



**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DO MOTOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO A
DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO SOB O PONTO DE
VISTA DE CONJUGADO E RENDIMENTO**

DANTE LUIZ DA ROS HOLLANDA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRASÍLIA, OUTUBRO DE 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DO MOTOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO A
DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO SOB O PONTO DE
VISTA DE CONJUGADO E RENDIMENTO**

DANTE LUIZ DA ROS HOLLANDA

ORIENTADOR: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM – 498/12

BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2012

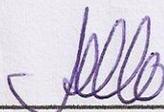
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL DO MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO SUBMETIDO A DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO SOB
O PONTO DE VISTA DE CONJUGADO E RENDIMENTO**

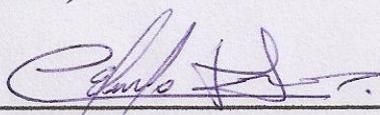
DANTE LUIZ DA ROS HOLLANDA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRÁSILIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

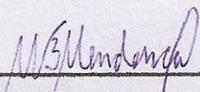
APROVADA POR:



Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, Dr. (ENE-UnB)
(Orientador)



Prof. Carlos Eduardo Tavares, Dr. (FEELT-UFU)
(Examinador Externo)



Prof. Marcus Vinícius Borges Mendonça, Dr. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

FICHA CATALOGRÁFICA

HOLLANDA, DANTE LUIZ DA ROS

Análise Comportamental do Motor de Indução Trifásico Submetido a Desequilíbrios de Tensão sob o Ponto de Vista de Conjugado e Rendimento [Distrito Federal] (2012).

xv, 89p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, 70910-900, Brasília, DF, Brasil).

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Motor de Indução Trifásico | 2. Fator de desequilíbrio de tensão |
| 3. Modelagem de motores | 4. Tensão de sequência positiva |
| 5. Conjugado | 6. Rendimento |
| 7. Média das amplitudes das tensões | |
| I. Engenharia Elétrica/FT/UnB | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HOLLANDA, D. L. R. (2012). Análise Comportamental do Motor de Indução Trifásico Submetido a Desequilíbrios de Tensão sob o Ponto de Vista de Conjugado e Rendimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM 498/12, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Dante Luiz Da Ros Hollanda.

TÍTULO: Análise Comportamental do Motor de Indução Trifásico Submetido a Desequilíbrios de Tensão sob o Ponto de Vista de Conjugado e Rendimento.

GRAU: Mestre ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Dante Luiz Da Ros Hollanda

SQN 202 BLOCO F APARTAMENTO 506

70832-060 Brasília – DF – Brasil.

**Dedico este trabalho
ao meu pai Luiz,
a minha mãe Marilda,
a minha irmã Bárbara e
a minha noiva Izabela.**

Agradecimentos

Agradeço a Deus, porque “Dele, por ele e para ele são todas as coisas. A ele a glória por toda a eternidade! Amém.” (Rm 11,36).

Ao Anésio, que me orientou nesta dissertação incansavelmente e me impulsionou a ser uma pessoa profissionalmente melhor. Sou imensamente grato por conhecer esta pessoa, que dedicou seu tempo às atividades efetuadas com afinco.

Ao Jorge Cormane, que também me incentivou a ser uma pessoa mais guerreira na vida acadêmica.

Aos meus pais, por me apoiarem integralmente a realizar esta etapa acadêmica, desde antes de minha entrada na pós-graduação, quando havia dúvidas em relação ao meu futuro profissional.

A minha irmã, Bárbara, que me fez perceber a necessidade de lutarmos por algo que queremos, mesmo quando existem adversidades.

A minha noiva, Izabela, que apoiou meus estudos e sofreu junto comigo todas as privações que o mestrado exige.

A todos os colegas do Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica. Vocês foram peças fundamentais na conquista de trabalho. Obrigado pelo companheirismo e solicitude de todos vocês.

Aos servidores do SG-11, pelas palavras amigas durante o período do mestrado.

Aos funcionários da secretaria do departamento de engenharia elétrica da UnB, pela prestação, esclarecimentos e incentivo.

A Elizabeth, por toda ajuda concedida sobre a língua inglesa.

Às pessoas da UTFPR de Cornélio Procópio, pela acolhida especial e pela possibilidade de realizar os experimentos desta pesquisa.

À CAPES e ao Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação da UNB, pelo auxílio financeiro.

*“Contudo, seja qual for o grau a que chegamos,
o que importa é prosseguir decididamente”*

Fl 3,16

Resumo

Análise Comportamental do Motor de Indução Trifásico Submetido a Desequilíbrios de Tensão sob o Ponto de Vista de Conjugado e Rendimento

Autor: Dante Luiz Da Ros Hollanda

Orientador: Anésio de Leles Ferreira Filho

Coorientador: Jorge Andrés Cormane Angarita

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, outubro de 2012

Os motores de indução trifásicos (MIT) são amplamente utilizados no setor industrial, representando cerca de um quarto da energia elétrica consumida no país. Devido a essa importância no cenário nacional, alguns pesquisadores têm publicado trabalhos envolvendo desequilíbrios de tensão aplicados a motores de indução trifásicos. Sobre o tema supramencionado, a presente dissertação relata com base em simulações computacionais, que adotam três modelagens teóricas, e experimentos laboratoriais que, sob diferentes desequilíbrios de tensão, as variações no conjugado e no rendimento do MIT são bastante elevadas, exceto no caso da especificação da componente de sequência positiva de tensão em adição à porcentagem de desequilíbrio. Entretanto, o processo de identificação de limites utilizando-se dois índices simultaneamente é mais complexo. O estudo apresenta um método alternativo para a avaliação do desempenho de um motor submetido a tensões desequilibradas, baseando-se no emprego da média aritmética das amplitudes das tensões. Mostra-se, diante dessa proposta, que as faixas de variações podem ser reduzidas a níveis aceitáveis.

Palavras-chave: Motor de indução trifásico, Fator de desequilíbrio de tensão, Modelagem de motores, Tensão de sequência positiva, Conjugado, Rendimento, Média das amplitudes das tensões.

Abstract

Behavioral Analysis of a Three Phase Induction Motor Subjected to Voltage Unbalances from a Torque and Efficiency Point of View

Author: Dante Luiz Da Ros Hollanda

Advisor: Anésio de Leles Ferreira Filho

Co-advisor: Jorge Andrés Cormane Angarita

Electric Engineering Graduate Programm

Brasília, October 2012

Three-Phase Induction Motors (TIM) are widely used in the industrial sector, representing about a quarter of the electricity consumed in the country. Due to this importance in the national scenario, some researchers have published studies involving unbalanced voltages applied to these motors. On the aforementioned subject, this dissertation reports that, based on computer simulations which use three theoretical modeling and laboratory experiments under different unbalanced voltages, changes in torque and efficiency of the TIM are quite high, except when specifying the positive sequence component of the voltage in addition to percentage unbalance. However, the process of identifying boundaries using two indexes simultaneously is more complex. The study presents an alternative method for assessing the performance of an engine subjected to unbalanced voltages based on employing the arithmetic mean of the voltage amplitudes. Using this proposal it is shown that the ranges can be reduced to acceptable levels.

