também frente a variações de tensão, apresentaram grande concordância com os sinais reais, o que mostra que o modelo é adequado para estudos de casos reais.

O modelo matemático em análise mostrou-se bastante relevante para os estudos, pois permite a observação de solicitações elétricas e mecânicas da máquina, sem, no entanto, expor a máquina real a condições extremas que possa danificá-la. É importante ressaltar também que os geradores de indução duplamente alimentados possuem os enrolamentos de estator conectados solidamente à rede de suprimento, estando, desta forma, sujeitos aos distúrbios produzidos pelo *grid*.

Com a análise do gerador em condições normais de tensão no Capítulo 5, verificou-se que sua operação se deu na região de saturação magnética para as duas condições de velocidade. Isso resultou no aparecimento de componentes harmônicas de terceira ordem nas correntes estatóricas, que induzem componentes harmônicas nos enrolamentos rotóricos, ocasionando em pequenas oscilações no conjugado eletromagnético.

O Capítulo 6 mostrou que a inserção de desequilíbrio de tensão acarreta no aparecimento de uma componente harmônica de dupla frequência nas correntes rotóricas e no conjugado

eletromagnético do gerador. Notou-se ainda que as oscilações ocasionadas por essa componente no conjugado possuem amplitudes bem mais elevadas do que aquelas decorrentes da operação na região de saturação magnética.

No Capítulo 7 observou-se que, assim como no desequilíbrio de tensão, aparecem conteúdo harmônico nas correntes rotóricas e oscilações de grande amplitude no conjugado eletromagnético, devido à inserção de componentes harmônicas junto à tensão. Estes harmônicos nas correntes rotóricas possuem relação de frequência dependente da ordem harmônica presente nos enrolamentos de estator, assim como da sua classificação em componentes de sequência positiva, negativa e zero.

Adicionalmente, constatou-se ainda no Capítulo 7, em todos os estudos de casos realizados nessa etapa, que a distorção harmônica total das correntes estatóricas é bem superior ao da tensão. Dessa forma, além dos efeitos supramencionados, o gerador de indução contribui para a poluição harmônica do sistema elétrico, uma vez que as correntes estatóricas retornam para este.

No Capítulo 8, verificou-se que a operação do gerador de indução diante de um sistema com distorções harmônicas em conjunto com desequilíbrios de tensão apresenta, de forma simultânea, os efeitos verificados individualmente nos Capítulos 6 e 7, respectivamente. Nesse caso, ficou evidente que, tanto nas correntes rotóricas quanto no conjugado eletromagnético, a maior componente que ocasiona as oscilações se deve ao desequilíbrio de tensão.

Além disso, observou-se ainda no Capítulo 8, que a redução das amplitudes das harmônicas de tensão de estator resultou na diminuição das suas correspondentes nas correntes estatóricas. Assim, quanto menores forem as amplitudes das harmônicas de tensão, o gerador de indução passa a contribuir menos com distorções harmônicas de corrente ao sistema.

Por fim, no Capítulo 9 foi observado que variações simétricas de tensões afetam de forma direta a velocidade mecânica da máquina. O afundamento de tensão implica em aumento da velocidade mecânica e leva a operação da máquina para a região com baixo nível de saturação magnética; enquanto que a elevação de tensão implica na redução da velocidade mecânica e operação na região com maior nível de saturação magnética.

10.2 Propostas para trabalhos futuros

De acordo com os estudos que foram realizados, algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser apresentadas, sendo elas:

- Projeto e construção de um conversor na topologia back-to-back para estudo do gerador de indução duplamente alimentado;
- Estudos da aplicação de conversores na topologia back-to-back em geradores de indução duplamente alimentado, com representação no modelo da fase;
- Análise sobre a contribuição harmônica do gerador de indução duplamente alimentado utilizando o modelo matemático no domínio da fase;
- Estudo, empregando acelerômetro, das vibrações mecânicas decorrentes da operação do gerador diante de distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão;
- Avaliar o desempenho do modelo matemático no domínio da fase para regimes transitórios;
- Avaliar os efeitos de outros distúrbios aplicados ao gerador.

Referências bibliográficas

- ABAD, G. e IWANSKI, G. (2014). Properties and Control of a Doubly Fed Induction Machine. Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, Vol. 18, p. 270-318.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 17094-3:2018: Máquinas elétricas girantes – Motores de Indução – Parte 3: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- ANEEL. (2021). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47. Acessado em 16 de out. de 2021.
- ARAÚJO, L. R. (2018). Análise do comportamento do DFIG em uma rede elétrica diante de afundamentos de tensão e falhas internas utilizando técnicas de controle PI e LQI. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará.
- AZEVEDO, G. T.; ROMÃO, E. C. e MENEGATTI, C. R. (2019). Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através de interferência destrutiva. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 41.
- BIM, E. (2012). Máquinas elétricas e acionamento. 2ª ed. Elsevier. Rio de Janeiro.
- BISPO, D. (2000). Contribuição ao estudo de máquinas elétricas incluindo o efeito da saturação magnética. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- BRACONNIER, B. (2012). Dynamic phasor modeling of doubly-fed induction machines including saturation effects of main flux linkage. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de Colúmbia Britânica.

- CARVALHO, N. J. S.; ALMEIDA, E. M. P; NASCIMENTO, E. O. e FIGUEIRA, K. S. (2015). Importância da modelagem computacional na engenharia. Anais da Jornada Acadêmica da Universidade Federal do Oeste do Pará.
- CHAPMAN, S. J. (2013). Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª ed. AMGH editora. Porto Alegre.
- CHENG, C. e NIAN, H. (2017). Low-complexity model predictive stator current control of DFIG under harmonic grid voltages. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 32, No. 3, p. 1072-1080.
- CORREIA, A. J. L. (2014). Estimação de parâmetros mecânicos de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Universidade Estadual Paulista.
- COSTA, L. L. H. (2012). Um estudo das componentes simétricas generalizadas em sistemas trifásicos não senoidais. Dissertação de mestrado.
- Datasheet LV20-P. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheetpt.com/datasheet-pdf/view/828813/LEM/LV20-P.html>. Acessado em 7 de nov. de 2020.
- Datasheet LV55-P. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/115009/LEM/LA55P.html>. Acessado em 7 de nov. de 2020.
- Datasheet PCI6229. Disponível em: <https://www.ni.com/documentation/en/multifunction-io-device/latest/pci-6229/overview/>. Acessado em 7 de nov. de 2020.
- DECKMANN, S. M. e POMILIO, J. A. (2010). Avaliação da qualidade da energia elétrica. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>. Acessado em 16 de out. de 2021.
- DEL TORO, V. (1999). Fundamentos de Máquinas Elétricas. LTC. Rio de Janeiro.

- DERAZ, S. A. e AZAZI, H. Z. (2017). Impact of distorted voltage on three-phase induction motor performance. Nineteenth International Middle East Power Systems Conference, p. 857-863.
- DONOLO, P.; BOSSIO, G.; DE ANGELO, C.; GARCÍA, G. e DONOLO, M. (2016). Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. Electric power systems research, Vol. 140, p. 866-873.
- EL-SHIMY, M. (2010). Optimal site matching of wind turbine generator: Case study of the Gulf of Suez region in Egypt. Renewable Energy, Vol. 35, No. 8, p. 1870-1878.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. R. e UMANS, C. (2006). Tradução Anatólio Laschuk– . Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência. 6ª ed. Bookman. Porto Alegre.
- FORRESTER, R. (2016). History of Electricity. Available at SSRN 2876929.
- FORTESCUE, C. L. (1918). Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 37, No. 2, p. 1027-1140.
- FREITAS, M. A.; ANDRADE, D. A.; PAULA, H. e DOMINGOS, J. L. (2003). Effects of magnetic saturation on induction machines driven by static converters. International Electric Machines and Drives Conference, Vol. 2, p. 1026-1031.
- IEA - International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons>. Acessado em 10 de nov. de 2020.
- JOSE, J. T. e CHATTOPADHYAY, A. B. (2019). Modeling of the magnetizing phenomena of doubly fed induction generator using neuro-fuzzy algorithm considering non-linearity. International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1, p. 23.

- KEARNEY, J. (2013). Grid Voltage Unbalance and Integration of DFIG's. Tese de doutorado. Universidade de Dublin.
- LAMME, B. G. (1921). The story of the induction motor. Journal of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 40, p. 203-223.
- LEKURWALE, R. A. e TARNEKAR, S. G. (2012). Determination of Moment of Inertia of Electrical Machines using MATLAB. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1, No. 10, p. 1-4.
- LI, W.; CHAO, P.; LIANG, X.; MA, J.; XU, D. e JIN, X. (2017). A practical equivalent method for DFIG wind farms. IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 9, p. 610-620.
- LIU, M.; PAN, W.; ZHANG, Y.; ZHAO, K.; ZHANG, S. e LIU, T. (2019). A dynamic equivalent model for DFIG-based wind farms. IEEE Access, Vol. 7, p. 74931-74940.
- MAJDOUB, Y.; ABBOU, A.; AKHERRAZ, M. e EL AKHRIF, R. (2017). Modeling saturation of DFIG wind turbine in presence of iron losses. 2017 International Conference on Electrical and Information Technologies, (p. 1-4).
- MAMEDE, J. F. (2017). Instalações elétricas industriais de acordo com a norma brasileira NBR 5419: 2015. 9ª ed. Editora LTC. Rio de Janeiro.
- MARQUES, J. (2004). Turbinas eólicas: Modelo, análise, e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.
- MOREIRA, M. A. (2014). Modelos científicos, modelos mentais, modelagem computacional e modelagem matemática: aspectos epistemológicos e implicações para o ensino. Revista brasileira de ensino de ciência e tecnologia, Vol. 7, No. 2, p. 1-20.
- MULJADI, E.; YILDIRIM, D.; BATAN, T. e BUTTERFIELD, C. P. (1999). Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation. 1999 IEEE Industry Applications Conference, Vol. 2, p. 1359-1365.

- NAKASHIMA, K. (2013). Valor médio e eficaz. Disponível em: http://www.profelectro.info/wp-content/uploads/rms_medio_multimetro_Dc_e_AC.pdf. Acesso em 27 de out. de 2021.
- NASCIMENTO, C. S. C. (2010). Proposta para implantação de microcentrais de geração à gás com utilização de geradores de indução. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NASCIMENTO, C. S. C. (2014). Diretrizes analíticas para projeto de geradores de indução de rotor tipo gaiola de esquilo. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NEVES, A. B. F. (2014). Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um Motor de Indução Trifásico. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília.
- OLIVEIRA, C. A. (2018). Plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e simulação de cargas mecânicas: acionamento, operação e monitoramento com auxílio de fonte programável. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.
- OLIVEIRA, F. D. C. (2016). Suportabilidade a afundamentos de tensão em geradores DFIG empregando limitador supercondutor. Tese de doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- OLIVEIRA, I. A. C. (2017). Sistema de geração eólica baseado no gerador de indução de rotor bobinado alimentado por tensões desequilibradas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- OLIVEIRA, J. M. M. (2018). Efeitos da operação do gerador de indução no comportamento do gerador síncrono operando em um sistema isolado alimentando cargas não lineares. Tese de doutorado. Universidade Federal de Goiás.
- ONS. (2021). Procedimentos de rede. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acessado em 09 de jan. de 2022.

- PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M.; BACCA, I. e FILHO, J. M. C. (2013). Variações de tensão de curta duração – Parte I. Revista O Setor Elétrico.
- PIRES, I. A. (2010). Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais – Parte II. Revista O setor Elétrico, capítulo 3.
- RAMAN, B. S. V.; TRIPATHI, P. R.; GUPTA, G. S. e KESHRI, R. K. (2020). Effects of Injected Harmonics on Torque Pulsations of a Three Phase Induction Motor: Study on SPWM. 2020 International Conference on Computational Performance Evaluation, p. 637-642.
- RESENDE, J. T. (1999). Modelagem da máquina de indução trifásica incluindo a saturação magnética – análise dinâmica do gerador de indução auto-excitado. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia.
- SANTOS, Â. M. M.; MEDEIROS, L. T. P.; SILVA, L. P.; JUNIOR, I. D. S.; TEIXEIRA, V. S. D. C. e MOREIRA, A. B. (2019). Wind power system connected to the grid from Squirrel Cage Induction Generator (SCIG). IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference, p. 1-6.
- SILVA, T. A. (2012). Avaliação probabilística do impacto da geração distribuída eólica nos afundamentos de tensão de curta duração. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Maranhão.
- SIRAKI, A. G. (2012). Efficiency estimation of induction machines with limited measurements. Tese de doutorado. Universidade de Concórdia.
- SOUZA, E. V. N. (2006). Um modelo dq de máquina de indução saturada considerando os harmônicos espaciais de fluxo magnetizante. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande.

- TAVARES, A. A. (2020). Análise de máquinas de indução com rotor em gaiola considerando saturação magnética e harmônicos. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VANÇO, W. E. (2020). Análise das perturbações causadas pela poluição harmônica e por desequilíbrio de tensão em geradores síncronos de polos salientes isolados. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo.
- WEG. CFW 09. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/NE/pt/Drives/Produtos-Fora-de-Linha/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW09/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW09/p/MKT_WDC_GLOBAL_VARIABLE_SPEED_DRIVE_CFW09. Acessado em 17 de nov. de 2020.
- WU, M. (2009). Análise teórico-experimental do gerador de indução trifásico diretamente conectado à rede de distribuição elétrica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.
- YUAN, G.; LIANG, R. e HOU, X. (2017). Control strategy of DFIG under unbalanced grid voltage conditions based on complex-vector-resonant regulator. 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, p. 1-6.
- ZHOU, Y., ZHAO, L. e LEE, W. J. (2018). Robustness analysis of dynamic equivalent model of DFIG wind farm for stability study. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, p. 5682-5690.

Apêndice A – Relação de produtividade obtida com o trabalho

PINHEIRO, V. M.; OLIVEIRA, C. A; BELETTI, M. A. e GOMES, L. C. (2021). Análise do setor de energia eólica no Brasil. Revista Científica UMC, Vol. 6, p. 1.

PINHEIRO, V. M.; OLIVEIRA, C. A e GOMES, L. C. (2021). Contribuição à análise do gerador de indução trifásico com rotor bobinado: estudos experimentais e teóricos em condições normais de operação e diante de desequilíbrios de tensão. Revista RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT, Vol. 10. DOI: [doi: 10.33448/rsd-v10i16.23490].

PINHEIRO, V. M.; OLIVEIRA, C. A e GOMES, L. C. (2020). Implementação de uma plataforma experimental para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico com base na norma técnica NBR17094-3:2018. Revista Científica UMC, Vol. 54, p. 1-14.

PINHEIRO, V. M.; OLIVEIRA, C. A e GOMES, L. C. (2019). Análise do desempenho do motor de indução trifásico por meio de ensaios recomendados em norma técnica e simulação computacional. Revista Forscience, Vol. 7, p. 362. DOI: [doi: 10.29069/forscience.2019v7n1.e362].

PINHEIRO, V. M; OLIVEIRA, C. A; NEVES, B. L. e GOMES, L. C. (2019). Análise do desempenho do motor de indução trifásico por meio de ensaios recomendados em norma técnica e simulação computacional. XVII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica.

PINHEIRO, V. M.; NEVES, B. L.; OLIVEIRA, C. A. e GOMES, L. C. (2019). Plataforma implementada para o levantamento das características magnéticas da máquina de indução trifásica. SECITEC 2019 - Semana de Educação, Ciência e Tecnologia de Itumbiara.

Apêndice B – Conceitos básicos da máquina de indução trifásica

A seguir são apresentadas as características construtivas da máquina de indução trifásica, algumas características particulares, seu princípio de funcionamento e o circuito equivalente.

B.1 Aspectos construtivos

A máquina de indução trifásica é um equipamento de conversão eletromecânica constituído basicamente por duas estruturas principais. A primeira, denominada estator, é a parte fixa da máquina em que estão localizados os enrolamentos de estator. Por conseguinte, tem-se a segunda estrutura, denominada rotor, em que estão os enrolamentos de rotor e, diferentemente da primeira, trata-se da parte móvel da máquina.

Além do mais, existem dois tipos de rotor, fazendo com que as máquinas de indução sejam divididas em dois grupos, o das máquinas com rotor gaiola de esquilo e, o outro, daquelas constituídas por rotor bobinado. De forma a ilustrar melhor os dois tipos de máquinas, é apresentada a Figura B.1.

Figura B.1 – Máquina de indução trifásica de rotor bobinado e rotor em gaiola de esquilo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em máquinas de indução trifásica de rotor em gaiola de esquilo, os enrolamentos de rotor são formados por barras condutoras que são instalados em ranhuras no ferro do rotor

(FITZGERALD *et al.*, 2006). O acesso aos terminais desses enrolamentos não é possível, uma vez que suas extremidades são curto-circuitadas por anéis de curto-circuito, como pode ser visualizado na Figura B.2. A máquina de indução que apresenta essa estrutura de rotor é bastante empregada como motor (OLIVEIRA, 2018), por possui uma construção simples, ser robusta e necessitar de pouca manutenção.

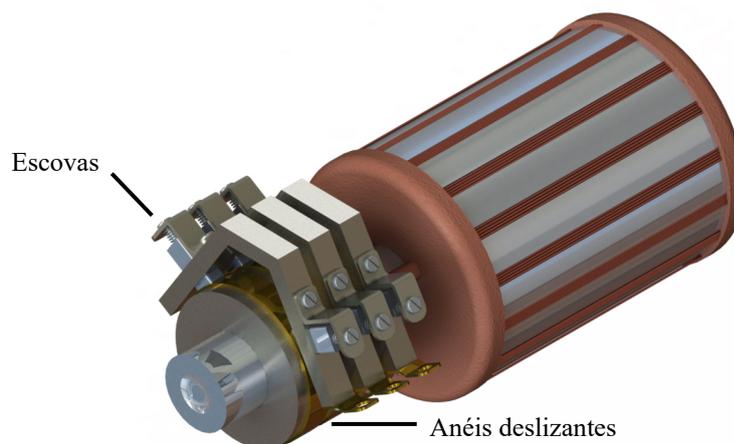
Figura B.2 – Representação de um rotor em gaiola de uma máquina de indução trifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na máquina de indução trifásica composta por rotor bobinado, o rotor é constituído por enrolamentos semelhantes aos encontrados no estator. Conforme está apresentado na Figura B.3, os terminais dos enrolamentos de rotor são conectados a anéis que se encontram sobre o eixo da máquina, permitindo seu acesso de forma externa. Esse acesso é realizado por meio de escovas de carvão que ficam em contato direto com os anéis, esclarecendo, desse modo, a maior necessidade de manutenção que essa topologia de máquina exige.

Figura B.3 – Representação de um rotor bobinado de uma máquina de indução trifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação ao estator da máquina de indução, este é semelhante seja para aquelas que empregam rotor bobinado, quanto para rotor gaiola de esquilo. Esta parte da máquina é

constituída por finas chapas de material ferromagnético com ranhuras e isoladas entre si por uma camada de óxido ou por uma fina cobertura de esmalte ou verniz de isolamento (FITZGERALD *et al.*, 2006). As chapas são dispostas consoante está apresentada na Figura B.4, de forma a reduzir os efeitos das chamadas “correntes parasitas”.

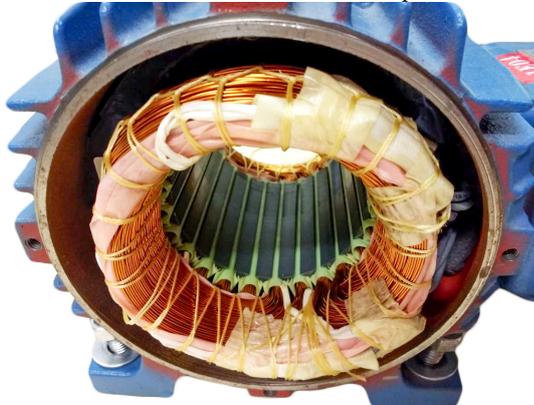
Figura B.4 – Representação da estrutura laminada do estator.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O conjunto de placas discutido anteriormente forma o chamado núcleo magnético da máquina de indução, o qual é responsável por confinar o fluxo magnético em um caminho predefinido, uma vez que o material ferromagnético possui alta permeabilidade magnética. Ademais, nas ranhuras presentes nas chapas são acomodados os enrolamentos de estator, como está apresentado na Figura B.5. Em uma máquina de indução trifásica tais enrolamentos são formados por três bobinas dispostas de 120° entre si.

Figura B.5 – Enrolamentos de estator de uma máquina de indução trifásica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

B.3 Princípio de funcionamento

A máquina de indução, seja ela de rotor gaiola quanto bobinado, apresenta o mesmo princípio de funcionamento, que se fundamenta na interação entre os campos magnéticos de estator e rotor.

Na operação como motor, quando correntes trifásicas percorrem os enrolamentos de estator, há a formação de um campo magnético girante cuja orientação gira em torno de um eixo (NASCIMENTO, 2010). A velocidade desse campo é definida como velocidade síncrona, n_s , que depende das características construtivas da máquina bem como da frequência elétrica do sistema aplicado ao estator, podendo ser determinada pela seguinte expressão:

$$n_s = \frac{120}{P} \cdot f_s \quad (\text{B.1})$$

Onde:

n_s – Velocidade síncrona em rpm.

P – Número de polos.

f_s – Frequência do sistema aplicado ao estator (Hz).

Esse campo magnético girante estabelecido no estator, ao enlaçar os condutores do rotor, produz uma tensão induzida. Conseqüentemente, desde que os enrolamentos do rotor formem um caminho fechado, haverá um fluxo de corrente induzida, que dará origem ao campo magnético de rotor, cuja interação com o campo magnético girante estabelecido no estator, produzirá o conjugado eletromagnético.

Para que ocorra essa indução de tensão nos enrolamentos de rotor, a velocidade que gira o rotor, n_r , deve ser diferente da velocidade síncrona, o que faz a máquina de indução ser conhecida como uma máquina assíncrona. A essa diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, dá-se o nome de escorregamento, que pode ser calculado da seguinte forma:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (\text{B.2})$$

ou empregando as velocidades angulares:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (\text{B.3})$$

Em que:

s – Escorregamento.

n_r – Velocidade do rotor em rpm.

ω_s – Velocidade angular síncrona (rad/s)

ω_r – Velocidade angular do rotor (rad/s).