Keywords: Three-phase induction motor, Voltage unbalance factor, Engine modeling, Positive sequence voltage, Torque, Efficiency, Mean of voltage amplitudes.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
2.2 - DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	6
2.2.1 - Definição de desequilíbrio de tensão	6
2.2.2 - Causas do desequilíbrio de tensão	7
2.2.3 -Efeitos do desequilíbrio de tensão	8
2.2.4 - Métodos de cálculo para o desequilíbrio de tensão	8
2.2.4.1 - Método das componentes simétricas.....	8
2.2.4.2 - Método CIGRÉ.....	10
2.2.4.3 - Método NEMA.....	10
2.2.4.4 - Método IEEE.....	11
2.2.5 - Normas sobre desequilíbrio de tensão	12
2.2.5.1 - IEC 61000-4-30.....	12
2.2.5.2 - IEEE 1159-2009.....	12
2.2.5.3 - PRODIST.....	12
2.3 - ESTADO DA ARTE SOBRE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO APLICADO A MOTORES DE INDUÇÃO	13
2.3.1 - Análise de trabalhos do estado da arte	16
2.4 - MODELOS DO MIT	18
2.4.1 - Domínio do tempo.	19
2.4.1.1-Modelo trifásico (abc ou 123).....	19
2.4.1.2 - Modelo pela transformada de Clarke (ou $\alpha\beta 0$).....	21
2.4.1.3 - Modelo pela transformada de Park (ou dq0)......	23
2.4.2 - Domínio da Frequência	26
2.4.3 - Redes Neurais Artificiais (RNA)	29
2.4.3.1 - Criação.....	30
2.4.3.2 - Treinamento.....	31
2.4.3.3 - Verificação.....	32

2.5 - PROPOSTA DE ANÁLISE	32
2.5.1 - Análise comparativa entre modelos do MIT.....	33
2.5.2 - Análise do comportamento do conjugado e do rendimento do MIT	36
2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
3 - RESULTADOS E ANÁLISES	39
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	39
3.2 - RESULTADOS DA AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MODELOS DO MIT	39
3.3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CONJUGADO E DO RENDIMENTO DO MIT	44
3.3.1 - Resultados das simulações computacionais	44
3.3.1.1 - Análise do conjugado e do rendimento do MIT em relação ao VUF.....	47
3.3.1.2 - Análise do conjugado e do rendimento do MIT em relação ao V_1	50
3.3.1.3 - Um método alternativo para a quantificação do conjugado e do rendimento do MIT.....	55
3.3.1.4 - Resultados experimentais	57
3.4 - ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MIT: V_M	60
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
4 - CONCLUSÕES	67
5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
 APÊNDICES	
A - FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	78
A.1 - MATLAB®.....	78
A.2 - MATLAB/SIMULINK®.....	78
A.3 - REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA).....	79
A.3.1 - O neurônio artificial	80
A.3.2 - Arquitetura e modelo de RNA.....	81
A.3.2.1 - Treinamento por reforço	82
A.3.2.2 - Treinamento não supervisionado.....	82
A.3.2.3 - Treinamento supervisionado	82
B - VALORES UTILIZADOS.....	83
C – PARÂMETROS DO MIT.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Erro médio e desvio padrão entre os parâmetros simulados e os reais	42
Tabela 3.2 - Maiores faixas de variações para os bancos de dados estudados (em %)	56
Tabela 3.3 - Faixa de variação dos parâmetros ao considerar V_M específico	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Enrolamentos do estator e do rotor de um MIT.....	18
Figura 2.2 - Transformada de Clarke (modificado - Barbi, 1985).	22
Figura 2.3 - Modelo inicial da máquina (Barbi, 1985).....	23
Figura 2.4 - Representação física da transformada de Park (modificado - Barbi, 1985). ...	24
Figura 2.5 - Modelo do MIT antes e depois da transformada de Park (modificado - Barbi, 1985).	25
Figura 2.6 - Circuito equivalente do MIT.....	26
Figura 2.7 - Circuito equivalente para V_1	28
Figura 2.8 - Circuito equivalente para V_2	28
Figura 2.9 - Critério de parada durante o treinamento da RNA	32
Figura 2.10 - Equipamentos da montagem experimental	34
Figura 2.11 - Eixo do MIT com travão.....	35
Figura 2.12 - Simplificação do circuito equivalente de gaiola dupla para gaiola simples ..	37
Figura 3.1 - Conjugado de partida em função de V_1	40
Figura 3.2 - Conjugado máximo em função de V_1	40
Figura 3.3 - Conjugado de operação em função de V_1	41
Figura 3.4 - Rendimento em função de V_1	41
Figura 3.5 - Envoltória de V_1 em função de VUF com amplitudes de tensão variando	45
Figura 3.6 - Envoltórias de V_1 em função de VUF	46
Figura 3.7 - Envoltórias dos conjugados em função do VUF com amplitudes de tensão variando	47
Figura 3.8 - Rendimento em função do VUF com amplitudes de tensão variando.....	48
Figura 3.9 - Conjugados em função do VUF com amplitudes e ângulos de tensão variando	49
Figura 3.10 - Rendimento em função do VUF com amplitudes e ângulos de tensão variando	49
Figura 3.11 - Conjugados em função de V_1 com amplitudes de tensão variando	50
Figura 3.12 - Rendimento em função de V_1 com amplitudes de tensão variando.....	51
Figura 3.13 - Conjugados em função de V_1 com amplitudes e ângulos de tensão variando	52
Figura 3.14 - Rendimento em função de V_1 com amplitudes e ângulos de tensão variando	52
Figura 3.15 - Conjugado de partida em função de V_1 com VUF discretizado	53

Figura 3.16 - Rendimento em função de V_1 com VUF discretizado.....	54
Figura 3.17 - Faixas de variação em função de V_1	55
Figura 3.18 - Conjugados experimentais em função do VUF.....	58
Figura 3.19 - Rendimento experimental em função do VUF.....	59
Figura 3.20 - Conjugados experimentais em função de V_M	59
Figura 3.21 - Rendimento experimental em função de V_M	60
Figura 3.22 - Conjugado de partida em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.....	61
Figura 3.23 - Conjugado máximo em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.....	62
Figura 3.24 - Conjugado de operação em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.....	62
Figura 3.25 - Rendimento em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.....	62
Figura 3.26 - V_M em função de VUF para rendimento mínimo.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BD	- Banco de Dados
CIGRÉ	- Conseil International des Grands Réseaux Électriques
CVUF	- Complex Voltage Unbalance Factor
GCC	- Gerador de Corrente Contínua
IEC	- International Electrotechnical Commission
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
LVUR	- Line Voltage Unbalance Rate
Matlab	- Matrix Laboratory
MIT	- Motor de Indução Trifásico
NEMA	- National Electrical Manufacturers Association
PRODIST	- Procedimentos de Distribuição
PVUR	- Phase Voltage Unbalance Rate
RNA	- Redes Neurais Artificiais
V	- Volts
V_M	- Média das tensões
VUF	- Voltage Unbalance Factor
V_1	- Módulo da componente de tensão de sequência positiva
V_2	- Módulo da componente de tensão de sequência negativa

1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, autores de diversos países têm se aprofundado na investigação sobre o comportamento de variáveis intrínsecas ao motor de indução trifásico (MIT), tais como correntes elétricas, potências de entrada e saída, temperaturas, conjugados, rendimento, fator de potência e consumo de energia, quando a máquina é submetida a condições desequilibradas.

Dentre outras razões, isso se deve ao fato do MIT ser o equipamento mais vendido e instalado na indústria e no comércio, pois suas características de baixo custo de aquisição e robustez traduzem as necessidades dos processos produtivos (GOEDTEL, 2007). Em uma recente publicação, (KAWAPHARA, 2008) ressalta que a energia elétrica despendida pelo setor industrial representa 49% da gerada no Brasil. Dessa parcela, 51% pertence aos motores elétricos, ou seja, praticamente 25% da energia total gerada no país. Considerando que a rede de distribuição não é ideal, ou seja, perturbações na tensão ocorrem a cada instante, torna-se ainda possível, segundo alguns autores, a constatação de variações do consumo do MIT (FAIZ, 2006; PILLAY, 2001).

Como se espera, em um sistema elétrico, dinâmico por natureza, alterações nas amplitudes e nos ângulos das tensões sucedem, de maneira disforme, por vezes sem o conhecimento prévio do usuário do motor. Nesse contexto, define-se o desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico como uma condição na qual as tensões de fase apresentam módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° ou, ainda, as duas condições simultaneamente (ANEEL, 2011).

Embora siga incipiente o número de trabalhos sobre esse fenômeno considerando-se os diversos desafios encontrados na literatura atinente, estudos revelam que um aumento no valor do desequilíbrio, além de afetar a vida útil de motores devido à elevação da temperatura dos enrolamentos, causa redução nos conjugados e no rendimento do MIT (FAIZ, 2004; FAIZ, 2006). Isso pode impactar o funcionamento do MIT, impedindo-o, por exemplo, de acionar cargas como compressores e guindastes (FAIZ, 2004).

Um dos recursos adotados para a verificação da qualidade da alimentação elétrica de um determinado local é a adoção de índices e limites para a quantificação dos fenômenos presentes. Porém, no caso do desequilíbrio de tensão, a comunidade acadêmica não alcançou até o momento o consenso necessário quanto à metodologia a ser empregada para sua quantificação, o que tem culminado na admissão, por parte de algumas normas reconhecidas mundialmente e ainda por alguns catedráticos da área, de diferentes indicadores.

Para a exemplificação desse fato, podem-se citar trabalhos como (WALLACE, 1997) e (KERSTING, 1997), que fazem uso do índice de desequilíbrio proposto pela National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Por outro lado, (WANG, 2000), (GNACINSKI, 2008) e (PILLAY, 2006) empregam o fator de desequilíbrio sugerido pela International Electrotechnical Commission (IEC). Há ainda situações onde autores como (KINI, 2007) e (ANWARI, 2010) avaliam as consequências da aplicação dos mencionados índices, e apresentam propostas de novos indicadores para a quantificação do desequilíbrio.

1.2 – JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Embora haja registros de estudos envolvendo desequilíbrios de tensão desde 1936 (REED, 1936; WILLIAMS, 1954), foram nos últimos quinze anos que especialistas da área concluíram que inúmeras condições de desequilíbrio, que produzem diferentes efeitos sobre equipamentos do sistema elétrico como os motores de indução trifásicos (MIT), podem estar associadas a um mesmo valor do fator de desequilíbrio de tensão, aspecto esse não considerado nos principais documentos normativos que versam sobre esse assunto (LEE, 1997; WANG, 2001; SIDDIQUE, 2004; FAIZ, 2004; KERSTING, 1997; KINI, 2007). Esse fato tem produzido um aumento no número de publicações que buscam mostrar a situação exata do sistema com relação aos desequilíbrios, do ponto de vista físico.

Em (Anwari, 2010), os autores afirmam que o emprego somente do fator de desequilíbrio não é suficientemente confiável para avaliar as perdas no cobre, a potência de entrada, o fator de potência e o conjugado de saída de um MIT.

Como solução para o mencionado impasse, estudos como (FAIZ, 2004), (LEE, 1999), (WOLL, 1975), (FAIZ, 2006), sugerem o emprego conjunto do *Voltage Unbalance Factor* (VUF) e da componente de tensão de sequência positiva (V_1) para a avaliação da temperatura, do fator de potência, das perdas elétricas, do rendimento, do conjugado, das correntes, da velocidade, da vida útil, e do escorregamento do MIT submetido a desequilíbrio de tensão.

Em uma das mais esclarecedoras publicações que avaliam a eficácia dos indicadores empregados para a quantificação do desequilíbrio na análise do conjugado e do rendimento de um MIT (FAIZ, 2004), os autores investigaram para a faixa de tensão 210–270 V, o comportamento do conjugado e do rendimento para diversas tensões desequilibradas. Com base na análise do conjugado e do rendimento, os autores concluíram que é recomendável o emprego do fator de desequilíbrio em conjunto com V_1 para a quantificação do desequilíbrio. Entretanto, o emprego simultâneo de dois indicadores para a quantificação do desequilíbrio torna mais complexo o processo de estabelecimento de limites.

Considerando-se os mencionados aspectos, surge a ideia de desenvolvimento deste trabalho que tem por objetivo geral avaliar o comportamento do desempenho do MIT, sob o ponto de vista do conjugado e do rendimento, submetido aos desequilíbrios de tensão. Para tanto, as metas são:

- Avaliar comparativamente para situações de alimentação desequilibrada os resultados de simulações computacionais que fazem uso de modelagens teóricas do MIT com os resultados de experimentos laboratoriais;
- Investigar os comportamentos do conjugado e do rendimento do motor submetido a diversos níveis e condições de desequilíbrios de tensão; e
- Propor uma nova abordagem para identificação do comportamento dos conjugados e do rendimento do MIT em ambientes desequilibrados.

1.3 – CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Como principais contribuições, podem-se destacar:

- Fornecimento de bibliografia sobre estudos contendo desequilíbrio de tensão aplicado a motores de indução trifásicos;
- Uma avaliação comparativa entre as diferentes modelagens de motores de indução com experimentos laboratoriais, quando da presença de desequilíbrios;
- Identificação do comportamento do MIT quando o desequilíbrio ocorre com variações nos ângulos e nas amplitudes das tensões considerando medições reais e limites exigidos por normas nacionais; e
- Proposição de uma nova metodologia para a quantificação do desequilíbrio, com base na investigação do comportamento do conjugado e do rendimento do MIT.

1.4 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A composição do presente trabalho é descrita a seguir.

No Capítulo 2, são expostos a fundamentação teórica sobre desequilíbrio de tensão, os cálculos envolvidos na quantificação desse fenômeno, e seus efeitos no comportamento do MIT. Além disso, mostram-se as principais normas regulamentadoras sobre o desequilíbrio de tensão e o estado da arte, onde são apresentados os estudos relevantes em relação ao tema em questão.

Ainda no Capítulo 2, exibem-se os métodos e as metodologias da presente dissertação. Desse modo, obtêm-se as informações sobre o MIT empregado e como são aplicados os modelos nas ferramentas computacionais. Além disso, explica-se o procedimento a ser efetuado nas simulações e nos experimentos laboratoriais. Ao final, metodologias para análises do comportamento do MIT frente ao desequilíbrio de tensão e quantificação desse são propostas dispondo-se de quatro bancos de dados para esta investigação.

No Capítulo 3, exibem-se os resultados fornecidos pelas modelagens teóricas do MIT e os obtidos em testes práticos. Realizam-se comparações entre eles a fim de mostrar qual o modelo que apresenta os resultados computacionais mais próximos aos valores práticos. Ao final do capítulo, com as investigações realizadas, elaboram-se uma nova proposta de estudo sobre o comportamento do MIT quando submetido aos desequilíbrios de tensão.