Na literatura, a relação estabelecida entre os enrolamentos de estator e rotor é conhecida como transformador rotativo (DEL TORO, 1999; FITZGERALD *et al.*, 2006; CHAPMAN, 2013). Isso se deve ao fato da frequência elétrica da tensão e corrente induzida no rotor, f_r , ser diretamente dependente do escorregamento, ou seja:

$$f_r = s \cdot f_s \quad (\text{B.4})$$

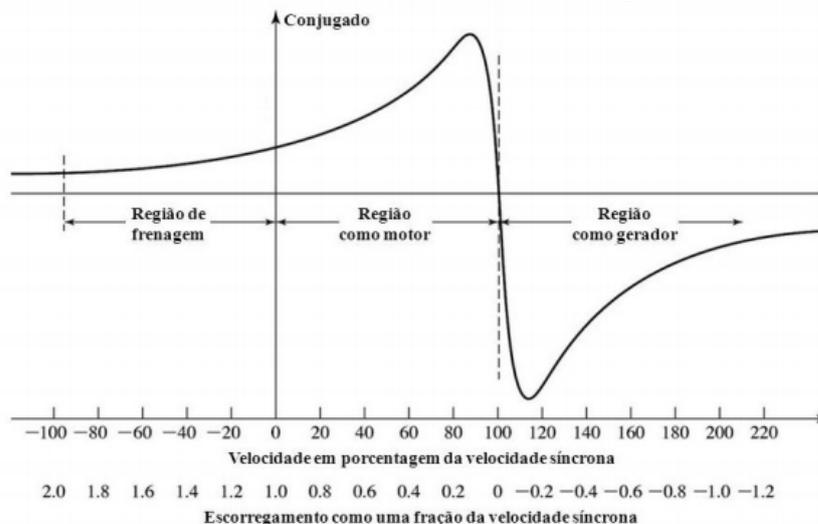
Na operação como gerador, as equações (B.1) - (B.4) também são válidas. Contudo, neste caso a máquina de indução necessita operar em uma velocidade superior à velocidade síncrona, sendo necessária, assim, a imposição de uma força externa em seu eixo. Isso pode ser realizado empregando-se uma outra máquina ou turbina, que será responsável por converter a energia de alguma fonte energética em energia mecânica na forma de conjugado e velocidade de rotação.

O escorregamento indica o modo de operação da máquina, tal que:

- $s > 1$ – Velocidade do rotor em sentido contrário ao da velocidade síncrona, indicando a operação como freio.
- $0 < s < 1$ – Velocidade do rotor menor que a velocidade síncrona, indicando a operação como motor.
- $s < 0$ – Velocidade do rotor maior que a velocidade síncrona, indicando a operação como gerador.

De forma gráfica, o comportamento do conjugado em função do escorregamento está apresentado na figura B.6.

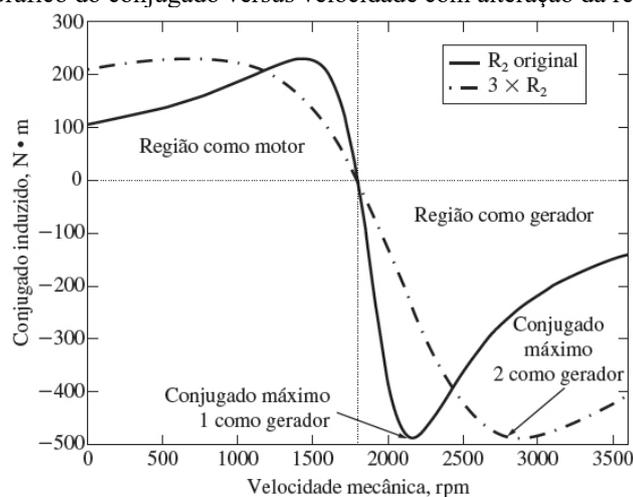
Figura B.6 – Gráfico do conjugado versus escorregamento.



Fonte: (FITZGERALD *et al.*, 2006).

Em máquinas de indução de rotor bobinado, em que o acesso aos terminais dos enrolamentos de rotor é possível, a inserção de resistências nesses permite a alteração da curva conjugado *versus* velocidade, conforme está apresentado na Figura B.7. Essa estratégia é empregada em alguns modelos de geradores eólicos, a exemplo da Vestas V39-600 (EL-SHIMY, 2010), para alterar a faixa de velocidade na qual o gerador pode operar, se adaptando melhor às condições de vento e, assim, aumentando sua eficiência.

Figura B.7 – Gráfico do conjugado versus velocidade com alteração da resistência rotórica.



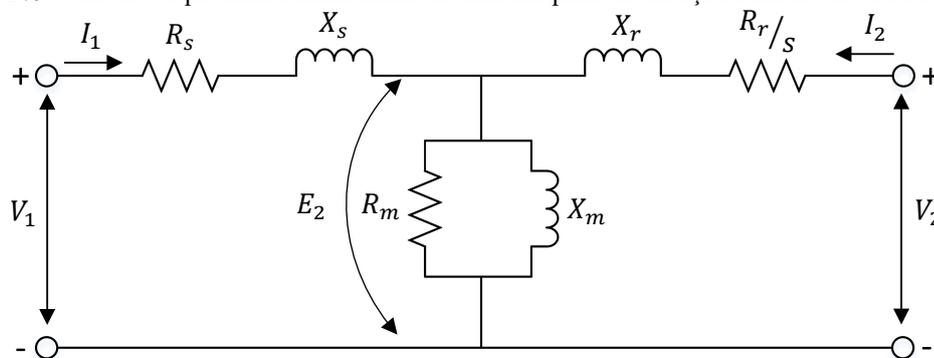
Fonte: (CHAPMAN, 2013).

B.4 Circuito equivalente

Uma maneira simples de representar os parâmetros elétricos de uma máquina de indução trifásica de rotor bobinado é por meio do chamado circuito equivalente. Esse circuito é obtido empregando-se a teoria de transformadores com as devidas modificações necessárias em virtude da rotação do rotor, uma vez que ocorrerá a variação de frequência nesse em função da velocidade, conforme já foi apresentado no item B.3.

Assim, considerando uma máquina com enrolamentos simétricos e balanceados (ABAD *et al.*, 2014), tem-se o circuito equivalente da máquina de indução, por fase, apresentado na Figura B.8.

Figura B.8 – Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução trifásica de rotor bobinado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

V_1 – Tensão nos terminais do estator.

I_1 – Corrente no enrolamento de estator.

R_s – Resistência do enrolamento de estator.

X_s – Reatância de dispersão do enrolamento de estator.

E_2 – Tensão sobre o ramo magnetizante.

R_m – Resistência representativa das perdas no ferro.

X_m – Reatância de magnetização.

X_r – Reatância de dispersão do enrolamento de rotor.

R_r – Resistência do enrolamento de rotor.

I_2 – Corrente no enrolamento de rotor.

V_2 – Tensão nos terminais do rotor.

Apêndice C – Características magnéticas da máquina de indução trifásica

No quadro C.1 são apresentados os valores das funções harmônicas magnéticas obtidas de forma experimental.

Quadro C.1 – Valores experimentais das funções harmônicas magnéticas.

(Continua...)

\overline{FM}	$F_1(\overline{FM})$	$F_3(\overline{FM})$
0	0	0
0,46079	0,10647	0,00003587
0,53173	0,12424	0,00002349
0,60444	0,14220	0,00003468
0,67288	0,15945	0,00002854
0,74501	0,17804	0,00005367
0,81686	0,19564	0,00004877
0,88835	0,21349	0,00004827
0,95746	0,23124	0,00006175
1,03146	0,24907	0,00004189
1,10422	0,26696	0,00007627
1,17415	0,28490	0,00008209
1,25511	0,30269	0,00009422
1,32641	0,32069	0,000116
1,39544	0,33796	0,00007774
1,47583	0,35580	0,000102
1,55145	0,37370	0,000137
1,62580	0,39158	0,000178
1,71568	0,40927	0,000247
1,79087	0,42707	0,000267
1,86623	0,44496	0,000360
1,95413	0,46204	0,000459
2,03010	0,47991	0,000511
2,12658	0,49748	0,000643
2,20755	0,51529	0,000762
2,30193	0,53296	0,000990
2,40881	0,55045	0,001233
2,51134	0,56790	0,001633
2,61893	0,58522	0,001886
2,72305	0,60216	0,002294
2,86018	0,61923	0,002808
3,00856	0,63613	0,003658

Fonte: Dados do autor.

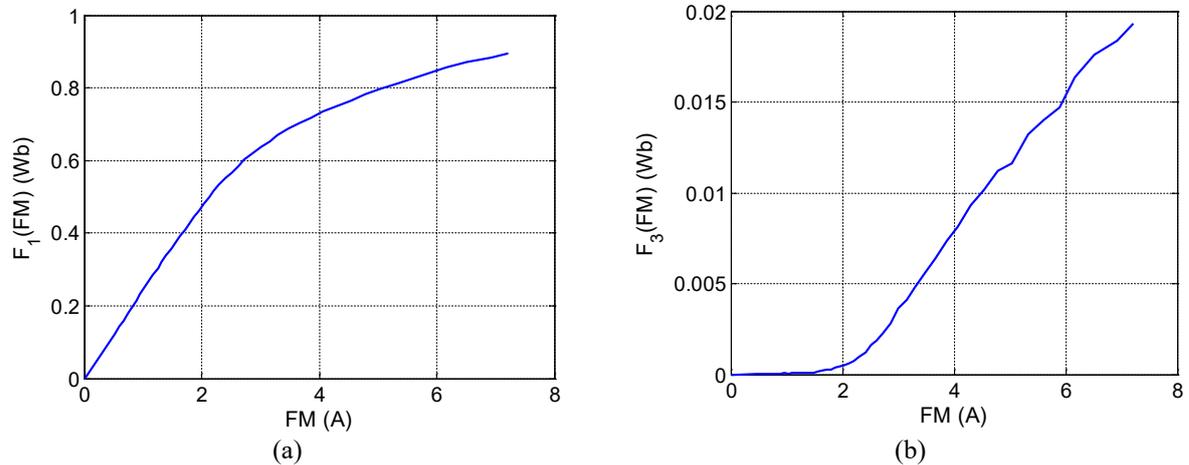
Quadro C.1 – Valores experimentais das funções harmônicas magnéticas.

(Conclusão.)

\overline{FM}	$F_1(\overline{FM})$	$F_3(\overline{FM})$
3,15235	0,65295	0,004083
3,29279	0,67005	0,004757
3,47572	0,68643	0,005544
3,66219	0,70270	0,006370
3,86725	0,71822	0,007365
4,06507	0,73443	0,008134
4,30892	0,74998	0,009307
4,53497	0,76573	0,010163
4,78505	0,78127	0,011206
5,03259	0,79680	0,011655
5,33087	0,81150	0,013195
5,60886	0,82599	0,014009
5,89755	0,84091	0,014720
6,17392	0,85635	0,016347
6,52042	0,87079	0,017582
6,91471	0,88370	0,018368
7,21159	0,89415	0,019299

Fonte: Dados do autor.

Figura C.1 – Curvas experimentais: (a) $F_1(\overline{FM}) \times \overline{FM}$; (b) $F_3(\overline{FM}) \times \overline{FM}$.



Fonte: Dados do autor.

Apêndice D – Determinação dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina de indução trifásica de rotor bobinado

A seguir é apresentada a metodologia empregada para a determinação dos parâmetros elétricos da máquina de indução trifásica de rotor bobinado, também conhecidos como parâmetros do circuito equivalente, e dos parâmetros mecânicos, sendo eles o coeficiente de atrito viscoso e o momento de inércia.

D.1 Determinação dos parâmetros do circuito equivalente

A determinação dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução trifásica de rotor bobinado é realizada por meio de ensaios prescritos na norma NBR 17094-3:2018, intitulada:

“Máquinas elétricas girantes – Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaios”

A norma supracitada foi elaborada pela Comissão de Estudo de Máquinas de Indução no Comitê Brasileiro de Eletricidade, passando a fazer parte, desde então, das coleções de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ABNT, 2018).

A norma técnica, seja ela qual for, quando utilizada de forma correta, possibilita a realização dos ensaios de maneira padronizada e segura tanto para aquelas pessoas que estejam os executando, quanto para as que se encontram próximas, além de garantir a integridade dos equipamentos empregados no estudo. Somado a isso, tem-se a obtenção de dados mais confiáveis e com maior exatidão, uma vez que as normas técnicas são constituídas por metodologias consolidadas a partir de resultados oriundos de pesquisas científicas, experiências acumuladas e das diversas tecnologias existentes (OLIVEIRA, 2018).