No Capítulo 4, expõem-se as discussões e as conclusões gerais da dissertação. Ademais, elaboram-se sugestões, para trabalhos futuros, desenvolvidas com base nas análises até então efetuadas, que proverão continuidade a esta pesquisa.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são exibidas a definição do fenômeno de desequilíbrio de tensão, suas causas, seus efeitos nos equipamentos elétricos, os métodos de cálculo para sua quantificação e as normas regulamentadoras que definem seus limites.

Estudos pertinentes à dissertação são apresentados, compondo o estado da arte. Nesses trabalhos, questionam-se pontos para uma análise mais aprofundada sobre o comportamento do conjugado e do rendimento do motor de indução quando este é submetido aos desequilíbrios de tensão.

Ademais, descrevem-se três modelagens do motor de indução para obtenção dos parâmetros almejados, a saber: a modelagem no domínio do tempo, no domínio da frequência e por meio das redes neurais artificiais.

Ao final do capítulo, expõem-se as propostas de análise adotadas para efetuação dos experimentos laboratoriais e das simulações computacionais para o MIT submetido aos desequilíbrios de tensão.

2.2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Neste subitem, são explicitados os tópicos sobre o desequilíbrio de tensão, tais como a definição, as causas, os efeitos nos equipamentos elétricos, os métodos de cálculo e as normas que versam sobre o assunto.

2.2.1 – Definição de desequilíbrio de tensão

Para conceituar o desequilíbrio, define-se, de antemão, o equilíbrio de tensão em um sistema elétrico constituído por amplitudes iguais e defasagens angulares simétricas de 120° elétricos. Interpretando a sentença anterior em equações, obtém-se (2.1), (2.2) e (2.3) considerando a sequência ABC.

$$\bar{V}_A = V_A \angle 0^\circ [\text{V}] \quad (2.1)$$

$$\bar{V}_B = V_B \angle -120^\circ [\text{V}] \quad (2.2)$$

$$\bar{V}_C = V_C \angle 120^\circ [\text{V}] \quad (2.3)$$

Onde:

- \bar{V}_A , \bar{V}_B e \bar{V}_C são fasores de tensão com módulos iguais e defasagens angulares de 120° elétricos entre si; e
- V_A , V_B e V_C são os módulos dos fasores de tensão.

Nesse contexto, o desequilíbrio de tensão é definido como uma condição na qual as tensões de fase apresentam módulos distintos e (ou) defasagem angular entre elas diferentes de 120° elétricos.

2.2.2 – Causas do desequilíbrio de tensão

De acordo com (GONÇALVES, 2008), (FERREIRA, 2008), (SIDDIQUE, 2004), (KINI, 2007) e (LEE, 1997), caracterizam-se como causas do desequilíbrio de tensão:

- Distribuição irregular de cargas elétricas;
- Sobrecarga em uma das fases;
- Falhas em bancos de capacitores, tal como um rompimento de fusível em uma das fases;
- Desigualdade nas impedâncias dos enrolamentos dos transformadores;
- Disparidade nas impedâncias dos condutores da rede;
- Bancos de transformadores com ligação em triângulo aberto;
- Grandes cargas monofásicas reativas;
- Deformidade nos contatos elétricos; e
- Transposição incompleta de linhas de transmissão.

2.2.3 – Efeitos do desequilíbrio de tensão

Os desequilíbrios podem causar aos motores de indução trifásicos, de acordo com (FERREIRA, 2008):

- Surgimento de correntes de sequência negativa;
- Sobreaquecimentos e falhas dos dispositivos de proteção, implicando na redução da vida útil do MIT;
- Superaquecimento dos condutores acarretando uma maior solicitação do isolante, o que implica na diminuição da vida útil e no aumento das perdas; e
- Manifestação de harmônicos não característicos devido a disparos desiguais nas válvulas retificadoras controladoras de equipamentos e cargas.

Esses efeitos podem ocasionar o funcionamento inadequado do MIT devido ao torque pulsante existente no eixo do motor (SIDDIQUE, 2004; WANG, 2001).

2.2.4 – Métodos de cálculo para o desequilíbrio de tensão

Nesta subseção, são apresentados diferentes métodos de cálculo para a quantificação do desequilíbrio de tensão.

2.2.4.1 – Método das componentes simétricas

O método das componentes simétricas baseia-se na decomposição dos fasores desequilibrados em três subsistemas equilibrados. Esses são formados por:

- Componentes de tensão de sequência positiva;
- Componentes de tensão de sequência negativa; e
- Componentes de tensão de sequência zero.

Esses são arranjados matematicamente de acordo com a matriz de Fortescue, definida por (2.4).

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde:

- a é o fasor igual a $1\angle 120^\circ$;
- \bar{V}_0 é o fasor de tensão de sequência zero;
- \bar{V}_1 é o fasor de tensão de sequência positiva; e
- \bar{V}_2 é o fasor de tensão de sequência negativa.

Por este método, o fator de desequilíbrio é exibido de acordo com (2.5).

$$VUF(\%) = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Onde:

- VUF , cuja sigla significa *Voltage Unbalance Factor*, é o fator de desequilíbrio;
- V_2 é o módulo da tensão de sequência negativa; e
- V_1 é o módulo da tensão de sequência positiva.

O VUF, chamado pela comunidade acadêmica de fator de desequilíbrio verdadeiro (PILLAY, 2001), pode ser aplicado tanto com tensões de linha quanto de fase, inexistindo diferenças entre os valores obtidos. Embora o VUF considere apenas o módulo do fator desequilíbrio, estudos como (WANG, 2001), (GNACINSKI, 2008) e (ANWARI, 2010) ressaltam a importância do ângulo desse índice, que juntamente com a magnitude estabelece o CVUF, cuja sigla significa *Complex Voltage Unbalance Factor*. Ao empregar o CVUF, a distinção verificada ocorre em relação aos ângulos dos fatores, onde o CVUF de fase é adiantado 60° em relação ao CVUF de linha.

2.2.4.2 – Método CIGRÉ

Este método demonstra o fator de desequilíbrio com base nos módulos das tensões de linha. O resultado encontrado é idêntico ao obtido pelo método das componentes simétricas. A equação (2.6) aponta o cálculo para o fator de desequilíbrio.

$$K_{CIGRÉ}(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Onde:

- $K_{CIGRÉ}$ é o fator de desequilíbrio adquirido pelo método CIGRÉ e β é equacionado conforme (2.7).

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.7)$$

Onde:

- V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são os módulos das tensões de linha.

2.2.4.3 – Método NEMA

O fator de desequilíbrio defendido pela norma NEMA MG1 (NEMA, 1987) emprega os valores das tensões de linha. A equação (2.8) denota o cálculo do fator de desequilíbrio desenvolvido pelo método em questão.

$$LVUR(\%) = \frac{\Delta V}{V_{MÉDIA}} \cdot 100 \quad (2.8)$$

Onde:

- $LVUR$ é o fator de desequilíbrio cuja sigla significa *Line Voltage Unbalance Rate*;
- ΔV é o maior desvio de tensão considerado em relação à média das tensões; e
- $V_{MÉDIA}$ é a média das tensões.

Este método é vastamente aplicado na indústria, visto que a mensuração das tensões de linha é mais fácil que das tensões de fase, pois nem sempre se tem acesso ao neutro da instalação elétrica. A restrição atribuída a este método é a exclusão do conhecimento das tensões de fase.

2.2.4.4 – Método IEEE

Em 1987, o método sugerido pelo IEEE optava pela diferença entre o valor máximo e mínimo de tensão de fase dividida pela média dessas tensões. A equação (2.9) mostra o cálculo do referido método para o desequilíbrio de tensão naquela época.

$$PVUR(\%) = \frac{V_{MAX} - V_{MIN}}{V_{MÉDIA}} \cdot 100 \quad (2.9)$$

Onde:

- $PVUR$ é o fator de desequilíbrio proposto pelo IEEE cuja sigla significa *Phase Voltage Unbalance Factor*;
- V_{MAX} é a tensão de fase máxima; e
- V_{MIN} é a tensão de fase mínima.

Em 1991, o IEEE adotou um cálculo análogo ao indicado pela NEMA. Porém, em vez de servir-se de tensões de linha, empregavam-se tensões de fase.

As normas IEEE 141-1993 e IEEE 1159-1995 propõem o cálculo utilizado em 1991 e sugerem também o fator obtido pelo método das componentes simétricas. A partir de

2009, de acordo com a norma 1159-2009, o IEEE adotou o cálculo aventado tanto pelo CIGRÉ quanto pelo método das componentes simétricas.

2.2.5 – Normas sobre desequilíbrio de tensão

Nesta seção, são evidenciadas normas referentes aos desequilíbrios de tensão e os limites máximos permitidos para os índices.

2.2.5.1 – IEC 61000-4-30

A norma IEC, usufruindo do fator de desequilíbrio logrado pelo o Método das componentes simétricas, recomenda que o valor máximo seja definido entre o fornecedor e o consumidor da energia elétrica.

Conforme (OLIVEIRA, 2012), o período de medição deve ser no mínimo de uma semana. Ao final de um dia de medição, utiliza-se o percentil 95 % para obter apenas um valor representativo. Após uma semana, o máximo valor obtido diariamente será o indicador semanal.

2.2.5.2 – IEEE 1159-2009

Pela informação de (OLIVEIRA, 2012), esta norma, beneficiada pelo Método das componentes simétricas, aponta o extremo para o fator de desequilíbrio no sistema elétrico de 2%, mas é desejável o limite de 1%. O tempo de medição e o procedimento para obtenção do valor do desequilíbrio não são especificados.

2.2.5.3 – PRODIST

De acordo com esta norma, orientada pelo Método das componentes simétricas, “o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2%” (ANEEL, 2012).

2.3 – ESTADO DA ARTE SOBRE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO APLICADO A MOTORES DE INDUÇÃO

Nesta parte do trabalho, citam-se trabalhos com foco em desequilíbrios de tensão aplicados aos motores de indução. Objetiva-se com isto, contextualizar a dissertação perante estudos mundialmente reconhecidos.

Em (LEE, 1997), um estudo é realizado a fim de provar que o índice de desequilíbrio de tensão não é suficiente para exibir as suas reais condições de operação. Para tanto, foram consideradas oito situações que apresentam o mesmo LVUR: (a) três com tensões desequilibradas abaixo da nominal, (b) três com tensões desequilibradas acima da nominal, (c) uma com alteração no ângulo de uma fase, e (d) uma com variação no ângulo de duas fases. Os autores defendem que para tornar mais precisa a análise do desequilíbrio, é necessário empregar a componente de tensão de sequência positiva, uma vez que ela possui uma relação estreita com as tensões de alimentação desequilibradas e, por conseguinte, com a condição do desequilíbrio. Para o mesmo fator de desequilíbrio, constata-se que acréscimos em V_1 ocasionam aumento no rendimento. Porém, o fator de potência e as temperaturas nos enrolamentos do MIT diminuem.

Em (WANG, 2001), o autor defende a aplicação do CVUF na análise do desempenho do MIT, uma vez que o conhecimento do ângulo desse fator auxilia no entendimento do comportamento do MIT quando submetido a desequilíbrio de tensão. Para fundamentar sua afirmação, realizaram-se diversas medições que permitiram examinar o fator *derating*, o escorregamento e os valores de corrente. Dada à utilidade do ângulo do CVUF, avaliaram-se os valores máximos de correntes possíveis que possibilitam esclarecer a condição de operação do MIT sem comprometer sua vida útil. Conclui-se que para um valor constante de VUF, a corrente máxima no estator, o valor de escorregamento máximo possível e o fator *derating* podem variar de acordo com o ângulo do CVUF. O autor conclui que a utilização do módulo desse fator associado ao seu ângulo mostra-se relevante na análise do comportamento do MIT.

Em (PILLAY, 2001), o autor cita os métodos de quantificação do desequilíbrio adotados pela NEMA, pelo IEEE e o das componentes simétricas, declarando que para condições onde o VUF é menor que 5%, as diferenças encontradas entre esses métodos são insignificantes. Em virtude da presença do desequilíbrio, visando analisar também os efeitos de tensões acima ou abaixo da nominal, compara-se um MIT de alto rendimento com outro de rendimento padrão pelos parâmetros do fator *derating*, do fator de potência, das perdas elétricas, do rendimento e pelo aquecimento nos enrolamentos. Concluiu-se que, dependendo do nível de desequilíbrio e da tensão de alimentação ser superior ou inferior à nominal, o motor deve ter sua potência de saída alterada a fim de não comprometer sua vida útil. Percebeu-se que o MIT de modelo padrão possui mais perdas elétricas ao operar com tensão abaixo da nominal, dado que nessa condição o conjugado de sequência positiva diminui e aumenta-se o escorregamento.

Em (SIDDIQUE, 2004), visando observar a influência das diferentes condições de desequilíbrio que culminam em um mesmo valor do VUF, foram feitas análises do comportamento do MIT, por meio de simulações computacionais, quando submetido a seis combinações de tensões de alimentação para valores de VUF iguais a 4%, 8% e 12%. Estas combinações diferem entre si pela quantidade de fases que estão acima ou abaixo da nominal. No trabalho em questão, foram avaliadas com mais propriedade as perdas totais no cobre, concluindo-se que essas são maiores quando a tensão de alimentação é menor que a nominal. Nesse estudo, motores com diferentes valores de potência foram avaliados, concluindo-se que as maiores perdas percentuais advêm de motores com menores potências nominais. Também foi proposta a utilização da componente de sequência positiva em complemento ao VUF a fim de definir com maior precisão as condições do desequilíbrio.

Em (FAIZ, 2004), o autor justifica que a adoção dos atuais métodos de quantificação do desequilíbrio de tensão (NEMA, IEEE, componentes simétricas e CIGRÉ) não é suficiente na análise do comportamento do MIT. Demonstra-se, computacionalmente, que o conhecimento somente do VUF gera amplas faixas nos valores dos conjugados e do rendimento do MIT. A fim de diminuir essas faixas, os autores propõem o emprego da componente de sequência positiva associada ao VUF. Com isso, verifica-se que as

variações dos conjugados e do rendimento, para um valor de VUF associado a um valor de V_1 , são reduzidas significativamente.

Em (FAIZ, 2005), o autor manifesta por meio de análises computacionais e observações de um caso real a importância do valor médio das tensões e do CVUF na determinação do fator *derating* de um MIT alimentado com tensões desequilibradas. Nesse sentido, a alteração da potência fornecida pelo motor é aconselhada à luz do fator *derating* com o intuito de aumentar o rendimento do MIT e garantir sua operação segura quando submetido a uma determinada condição de desequilíbrio.