Os parâmetros do circuito equivalente são obtidos a partir dos dados de um ensaio para determinação da resistência do enrolamento de estator, um ensaio a vazio e um ensaio de impedância (ABNT, 2018).

No que tange ao primeiro ensaio, como o próprio nome já remete, é realizado para se obter a resistência de cada enrolamento de estator. Posteriormente, tem-se o ensaio a vazio, que

tem por objetivo a determinação das perdas por atrito, ventilação e do núcleo, sendo essa última perda empregada no último ensaio, denominado ensaio de impedância, em que são obtidos a reatância de estator e de rotor, a impedância do ramo magnetizante e a resistência de rotor.

Nesse sentido, são detalhados a seguir os procedimentos referentes a cada um desses ensaios, bem como os resultados obtidos para a máquina analisada.

D.1.1 Determinação das resistências dos enrolamentos de estator

Este primeiro ensaio consiste em determinar o valor da resistência de cada enrolamento de estator, R_s . Assim, a NBR 17094-3:2018 estabelece três diferentes métodos para essa finalidade, são eles:

- Emprego de ohmímetro de precisão.
- Método da tensão e corrente (queda de tensão).
- Método da ponte de Wheatstone e a de Kelvin.

Neste trabalho optou-se pelo método da tensão e corrente, que consiste na aplicação de tensão CC nos terminais dos enrolamentos de estator da máquina, de maneira que a corrente circulante não seja superior a 15% do valor nominal do enrolamento considerado.

Para determinar o valor máximo da tensão que pode ser aplicado em cada enrolamento de estator, de forma a respeitar o referido limite de corrente, foi utilizado, primeiramente, um multímetro digital com a função ohmímetro para estimar o valor da resistência.

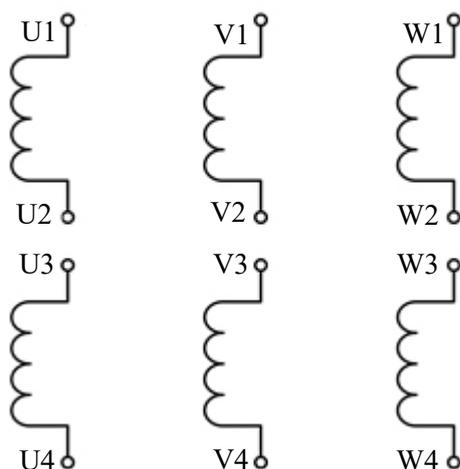
Na Tabela D.1 estão apresentados os valores de resistência obtidos com o emprego do multímetro. A máquina possui doze terminais, identificados conforme está mostrado na Figura D.1.

Tabela D.1 – Resistência dos enrolamentos de estator empregando-se multímetro digital.

Enrolamento	Resistência (Ω)
U1-U2	16,3
V1-V2	16,3
W1-W2	16,3
U3-U4	16,3
V3-V4	16,3
W3-W4	16,3
Média	16,3

Fonte: Dados do autor.

Figura D.1 – Identificação dos terminais dos enrolamentos de estator da MIRB analisada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse da resistência média dos enrolamentos, cujo valor é de $16,3 \Omega$, como está indicado na Tabela D.1 e, sabendo-se que, de acordo com o Quadro 4.2, a corrente máxima suportada por um enrolamento é de $1,12 \text{ Arms}$, ao se empregar a primeira Lei de Ohm, dada pela Equação (D.1), levando em consideração que a corrente máxima poderá ser de apenas 15% do valor suportado pelo enrolamento, obtém-se o valor da tensão máxima a ser aplicado, que é igual a $2,74 \text{ Vrms}$.

$$R = V \cdot I \quad (\text{D.1})$$

Onde:

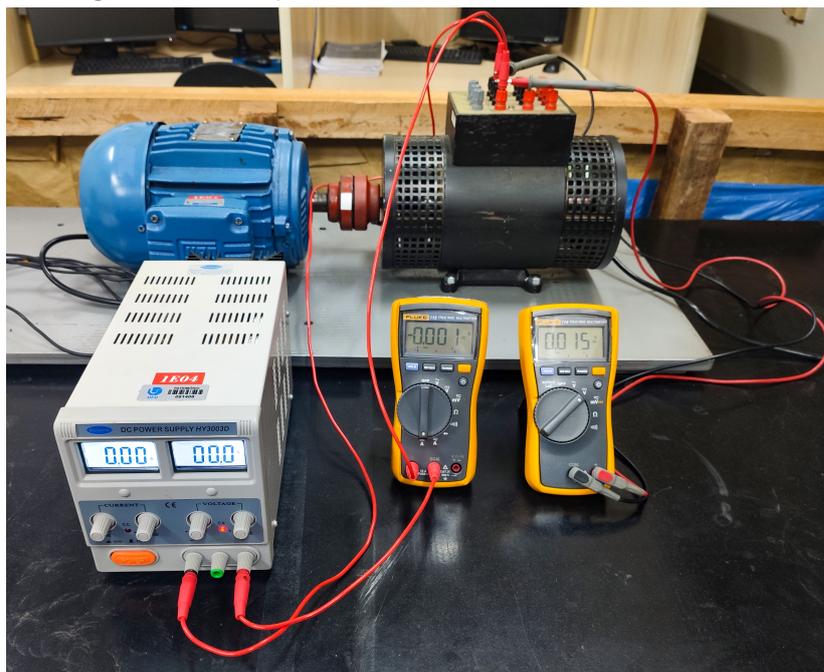
R – Resistência.

V – Tensão.

I – Corrente.

Concomitante à aplicação da tensão CC, devem ser mensurados os valores da corrente e temperatura. A leitura das tensões, assim como das correntes, foi realizada a partir de multímetros digitais, como está mostrado na Figura D.2, e, no que tange à temperatura, empregou-se um termopar. Por fim, por meio da Equação (D.1), a resistência é então calculada.

Figura D.2 – Medição da resistência dos enrolamentos de estator.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores obtidos de temperatura são utilizados na correção da resistência para a temperatura base de 25°C, como é recomendado pela NBR17094:3-2018. Para isso, é empregada a seguinte equação:

$$R_b = R_a \cdot \frac{(t_2 + k)}{(t_1 + k)} \quad (D.2)$$

Em que:

R_b – Resistência do enrolamento, corrigida para uma temperatura especificada t_2 .

t_2 – Temperatura especificada para correção do valor da resistência.

R_a – Resistência do enrolamento obtida no ensaio, à temperatura t_1 .

t_1 – Temperatura do enrolamento por ocasião da medição da resistência.

K – Constante igual a 234,5 para cobre eletrolítico com 100% de condutividade.

Dessa forma, para cada par de terminal, que representa um enrolamento, foram aplicados três níveis diferentes de tensão CC e mensurados os valores de tensão, corrente e temperatura. Na Tabela D.2 estão mostrados os valores das grandezas mensuradas, assim como as resistências calculadas na temperatura de ensaio.

Tabela D.2 – Medições realizadas no ensaio de determinação da resistência de estator.

Enrolamento	Tensão (VCC)	Corrente (ICC)	Temperatura (°C)	Resistência na temperatura de ensaio (Ω)
U1-U2	2,770	0,172	24	16,104
	2,020	0,126	24	16,031
	1,502	0,093	24	16,150
V1-V2	2,775	0,173	24	16,040
	2,002	0,124	24	16,145
	1,502	0,093	24	16,150
W1-W2	2,770	0,172	24	16,104
	2,001	0,124	24	16,137
	1,502	0,093	24	16,150
U3-U4	2,771	0,172	24	16,110
	2,006	0,125	24	16,048
	1,501	0,093	24	16,139
V3-V4	2,771	0,172	24	16,110
	2,004	0,125	24	16,032
	1,504	0,093	24	16,172
W3-W4	2,772	0,172	24	16,116
	2,004	0,125	24	16,032
	1,503	0,093	24	16,161

Fonte: Dados do autor.

Na Tabela D.3 estão apresentados os valores médios de resistência para cada um dos enrolamentos de estator referenciados à temperatura de 25°C. A correção da temperatura para uma mesma base permite que as resistências possam ser comparadas de forma adequada e, desse modo, verificar em caso de valores com grande discrepância, a existência de anormalidades, tais como: espiras em curto-circuito, número incorreto de espiras, dimensões incorretas dos condutores, conexões e contatos em más condições (ABNT, 2018).

Para a máquina analisada não foi constatado nenhum dos problemas citados anteriormente, uma vez que os valores de resistência obtidos se mantiveram próximos para cada um dos enrolamentos.

Tabela D.3 – Resistência média dos enrolamentos de estator obtidas pelo método da tensão e corrente, e referenciadas à temperatura de 25°C.

Enrolamento	Resistência (Ω)
U1-U2	16,220
V1-V2	16,237
W1-W2	16,256
U3-U4	16,224
V3-V4	16,229
W3-W4	16,228
Média	16,232

Fonte: Dados do autor.

D.1.2 Ensaio a vazio

Antes da realização do ensaio de impedância é necessário, para aplicação neste, a determinação da perda no ferro. Para isso, é realizado o ensaio a vazio, em que a máquina é operada como motor na tensão nominal e sem nenhum tipo de carga acoplada em seu eixo.

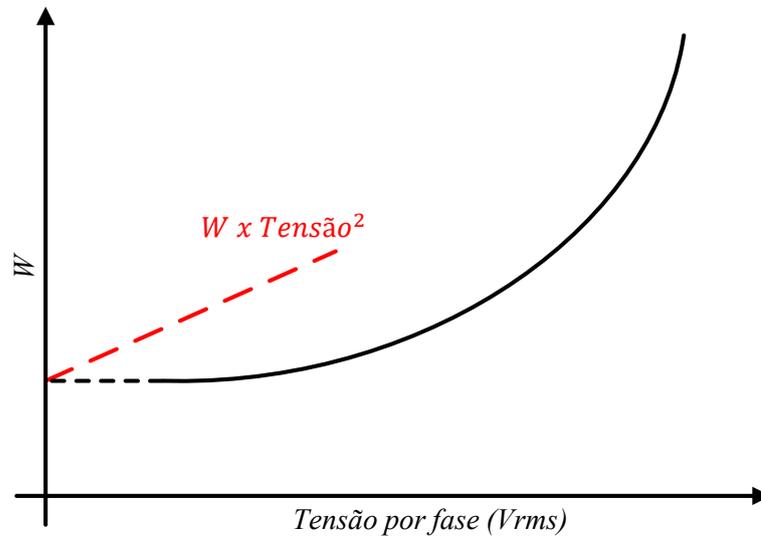
Contudo, como uma máquina de indução é composta por um mancal, que é um elemento de transmissão mecânica, pode ocorrer variação na perda por atrito até que este atinja uma condição de operação estabilizada. Essa condição pode ser monitorada por meio da potência ativa absorvida em vazio, a qual não deve variar mais do que 3% entre duas leituras sucessivas à mesma tensão, em intervalos de trinta minutos.

Nesse sentido, atingida a condição de operação descrita anteriormente, é realizada a leitura da potência ativa de entrada e da corrente para tensão nominal. Essa potência mensurada é o total de perdas da máquina operando como motor em vazio, sendo composta pelas perdas no ferro, por atrito, ventilação e no enrolamento do estator (I^2R – na temperatura deste ensaio).

Subtraindo da potência total de entrada a perda I^2R do estator, ter-se-á a parcela de perdas constituída pelas perdas no ferro e perdas por atrito e ventilação. Dessa forma, o próximo passo consiste na separação da perda no ferro e das perdas por atrito e ventilação. Para isso, é necessário um novo procedimento, que consiste em variar a tensão desde 110% da tensão nominal até o ponto onde a continuação da redução da tensão acarrete o aumento da corrente.