Em (KINI, 2007), os autores sugerem novos fatores para o desequilíbrio de tensão, os quais contemplam análises das modificações nas tensões, nas correntes, no rendimento e na potência de saída, a fim de definir com maior clareza a natureza do desequilíbrio. Com respeito às simulações efetuadas, visualizam-se os efeitos do desequilíbrio de acordo com tensões de fase inferiores, iguais ou superiores à nominal. Comprova-se que o caso mais prejudicial ao MIT ocorre para V_1 maior que a tensão nominal. Desse modo, recomenda-se que o VUF seja adequado somente nos casos em que o módulo da componente de sequência positiva é igual ao módulo da tensão nominal.

Em (GNACINSKI, 2008), o autor realiza, por meio de simulações computacionais e experimentos laboratoriais, uma avaliação dos efeitos térmicos nos enrolamentos do MIT abordando o ângulo do CVUF e o fator *derating*. Prova-se que quando o MIT é conectado em estrela ocorre o menor aumento de temperatura nos enrolamentos do motor de indução e para a conexão em delta advém o pior caso, onde procede ao maior aumento de temperatura. Com base na elevação da temperatura explorada, é possível definir de forma adequada a potência de saída do MIT, determinada pelo fator *derating*, permitindo a operação segura do motor sem sobreaquecimento em seus enrolamentos.

Em (KINI, 2010), os autores apresentam estudos experimentais de um sistema MIT–bomba quando submetido aos desequilíbrios de tensão. São analisadas três situações de funcionamento do sistema, em que cada uma delas é associada a uma carga. Desse modo, averigua-se separadamente os rendimentos da bomba e do MIT, concluindo-se que o rendimento total do sistema é mais influenciado pelo rendimento da bomba. Assim, a elaboração de uma estratégia de gestão de energia não deve ser baseada

somente em pontos de operação arbitrários, mas em estudos que analisem corretamente as variações da carga frente aos desequilíbrios de tensão.

Em (MENDES, 2010), são averiguados os efeitos da influência da tensão de sequência positiva e do desequilíbrio de tensão na temperatura do motor de indução. É afirmado pelos autores que o conhecimento do índice de desequilíbrio não estabelece as tensões terminais da máquina, havendo uma infinita possibilidade de combinações de tensões de linha que resultam em um mesmo nível de desequilíbrio. Tal fato também ocorre no cálculo do VUF, resultando em distintas influências no desempenho do MIT.

Em (ANWARI, 2010), os autores definem um novo coeficiente com o intuito de melhor avaliar as condições do desequilíbrio de tensão. Neste trabalho, os autores afirmam que a aplicação do módulo do CVUF pode ser destinada para definir as perdas totais nos enrolamentos do motor, a potência de entrada, o fator de potência e o conjugado de saída. No entanto, a fim de estabelecer o valor de pico de corrente, de perdas nos enrolamentos e o fator *derating*, além do módulo do CVUF, é necessário considerar a utilização do seu ângulo.

Em (QUISPE, 2011), o estudo experimental comprova que a tensão de sequência positiva tem influência significativa em relação à potência de saída do motor quando esse está submetido aos desequilíbrios de tensão. É comprovado que os índices atualmente utilizados para quantificar o desequilíbrio não permitem uma medição precisa dessa influência. Os autores concluem que a curva *derating* da norma NEMA MG1 não é precisa quando se refere à proteção do motor, superprotegendo-o quando em condições desequilibradas, e afirmam que a tensão de sequência positiva deve ser empregada juntamente com o índice de desequilíbrio proposto pela NEMA.

2.3.1 – Análise de trabalhos do estado da arte

Nesta parte, tecem-se comentários sobre estudos provenientes do estado da arte, apontando pontos que contribuem no avanço da pesquisa sobre desequilíbrio de tensão aplicado a motores de indução trifásicos.

Em (LEE, 1997), os autores consideram, para um determinado desequilíbrio de tensão com módulo de V_1 maior que o valor nominal, somente amplitudes que sejam superiores ou inferiores à referência preestabelecida. Inexiste, no referido estudo, uma combinação de módulos que contemple tensões de fase abaixo e acima do patamar ideal. Nesse contexto, o presente trabalho avalia diferentes valores de V_1 , com arranjos diversos para as três fases, com valores superiores e inferiores à nominal.

Em (KINI, 2010), observa-se que a influência de V_1 no motor é desprezível perante os desequilíbrios elevados nas correntes. Adicionalmente, ao alimentar o MIT com tensões equilibradas e inferiores à nominal, verifica-se que o rendimento do MIT se torna maior do que o verificado em condição ideal de alimentação. Diante do exposto, este estudo visa investigar, além dos conjugados do MIT, a faixa do rendimento perante as diversas situações de desequilíbrio.

Apreciando (MENDES, 2010), nota-se que somente o índice VUF não é suficientemente plausível para a determinação do aumento da temperatura do MIT, existindo a necessidade de auxílio do índice componente de tensão de sequência positiva. Os autores se baseiam somente na modificação das magnitudes, não considerando a angular existente nos desequilíbrios. A análise realizada por esta dissertação visa, além de utilizar variações nas amplitudes, investigar o desempenho do MIT perante alterações angulares.

Em (ANWARI, 2010), o coeficiente proposto pelos autores se refere à componente de tensão de sequência positiva. Despreza-se a faixa angular existente nas tensões de fase, abordando somente as mudanças nos módulos. Tal fato exhibe negligência da real condição de operação de um MIT. Além disso, explicitam-se, em uma figura do estudo, os lugares geométricos das tensões com $VUF=5\%$ alegando que as tensões propostas estão na faixa de 80% a 120% das tensões nominais. Porém, essa afirmativa é equivocada, pois para esse nível de desequilíbrio a faixa de tensão está além dos 40% declarado. O capítulo 3 investiga com mais propriedade os limites das tensões existentes para um determinado valor de VUF.

Diante da exposição dos trabalhos evidenciados e das análises efetuadas, verificam-se lacunas nos estudos realizados que precisam ser preenchidas, a saber:

- Investigação de diversos valores de V_1 para inúmeras condições de desequilíbrio;
- Consideração das perturbações angulares existentes nas tensões de fase; e
- Delimitação da faixa de desequilíbrio, de V_1 , dos conjugados e do rendimento perante alimentação desequilibrada.

2.4 – MODELOS DO MIT

Em relação aos estudos sobre as modelagens representativas do MIT, os domínios do tempo, da frequência e por meio de redes neurais artificiais (RNA) são abordados. Decorrente da primeira, três modelos surgem: o trifásico (ou abc), pela transformada de Clarke (ou $\alpha\beta 0$) e pela transformada de Park (ou dq0).

Para compreender com maior clareza a aplicação dos modelos supramencionados, a Figura 2.1, com vista transversal do MIT, exhibe o enrolamento do rotor, considerado como “Gaiola de Esquilo” (em curto-circuito), e o enrolamento do estator distribuídos de maneira igual ao longo do perímetro dos cilindros, com 120° espaciais para cada fase.