Feito isso, é traçado o gráfico da potência de entrada menos a perda I^2R do estator em função da tensão em valor eficaz, sendo estendida a curva obtida até a tensão zero, como está apresentado na Figura D.3. A interseção dessa curva com o eixo das ordenadas dará a perda por atrito e ventilação. Pode-se, ainda, para facilitar na determinação da interseção com mais precisão, traçar o mesmo gráfico em função do quadrado da tensão para os valores na faixa de menor tensão, conforme a reta em vermelho indicada na Figura D.3.

Figura D.3 – Gráfico W x Tensão por fase (Vrms).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

$$W = \text{Potência ativa de entrada} - I^2R \text{ do estator} \quad (\text{D.3})$$

Determinada a perda por atrito e ventilação, torna-se possível o cálculo da perda no ferro por meio da seguinte expressão:

$$P_h = P_{\text{vazio}} - I^2R \text{ do estator} - P_{AV} \quad (\text{D.4})$$

Em que:

P_h – Perda no ferro.

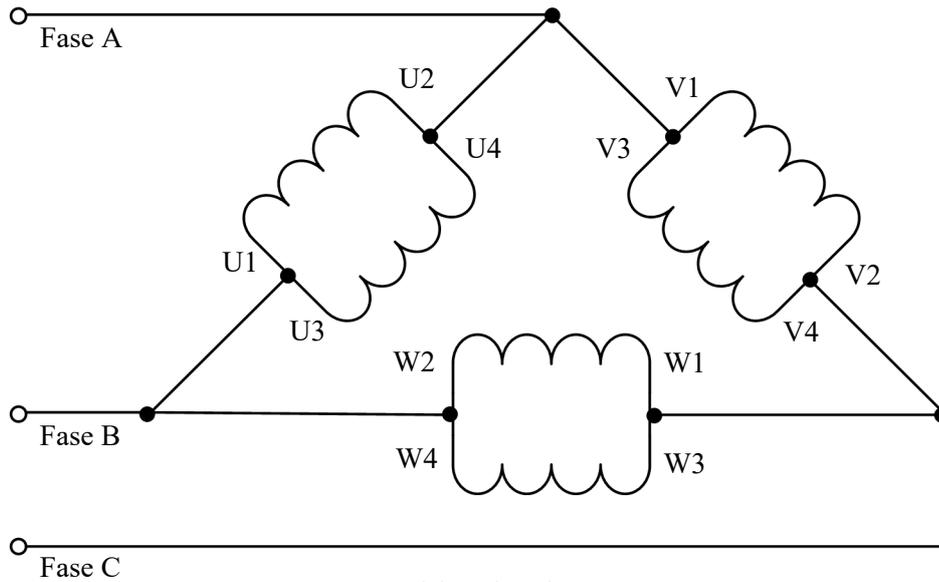
P_{vazio} – Potência ativa de entrada para operação a vazio com tensão nominal.

I^2R – Perda no enrolamento de estator para a operação em vazio com tensão nominal.

P_{AV} – Perda por atrito e ventilação.

Como já mencionado no Capítulo 4, os enrolamentos de estator da máquina são ligados em delta-paralelo, como está apresentado na Figura D.4. Dessa forma, a resistência equivalente de estator por fase a ser empregada nos cálculos é igual a 8,116 Ω .

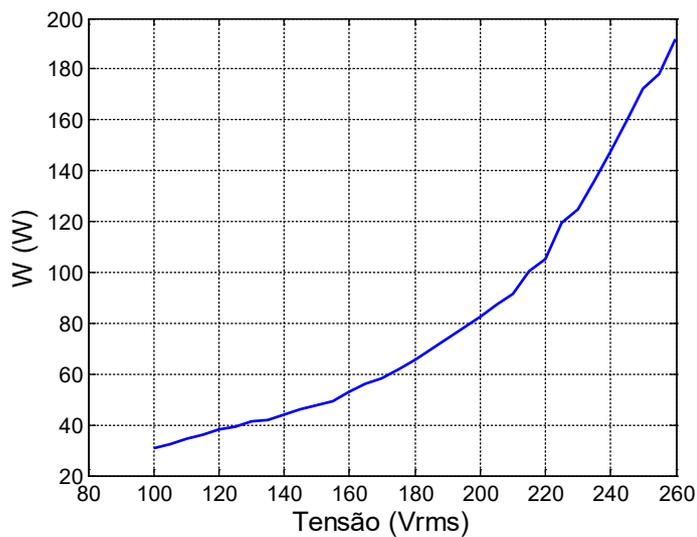
Figura D.4 – Ligação delta-paralelo dos enrolamentos de estator.



Fonte: Elaborado pelo autor.

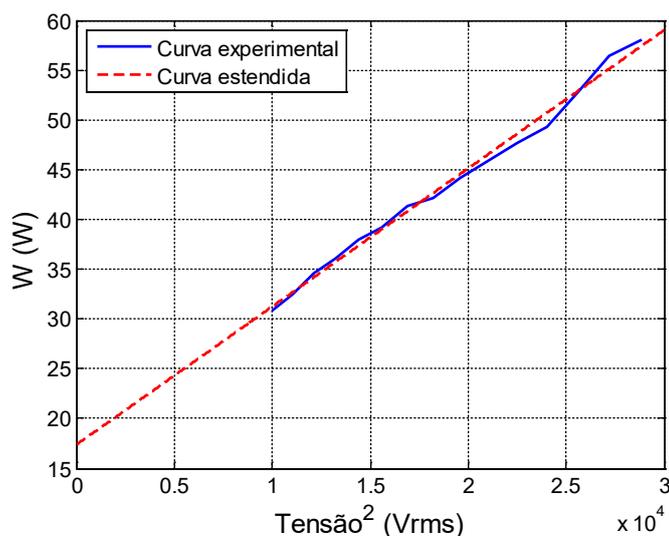
Na Figura D.5 está mostrada a curva experimental da potência resultante dada pela Equação (D.3) em função da tensão de alimentação. Para facilitar a determinação da interseção da respectiva curva com o eixo da ordenada, traçou-se a curva da potência resultante em função do quadrado da tensão, Figura D.6. Nesse sentido, o valor obtido para as perdas por atrito e ventilação, ou seja, da interseção com o eixo das ordenadas, foi de 17,315 W.

Figura D.5 – Gráfico W x Tensão por fase (Vrms).



Fonte: Dados do autor.

Figura D.6 – Gráfico W x Tensão ao quadrado por fase (Vrms).



Fonte: Dados do autor.

Os dados mensurados no ensaio a vazio estão apresentados na Tabela D.4.

Tabela D.4 – Leituras obtidas durante o ensaio a vazio.

Grandeza	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Tensão (Vrms)	219,97	219,97	219,97	219,97
Corrente (Arms)	3,61	3,68	3,66	3,65
Potência de entrada (W)	70	80	70	-
Fator de potência	0,15	0,16	0,15	0,153
Temperatura (°C)	71			

Fonte: Dados do autor.

Corrigindo o valor da resistência equivalente de estator ($8,116 \Omega$) para a temperatura do ensaio a vazio (71°C), obtém-se um valor de $9,554 \Omega$, que, substituído na Equação (D.4), juntamente com os valores de corrente e potência mensurados no respectivo ensaio, assim como as perdas por atrito e ventilação obtidas anteriormente, permite determinar a perda no ferro.

De forma analítica, tem-se:

$$P_h = 220 - 3 \cdot \left(\frac{3,65}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 9,554 - 17,315 = 75,402W$$

D.1.3 Ensaio de impedância

Para obter a resistência de rotor, a reatância de dispersão de estator e de rotor, a reatância de magnetização e a resistência referente à perda no ferro, é necessário a realização de um ensaio de impedância. Nesse sentido, a NBR 17094-3:2018 estabelece quatro diferentes métodos de ensaio para determinar os dados de impedância, sendo eles:

- Método 1 – Ensaio de determinação da impedância com rotor bloqueado em uma frequência inferior ou igual a 25% da frequência nominal e à corrente nominal.
- Método 2 – Ensaio de determinação da impedância com rotor bloqueado em pelo menos três frequências: à frequência nominal, a uma frequência próxima a 50% da nominal e a uma frequência inferior ou igual a 25% da nominal, todos à corrente nominal. Curvas devem ser obtidas destes três ensaios e utilizadas para determinar os valores da reatância total e da resistência rotórica na frequência reduzida requerida.
- Método 3 – Ensaio de determinação da impedância para um escorregamento que produza aproximadamente a frequência reduzida do rotor quando em carga nominal. Neste método, o motor funciona em vazio ou acoplado à carga reduzida, e a tensão é reduzida para obter aproximadamente o escorregamento nominal.
- Método 4 – Quando nenhum dos métodos anteriores é prático, o seguinte ensaio deve ser utilizado: um ensaio de determinação da impedância com rotor bloqueado à frequência nominal, tensão reduzida resultando aproximadamente na corrente nominal e um ensaio em carga.

O Método 4 foi empregado em razão da frequência mínima disponível pela fonte programável ser de 40 Hz, impossibilitando, portanto, a aplicação dos Métodos 1 e 2, e por erros na estimação dos parâmetros envolvendo o Método 3, conforme é exposto por Siraki (2012).

Segundo a NBR 17094-3:2018, em máquinas de indução com rotor bobinado, a impedância varia com a posição do rotor relativa ao estator. Dessa forma, uma estratégia, que consiste no bloqueio do rotor em várias posições, deve ser adotada para a estimação da impedância. Em cada posição em que o rotor é bloqueado, a tensão imposta deve ser aumentada gradualmente até que a corrente de valor aproximadamente ao valor nominal seja obtida. Neste

momento, as tensões e os valores mínimo e máximo de corrente, durante um ciclo, devem ser registrados para cada uma das fases.

Por fim, o rotor deve ser bloqueado para o ensaio de impedância na posição que resulta em uma corrente igual à média dos valores mínimo e máximo anteriormente anotados.

Na Tabela D.5 estão apresentados os valores das grandezas mensuradas na posição do rotor que mais se aproximou da referida condição.

Tabela D.5 – Leituras obtidas durante o ensaio de rotor bloqueado.

Grandeza	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Tensão (Vrms)	50,23	50,23	50,23	50,23
Corrente (Arms)	3,89	3,89	3,86	3,88
Potência de entrada (W)	90	90	90	-
Fator de potência	0,81	0,81	0,81	0,81
Temperatura (°C)	27			

Fonte: Dados do autor.

Empregando as leituras obtidas durante o ensaio a vazio, Tabela D.4, e no ensaio de rotor bloqueado, Tabela D.5, no equacionamento que é apresentado a seguir, são obtidas as reatâncias de dispersão do estator e do rotor, X_s e X_r respectivamente, assim como os parâmetros do ramo magnetizante, ou seja, a reatância de magnetização e a resistência referente à perda no ferro, X_m e R_m respectivamente.

Para isso, é realizado, primeiramente, o cálculo da potência reativa trifásica referente ao ensaio a vazio e de rotor bloqueado por meio das Equações (D.5) e (D.6), respectivamente.

$$Q_o = \sqrt{(m \cdot V_o \cdot I_o)^2 - P_o} \quad (D.5)$$

$$Q_L = \sqrt{(m \cdot V_L \cdot I_L)^2 - P_L} \quad (C.6)$$

Onde:

Q_o – Potência reativa trifásica para o ensaio a vazio, em valor eficaz.

V_o – Tensão de fase do ensaio a vazio, em valor eficaz.

I_o – Corrente de fase do ensaio a vazio, em valor eficaz.

P_o – Potência ativa trifásica para o ensaio a vazio, em valor eficaz.

m – Número de fases da máquina analisada.

Q_L – Potência reativa trifásica para o ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz.

V_L – Tensão de fase do ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz.

I_L – Corrente de fase do ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz.