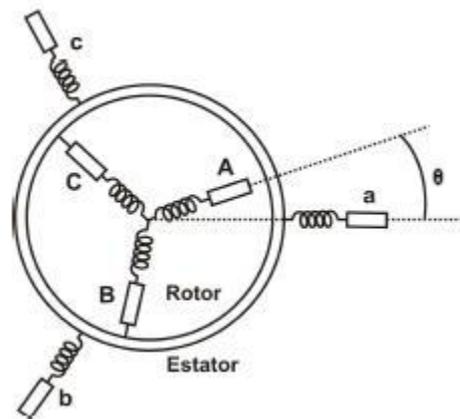


Figura 2.1 – Enrolamentos do estator e do rotor de um MIT.

Onde:

- A, B e C são os enrolamentos das três fases no rotor;
- a, b e c são os enrolamentos das três fases do estator; e

- θ é o ângulo entre o enrolamento, da mesma fase, do rotor e do estator.

2.4.1 – Domínio do tempo

Conforme relatado anteriormente, estão presentes neste trabalho três modelos para a análise no domínio do tempo: o trifásico, pela transformada de Clarke e pela transformada de Park.

2.4.1.1 – Modelo trifásico (abc ou 123)

Em (MATOS, 2012), as considerações adiante são feitas a fim de tornar este modelo mais simples e esclarecedor:

- Os enrolamentos do estator são iguais entre si;
- Os enrolamentos do rotor são iguais entre si;
- Os ângulos elétricos entre os enrolamentos são iguais, tanto no estator quanto no rotor;
- O entreferro é constante;
- O circuito magnético é ideal;
- A saturação é negligenciada;
- A distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é radial e senoidal;
- As perdas magnéticas são nulas.

Como consequência das hipóteses de estudo adotadas, as equações para qualquer dos enrolamentos constituintes da Figura 2.1 são da forma exposta por (2.10).

$$V_i(t) = R_i \cdot i_i(t) + \frac{d}{dt} \Phi_i(t) \quad (2.10)$$

Onde:

- V_i é a tensão nos terminais do enrolamento i , seja ele do rotor ou do estator;
- R_i é a resistência do enrolamento i ;

- i_i é a corrente do enrolamento i ; e
- Φ_i é o fluxo total do enrolamento i .

Separando o sistema de equações do estator e do rotor, têm-se as equações (2.11) e (2.12), respectivamente.

$$V_S = [R_S][i_S] + \frac{d}{dt}[\Phi_S] \quad (2.11)$$

$$V_R = [R_R][i_R] + \frac{d}{dt}[\Phi_R] \quad (2.12)$$

Desse modo, os fluxos no estator e no rotor são obtidos pelas equações (2.13) e (2.14).

$$\Phi_S = [L_{SS}][i_S] + [L_{SR}(\theta)][i_R] \quad (2.13)$$

$$\Phi_R = [L_{RR}][i_R] + [L_{RS}(\theta)][i_S] \quad (2.14)$$

Onde L_{SS} e L_{RR} são as matrizes circulares simétricas.

Substituindo as equações (2.13) e (2.14) nas equações (2.11) e (2.12), tem-se (2.15) e (2.16).

$$V_S = [R_S][i_S] + [L_{SS}]\frac{d}{dt}[i_S] + [L_{SR}(\theta)]\frac{d}{dt}[i_R] + \frac{\partial}{\partial\theta}[L_{SR}(\theta)][i_R]\frac{d\theta}{dt} \quad (2.15)$$

$$V_R = [R_R][i_R] + [L_{RR}]\frac{d}{dt}[i_R] + [L_{RS}(\theta)]\frac{d}{dt}[i_S] + \frac{\partial}{\partial\theta}[L_{RS}(\theta)][i_S]\frac{d\theta}{dt} \quad (2.16)$$

Logo, a equação final da máquina é resumida em (2.17).

$$[V] = [R][i] + [L]\frac{d}{dt}[i] + [L(\theta)]\frac{d}{dt}[i] + \frac{\partial}{\partial\theta}[L(\theta)][i]\frac{d\theta}{dt} \quad (2.17)$$

Como a resolução de (2.17) é trabalhosa, técnicas para simplificação deste modelo foram desenvolvidas, como as transformadas de Clarke (ou $\alpha\beta 0$) e de Park (ou dq0).

2.4.1.2 – Modelo pela transformada de Clarke (ou $\alpha\beta 0$)

Conforme (BARBI, 1985), o primeiro passo a ser dado na obtenção de modelos mais adequados para a análise da máquina de indução é o estudo da transformação $\alpha\beta 0$. Fisicamente, a transformação $\alpha\beta 0$ transforma a máquina simétrica trifásica numa máquina simétrica bifásica, com mesma potência mecânica, torque, velocidade e número de polos.

O modelo torna-se bifásico, ou seja, sem a componente de sequência zero (ou homopolar), somente depois que simplificações ocorrem pela transformada de Clarke, representada pela equação (2.18) e na sua inversa, (2.19).

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Onde:

- A variável x pode ser corrente ou tensão, tanto do estator quanto do rotor.

A Figura 2.2 evidencia esquematicamente a transformação de um sistema trifásico (123) para o sistema bifásico ($\alpha\beta 0$).

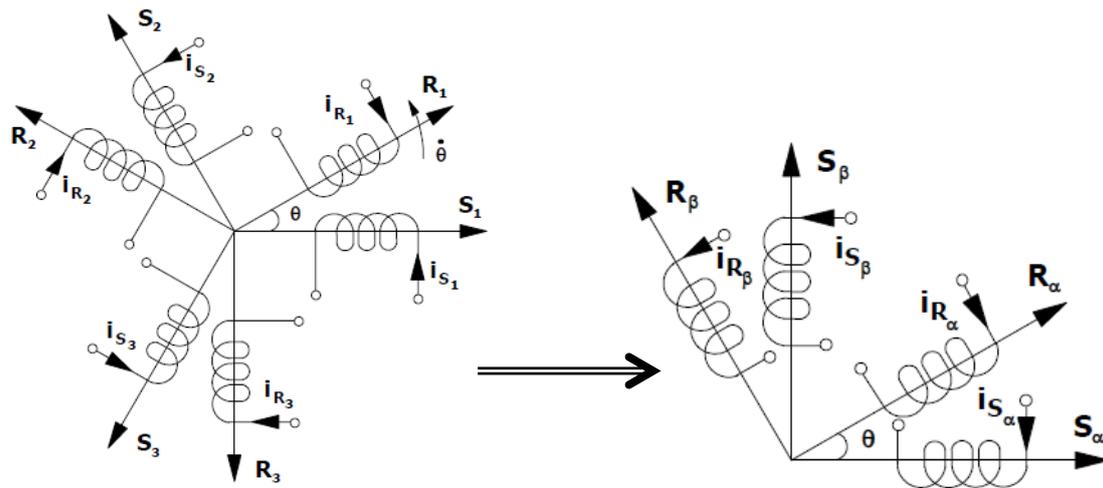


Figura 2.2 – Transformada de Clarke (modificado - BARBI, 1985).

Onde:

- S_1, S_2 e S_3 são os eixos do estator;
- R_1, R_2 e R_3 são os eixos do rotor;
- i_{S1}, i_{S2} e i_{S3} são as correntes do estator;
- i_{R1}, i_{R2} e i_{R3} são as correntes do rotor;
- θ é o ângulo entre o rotor e o estator de uma mesma fase;
- $\dot{\theta}$ é a velocidade angular entre o rotor e o estator de uma mesma fase;
- S_α e S_β são os eixos do estator;
- R_α e R_β são os eixos do rotor;
- i_{S_α} e i_{S_β} são as correntes do estator; e
- $i_{R_\alpha}, i_{R_\beta}$ são as correntes do rotor.