P_L – Potência ativa trifásica para o ensaio de rotor bloqueado, em valor eficaz.

Substituindo nas equações anteriores os valores das grandezas apresentados nas Tabelas D.4 e D.5, tem-se:

$$Q_o = \sqrt{\left(3 \cdot 219,97 \cdot 3,65 / \sqrt{3}\right)^2 - 220^2} = 1373,135 \text{ VAr}$$

$$Q_L = \sqrt{\left(3 \cdot 50,23 \cdot 3,88 / \sqrt{3}\right)^2 - 270^2} = 202,606 \text{ VAr}$$

Em seguida, os valores das potências reativas encontrados são empregados nas Equações (D.7) e (D.8) para o cálculo da reatância de magnetização e da reatância do estator. Inicialmente, é adotado um valor arbitrário para a reatância de dispersão de estator e para a relação X_s/X_m . Além disso, é considerado no presente trabalho que a razão entre a reatância de dispersão de estator e a de rotor é igual a 1 ($X_s/X_r = 1$).

$$X_m = \frac{m \cdot V_o^2}{Q_o - (m \cdot I_o^2 \cdot X_s)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_s}{X_m}\right)^2} \quad (\text{D.7})$$

$$X_s = \frac{Q_L}{m \cdot I_L^2 \cdot \left(1 + \frac{X_s}{X_r} + \frac{X_s}{X_m}\right)} \cdot \left(\frac{X_s}{X_r} + \frac{X_s}{X_m}\right) \quad (\text{D.8})$$

Os novos valores calculados de X_m e X_s são novamente substituídos nas Equações (D.7) e (D.8), dando forma a um processo iterativo, que se encerra quando valores estáveis para essas duas grandezas são obtidos com um erro de 0,1%.

Para a máquina analisada foram obtidos os seguintes valores estáveis:

$$X_m = 98,963 \Omega$$

$$X_s = 6,958 \Omega$$

No que tange à reatância de dispersão de rotor, essa é determinada a partir da Equação (D.9), empregando-se a relação de X_s/X_r que foi adotada em (D.7) e (D.8), e a reatância de dispersão de estator calculada anteriormente.

$$X_r = \frac{X_s}{\frac{X_s}{X_r}} \quad (D.9)$$

Substituindo os respectivos valores na equação anterior, obtém-se:

$$X_r = \frac{6,958}{1} = 6,958 \Omega$$

Para determinar a resistência de rotor é utilizada a seguinte expressão:

$$R_r = \left(\frac{P_L}{m \cdot I_L^2} - R_s \right) \cdot \left(1 + \frac{X_r}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X_r}{X_s} \right)^2 \cdot (G_m \cdot X_s^2) \quad (D.10)$$

Em que G_m é a condutância elétrica referente à perda no ferro, que pode ser obtida pela seguinte equação:

$$G_m = \frac{P_h}{m \cdot V_o^2} \cdot \left(1 + \frac{X_s}{X_m} \right)^2 \quad (D.11)$$

Substituindo os respectivos valores na equação anterior, tem-se:

$$G_m = \frac{75,402}{3 \cdot 50,23^2} \cdot \left(1 + \frac{6,958}{98,963} \right)^2 = 0,595 \text{ mS}$$

Logo, corrigindo a resistência do estator e a condutância elétrica referente à perda no ferro para a temperatura do ensaio de rotor bloqueado e substituindo os valores apropriados na Equação (D.10), obtém-se a resistência de rotor:

$$R_r = \left[\frac{270}{3 \cdot \left(3,88/\sqrt{3}\right)^2} - 8,178 \right] \cdot \left(1 + \frac{6,958}{98,963}\right)^2 - \left(\frac{6,958}{6,958}\right)^2 \cdot (G_m \cdot 6,958^2)$$

$$R_r = 11,179 - (0,695 \cdot 10^{-3} \cdot 6,958^2) = 11,145 \Omega$$

Por último, sabendo que a resistência é o inverso da condutância, ou seja,

$$R_m = \frac{1}{G_m}, \quad (D.12)$$

torna-se possível determinar a resistência relacionada à perda no ferro:

$$R_m = \frac{1}{0,595 \cdot 10^{-3}} = 1680,672 \Omega.$$

Na Tabela D.6 estão apresentados todos os parâmetros do circuito equivalente calculados, estando as resistências referidas à temperatura base de 25 °C.

Tabela D.6 – Parâmetros do circuito equivalente referenciados à temperatura de 25°C.

Grandeza	Valor
R_s	8,116 Ω
R_r	11,059 Ω
X_s	6,958 Ω
X_r	6,958 Ω
R_m	1427,608 Ω
X_m	98,963 Ω

Fonte: Dados do autor.

D.2 Determinação dos parâmetros mecânicos

Esta seção apresenta as metodologias utilizadas na obtenção dos parâmetros mecânicos da máquina de indução trifásica de rotor bobinado e os resultados obtidos. Esses parâmetros se resumem no coeficiente de atrito viscoso e no momento de inércia, que integram as equações responsáveis por descrever o comportamento dinâmico da MIRB seja como gerador, como também quando acionada como motor. Tais equações são dadas por (2.89) e (2.90), respectivamente, e são empregadas nas metodologias que serão apresentadas a seguir, para determinar os parâmetros supramencionados.

D.2.1 Determinação do coeficiente de atrito viscoso

O atrito viscoso advém da presença de fluidos lubrificantes em escoamento linear (CORREIA, 2014), ou seja, um fluido que, quando dividido em camadas e em movimento, apresenta velocidade aproximadamente constante em cada região. Essas substâncias são muito empregadas em máquinas elétricas rotativas com a finalidade de evitar o atrito entre o eixo e a parte metálica do mancal, o que acarretaria na elevação de temperatura e, conseqüentemente, danificando o equipamento.

A determinação do coeficiente de atrito viscoso, D , grandeza responsável por quantificar a resistência que o fluido lubrificante oferece à um dado corpo, é realizada a partir do método apresentado por Correia (2014). Para compreendê-lo, antes de tudo, considera-se a máquina de indução de rotor bobinado operando como motor, sendo (2.90) a equação dinâmica que rege seu funcionamento para essa condição. Nesse sentido, na hipótese de o motor estar operando sem carga, ou seja, a vazio, e considerando a análise em regime permanente, a Equação (2.90) se resume a:

$$T_m = D \cdot \omega_R \quad (D.16)$$

Dessa maneira, analisando (D.16), fica evidenciado que o conjugado desenvolvido pelo motor é responsável por vencer apenas o atrito viscoso nessa condição de operação. A esse conjugado dá-se o nome de conjugado resistente ou resistivo, T_r , o qual pode ser substituído na Equação (D.16), resultando, assim, na Equação (D.17).

$$T_r = D \cdot \omega_R \quad (D.17)$$

Segundo Correia (2014), o conjugado resistente também pode ser obtido por meio da seguinte expressão:

$$T_r = \frac{P_{atrito}}{\omega_R} \quad (D.18)$$

Onde:

P_{atrito} – Perdas por atrito.

Com isso, substituindo (D.18) em (D.17) e posteriormente isolando o termo do coeficiente de atrito viscoso, chega-se a:

$$D = \frac{P_{atrito}}{\omega_r^2} \quad (D.19)$$

Por ser uma máquina de pequeno porte que está sendo analisada no presente trabalho, não foi realizada aqui a distinção entre a perda por atrito e por ventilação. Dessa forma, o somatório de ambas as perdas, que foi obtido em D.1.2, é empregado como sendo as perdas por atrito na Equação (D.19). A velocidade mensurada por meio do tacômetro digital para o ensaio a vazio foi de 1793 rpm, o que equivale a 187,762 rad/s. Diante disso, substituindo os respectivos valores em (D.19), obtém-se a estimativa para o coeficiente de atrito viscoso:

$$D = \frac{17,315}{(187,762)^2} = 0,491 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

D.2.2 Determinação do momento de inércia

O momento de inércia é uma grandeza que caracteriza a resistência que um dado corpo oferece à mudança de seu movimento de rotação em torno de um eixo (MAMEDE, 2017). Por

isso, desempenha um papel fundamental na análise de máquinas elétricas rotativas, tal como a de indução. Tanto na operação como motor quanto gerador, o momento de inércia está presente nas equações dinâmicas responsáveis por descrever seus funcionamentos, como pode ser constatado nas Equações (D.13) e (D.14).

O procedimento aqui adotado para a obtenção do momento de inércia se baseia em uma metodologia apresentada por Lekurwale *et al.* (2012). Inicialmente, a máquina de rotor bobinado é acoplada à máquina primária, visto que o momento de inércia a ser determinado é aquele correspondente a todo o sistema.

Realizado o acoplamento, a MIRB é acionada como motor à tensão nominal. Neste instante é registrada a velocidade do rotor, tendo sido obtido um valor de 1784 rpm. Logo em seguida, a alimentação é interrompida e, concomitante a isso, é mensurado, com um cronômetro, o tempo gasto entre a interrupção da alimentação e a parada total do rotor. Para maior exatidão, esse processo de desenergização e cronometragem do tempo de parada foi realizado cinco vezes, como está mostrado na Tabela D.7, tendo sido obtido o tempo médio de 2,74 segundos.

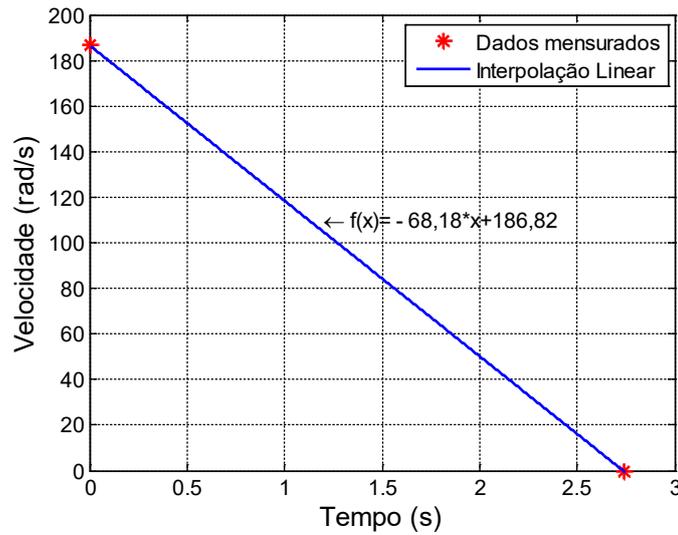
Tabela D.7 – Tempo necessário para a parada completa do eixo da MIRB após o processo de desenergização.

Medição	Tempo (s)
1	2,73
2	2,74
3	2,74
4	2,74
5	2,75
Média	2,74

Fonte: Dados do autor.

Com os dois pontos obtidos, ou seja, aquele em que a máquina está operando com tensão nominal, designado de instante $t = 0$ segundos, cuja velocidade registrada foi de 1784 rpm, e o outro quando o rotor encontra-se totalmente parado após a interrupção da alimentação, instante $t = 2,74$ segundos; é traçado o gráfico da velocidade em rad/s em função do tempo, empregando-se, para isso, interpolação linear entre esses pontos, como está apresentado na Figura D.7.

Figura D.7 – Gráfico da velocidade angular do motor em função do tempo.



Fonte: Dados do autor.

O decaimento da velocidade é considerado linear em virtude da máquina primária, de maior potência, manter a velocidade do eixo aproximadamente constante durante a operação da MIRB como gerador e por não serem analisadas aqui situações em que haja variações bruscas de velocidade, tendo assim, o momento de inércia, pouca influência durante a análise computacional, conclusão obtida a partir da análise da Equação (D.13). No caso em que se deseja efetuar estudos relacionados à variação de velocidade em um dado intervalo, é recomendado o emprego de encoder para a obtenção da curva apresentada na Figura D.7, pois, dessa maneira, é possível obter a velocidade em diversos instantes de tempo e, assim, obter uma curva mais fidedigna.

A equação da reta que interpola os pontos em vermelho na Figura D.7 pode ser expressa da forma:

$$Velocidade (tempo) = -68,18 \cdot tempo + 186,82 \quad (D.20)$$

Por conseguinte, o momento de inércia pode, então, ser obtido por meio da seguinte equação:

$$J = \frac{P_m}{\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot n_m \cdot \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\omega=\omega_m}} \quad (D.21)$$

Onde:

P_m – Perdas mecânicas em Watts.

n_m – Velocidade mecânica nominal, em rpm.

ω_m – Velocidade mecânica nominal, em rad/s.

Substituindo em (D.21) a velocidade nominal de 1750 rpm, o valor das perdas mecânicas obtidas em D.1.2 e a derivada da Equação (D.20), obtém-se uma aproximação para o momento de inércia do sistema:

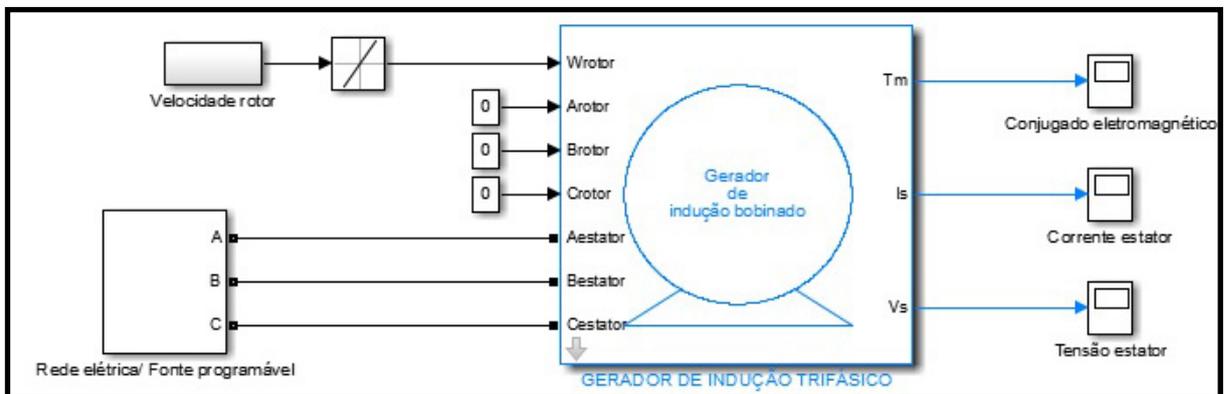
$$J = \frac{17,315}{\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot 1750 \cdot 68,18}$$

$$J = 13,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Apêndice E – Implementação computacional no MATLAB®

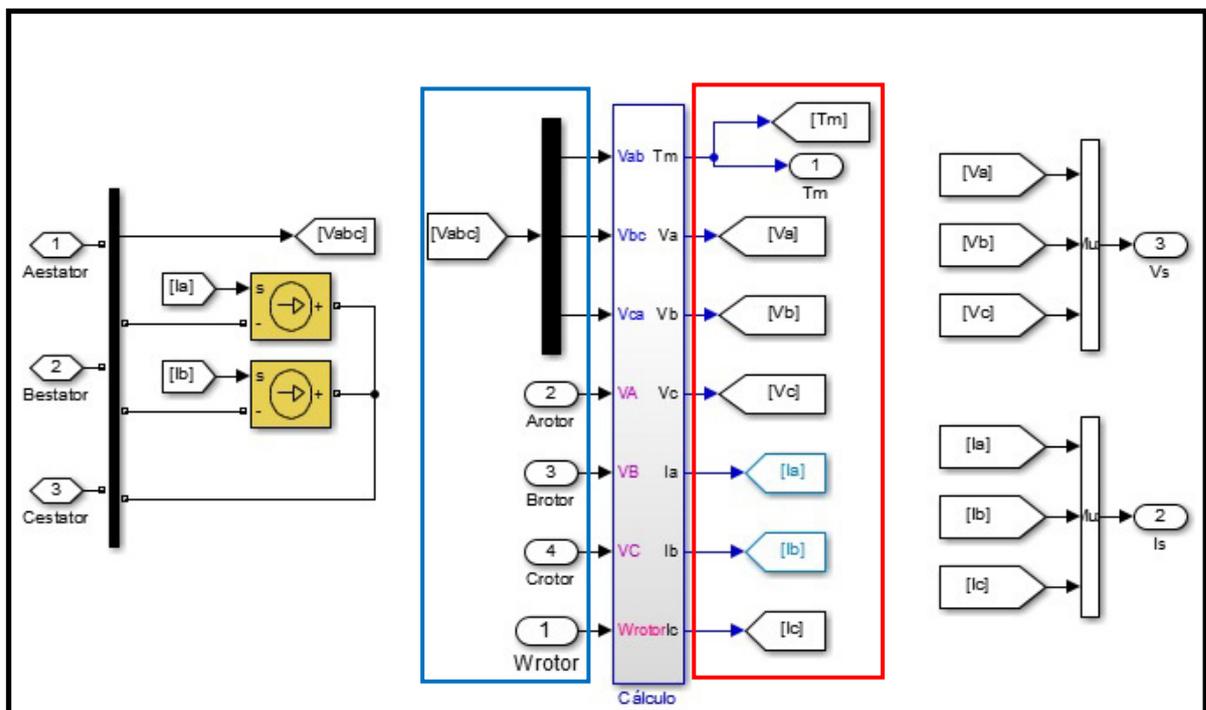
A seguir é mostrada a estrutura da simulação computacional implementada no *software* MATLAB® da modelagem da máquina de indução trifásica apresentada no Capítulo 2. Primeiramente, na Figura E.1, tem-se o sistema do gerador de indução trifásico, possuindo como parâmetros de entrada: a velocidade do rotor, a tensão no rotor e a tensão no estator. Como variáveis de saída, tem-se: o conjugado eletromagnético, a corrente e a tensão de estator.

Figura E.1 – Estrutura principal da simulação computacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura E.2 – Subsistema “Gerador de Indução Trifásico”.

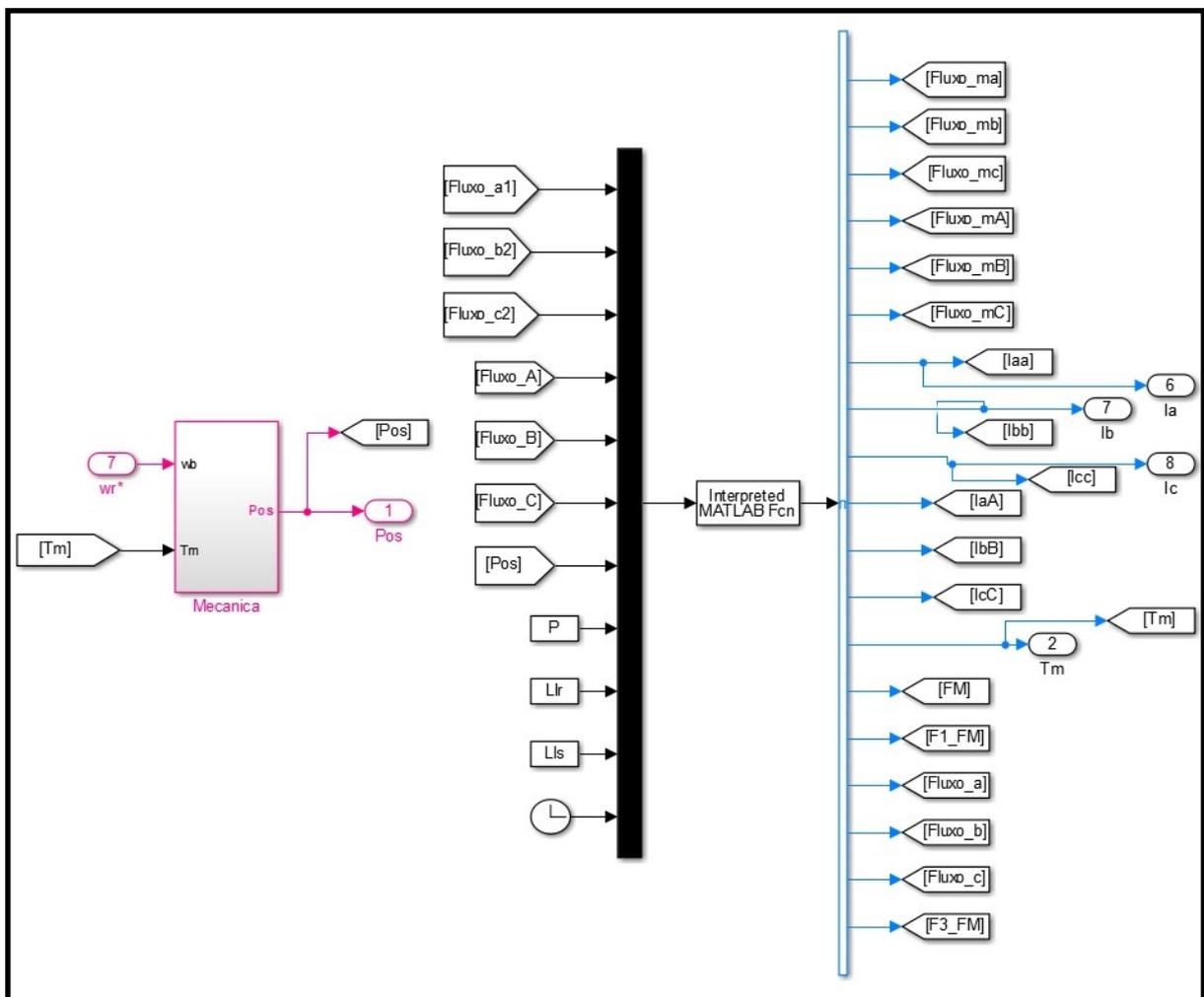


Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura do subsistema “Gerador de Indução Trifásico” está exposta na Figura E.2, em que se pode identificar melhor os parâmetros de entrada (em azul) e os parâmetros calculados (em vermelho).

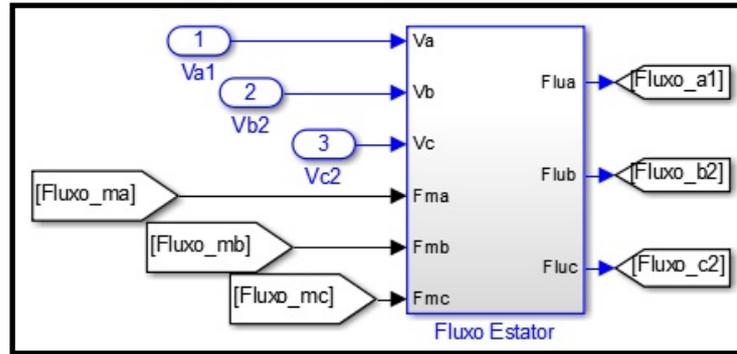
O subsistema “Cálculo” é formado pelas estruturas apresentadas nas Figuras E.3-E.6. O subsistema “Fluxo Estator”, Figura E.4, é responsável pelo cálculo do fluxo magnético de estator, enquanto no subsistema “Fluxo Rotor”, Figura E.5, é calculado o fluxo magnético de rotor. No subsistema “Tensões”, Figura E.6, são calculadas as tensões de fase de estator.

Figura E.3 – Subsistema “Cálculo”.



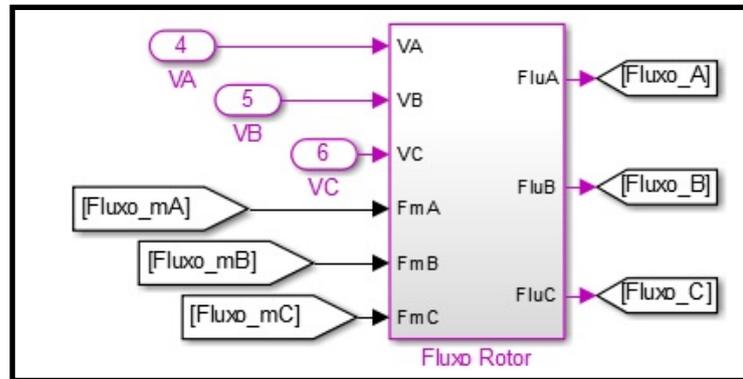
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura E.4 – Subsistema “Fluxo Estator”.



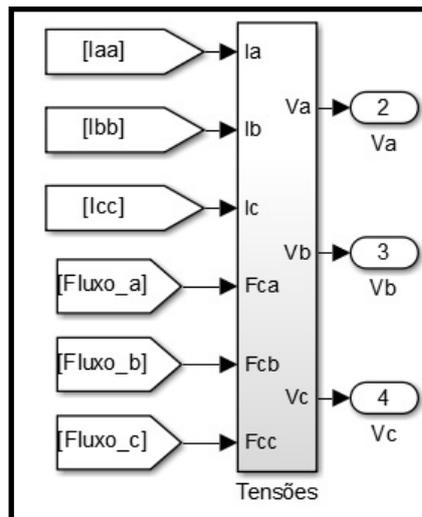
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura E.5 – Subsistema “Fluxo Rotor”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

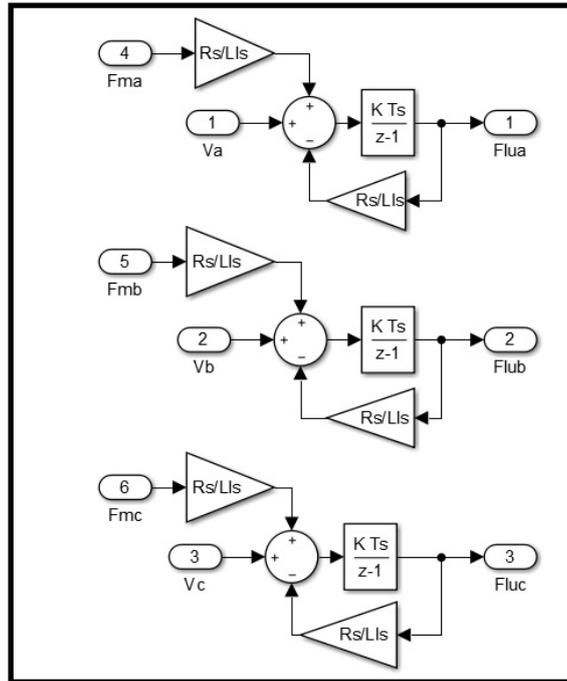
Figura E.6 – Subsistema “Tensões”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

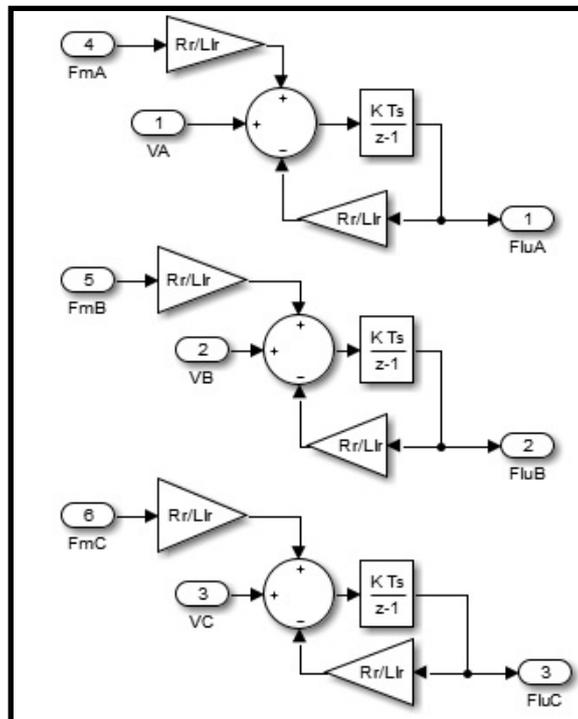
Os cálculos realizados nos subsistemas das Figuras E4-E6 estão expostos, respectivamente, nas Figuras E.7-E.9.

Figura E.7 – Estrutura de cálculo do subsistema “Fluxo Estator”.



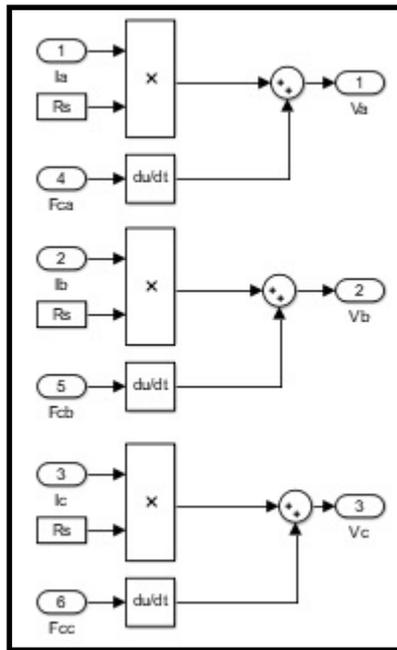
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura E.8 – Estrutura de cálculo do subsistema “Fluxo Rotor”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

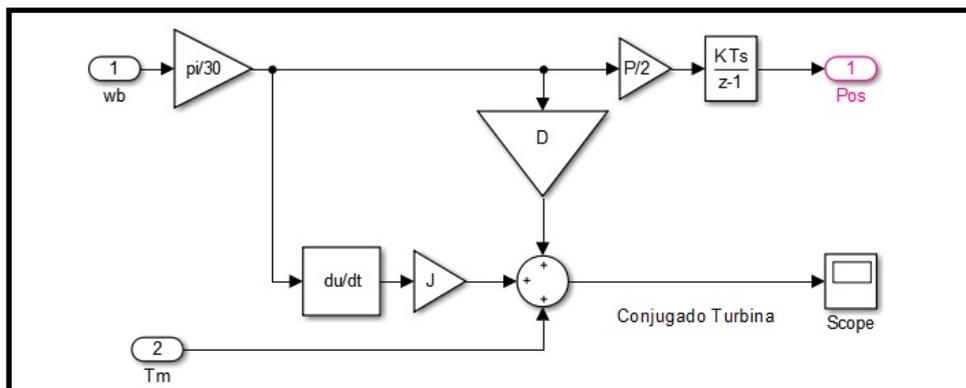
Figura E.9 – Estrutura de cálculo do subsistema “Tensões”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os cálculos realizados no subsistema “Mecânica”, o qual pode ser visualizado na Figura E.3, estão mostrados a seguir.

Figura E.10 – Estrutura de cálculo do subsistema “Mecânica”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O código presente na função “*Interpreted MATLAB Function*”, função essa que pode ser observada na Figura E.3, está apresentado adiante.

```
function retorno = f(parametro_entrada)

fluxo_a = parametro_entrada(1);
fluxo_b = parametro_entrada(2);
```

```

fluxo_c = parametro_entrada(3);
fluxo_A = parametro_entrada(4);
fluxo_B = parametro_entrada(5);
fluxo_C = parametro_entrada(6);
Pos = parametro_entrada(7);
p = parametro_entrada(8);
Llr = parametro_entrada(9);
Lls = parametro_entrada(10);
t = parametro_entrada(11);

% Dados das características magnéticas
Str1 = sprintf('load FFF.txt');
eval(Str1);

fm = FFF(:,1)';
ffm = FFF(:,2)';
ffm3 = FFF(:,3)';

% Cálculo da constante A relativa à reta
A = 1.5*(1/Lls+1/Llr);

% Função fr
FR = fluxo_a/Lls + (fluxo_b*cos(2*pi/3))/Lls + (fluxo_c*cos(-2*pi/3))/Lls
+ ...
(fluxo_A*cos(Pos))/Llr + (fluxo_B*cos(Pos+2*pi/3))/Llr +
(fluxo_C*cos(Pos-2*pi/3))/Llr;

% Função fi
FI = (fluxo_b*sin(2*pi/3))/Lls + (fluxo_c*sin(-2*pi/3))/Lls + ...
(fluxo_A*sin(Pos))/Llr + (fluxo_B*sin(Pos+2*pi/3))/Llr +
(fluxo_C*sin(Pos-2*pi/3))/Llr;

alfa = angle(FR+FI*1i);
Fluxo = abs(FR+FI*1i);

% Intersceção da curva F1 com a reta
if Fluxo <= 0.001 %Verifica se o concatenamento de fluxo magnetizante é
zero
    FM = 0.0;
    FFM = 0.001;
else
    Coeficientes_fundamental = polyfit(fm, ffm, 7);
    Aux = Coeficientes_fundamental;
    Aux(length(Coeficientes_fundamental)) =
Coeficientes_fundamental(length(Coeficientes_fundamental)) - Fluxo/A;
    Aux(length(Coeficientes_fundamental)-1) =
Coeficientes_fundamental(length(Coeficientes_fundamental)-1) + 1/A;
    Valor_Maximo_FM = max(fm);
    rAux = roots(Aux);

```

```

Raiz = find(~imag(rAux) & rAux <Valor_Maximo_FM & rAux >= 0.00);
FM = rAux(Raiz(length(Raiz)));
FFM = (Fluxo - FM)/A;
end

%Interpolação de F3(FM) a partir de F1(FM), obtida pelo cruzamento da reta
%com a curva de magnetização
FFM3 = interp1(ffm, ffm3, FFM);

% Calculos dos fluxos magnetizantes
fluxo_ma = FFM*cos(alfa) + FFM3*cos(3*alfa);
fluxo_mb = FFM*cos(alfa - 2*pi/3) + FFM3*cos(3*alfa);
fluxo_mc = FFM*cos(alfa + 2*pi/3) + FFM3*cos(3*alfa);

fluxo_mA = FFM*cos(alfa - Pos) + FFM3*cos(3*alfa - 3*Pos);
fluxo_mB = FFM*cos(alfa - Pos - 2*pi/3) + FFM3*cos(3*alfa - 3*Pos);
fluxo_mC = FFM*cos(alfa - Pos + 2*pi/3) + FFM3*cos(3*alfa - 3*Pos);

%Correntes estator
ia = (fluxo_a - fluxo_ma)/Lls;
ib = (fluxo_b - fluxo_mb)/Lls;
ic = (fluxo_c - fluxo_mc)/Lls;

%Correntes rotor
iA = (fluxo_A - fluxo_mA)/Llr;
iB = (fluxo_B - fluxo_mB)/Llr;
iC = (fluxo_C - fluxo_mC)/Llr;

%Fluxo de estator
fluxo_a = (fluxo_ma + Lls*ia);
fluxo_b = (fluxo_mb + Lls*ib);
fluxo_c = (fluxo_mc + Lls*ic);

%Conjugado eletromagnético
Tm = -(FFM*p/2 * (iA*sin(alfa - Pos) + iB*sin(alfa - Pos - 2*pi/3) + ...
    iC*sin(alfa - Pos - 4*pi/3)) + ...
    3*FFM3*p/2 * (iA*sin(3*(alfa - Pos)) + ...
    iB*sin(3*(alfa - Pos - 2*pi/3)) + ...
    iC*sin(3*(alfa - Pos - 4*pi/3)) ...
));

%Variáveis que irão retornar para o Simulink
retorno = [fluxo_ma fluxo_mb fluxo_mc fluxo_mA fluxo_mB fluxo_mC ia ib ic
iA iB iC Tm FM FFM fluxo_a fluxo_b fluxo_c FFM3];

```