Pela aplicação deste modelo, adquire-se a componente de tensão de sequência zero quando a operação do MIT for submetida a tensões e correntes desequilibradas. Porém, não ocorre influência dessa componente de tensão no conjugado do MIT, visto que os vetores α , β e 0 possuem sentidos iguais. Nesse contexto, o sistema é reduzido aos eixos α e β , justificando a transformação trifásico-bifásico para quaisquer situações de desequilíbrio. Por este modelo e por meio de cálculos matemáticos, tem-se a equação do conjugado eletromagnético, conforme descrito na Equação (2.20).

$$T = m_{SR} \begin{bmatrix} i_{S\alpha} & i_{S\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\text{sen}\theta & -\text{cos}\theta \\ \text{cos}\theta & -\text{sen}\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R\alpha} \\ i_{R\beta} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Onde:

- m_{SR} é a indutância mútua existente entre os enrolamentos do estator e do rotor;
- $i_{S\alpha}$ e $i_{S\beta}$ são as correntes do estator nos eixos α e β ; e
- $i_{R\alpha}$ e $i_{R\beta}$ são as correntes do rotor nos eixos α e β .

2.4.1.3 – Modelo pela transformada de Park (ou dq0)

Conforme (BARBI, 1985), a transformada de Park tem uma importância muito grande no estudo das máquinas elétricas. Esta transformada consiste em uma transformação linear que simplifica as equações das máquinas, gerando um conjunto de variáveis hipotéticas.

A proposta inicial da máquina é mostrada na Figura 2.3.

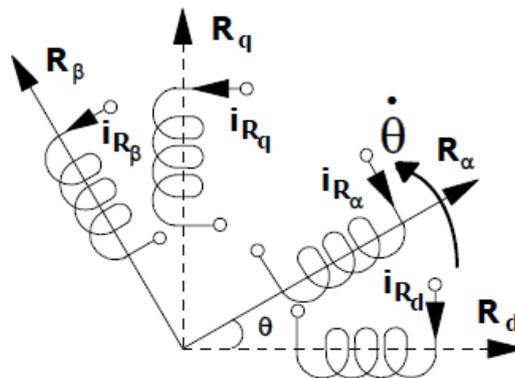


Figura 2.3 – Modelo inicial da máquina (BARBI, 1985).

Onde:

- R_α e R_β são os eixos girantes do MIT;
- R_d e R_q são os eixos fixos do MIT;
- $i_{R\alpha}$ e $i_{R\beta}$ são as correntes do rotor nos eixos girantes;

- i_{Rd} e i_{Rq} são as correntes do rotor nos eixos estacionários; e
- $\dot{\theta}$ é a velocidade dos eixos.

Na Equação (2.21), para a obtenção da tensão ou da corrente pela transformada de Park, parte-se do conhecimento da variável em análise obtida pela transformada de Clarke.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ 0 & \text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Neste modelo, os eixos d e q são estacionários e os eixos α e β são girantes. Dentro desse foco, a transformada de Park permite converter um conjunto de enrolamentos girantes num conjunto de enrolamentos fixos, produzindo os mesmos efeitos (BARBI, 1985). Nessa conversão, coloca-se em evidência o seguinte questionamento: os enrolamentos do rotor são representados como fixos, mas ele encontra-se em movimento. Assim, a transformada de Park converte enrolamentos comuns, alimentado por meio de anéis, em enrolamentos alimentados por escovas e comutador, que são também conhecidos com o nome de enrolamentos pseudo-estacionários. A Figura 2.4 representa a transformação física descrita (BARBI, 1985).

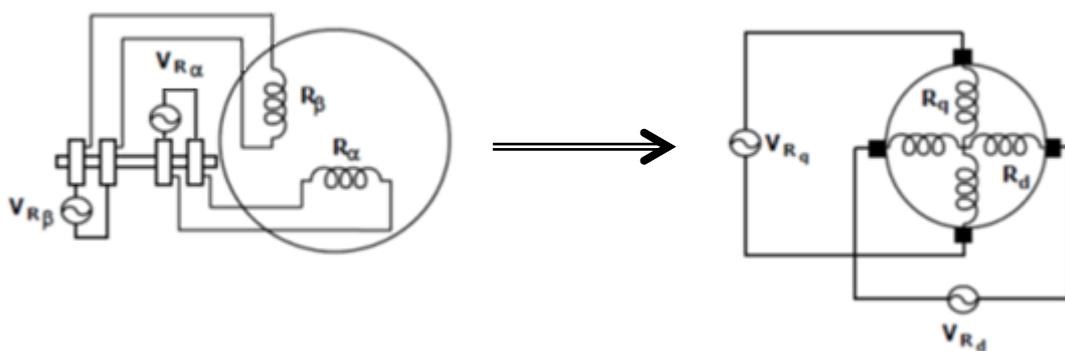


Figura 2.4 – Representação física da transformada de Park
(modificado - BARBI, 1985).

A Figura 2.4, representa simbolicamente o MIT, com as referências do estator e do rotor, antes e depois da transformada de Park. Na Figura 2.5, observa-se a transformação dos eixos α e β em d e q.

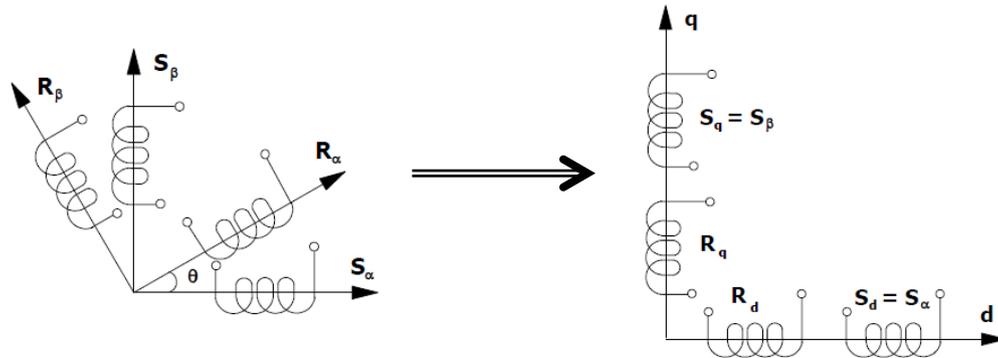


Figura 2.5 – Modelo do MIT antes e depois da transformada de Park (modificado - BARBI, 1985).

Com base na Figura 2.5, nota-se que os eixos do rotor e do estator da fase α , por exemplo, desalinhados na transformação $\alpha\beta 0$, possuem o mesmo eixo após a transformada de Park, o eixo d. A fase β , por sua vez, após a transformação $dq 0$, possui o eixo q.

Por este modelo, o conjugado eletromagnético é calculado pela equação (2.22).

$$T = n.m_{SR}(i_{Sq} \cdot i_{Rd} - i_{Sd} \cdot i_{Rq}) \quad (2.22)$$

Onde:

- n é o número de par de polos;
- m_{SR} é a indutância mútua entre os enrolamentos do estator e do rotor;
- i_{Sq} é a corrente do estator referida ao eixo q;
- i_{Rd} é a corrente do rotor referida ao eixo d;
- i_{Sd} é a corrente do estator referida ao eixo d; e
- i_{Rq} é a corrente do rotor referida ao eixo q.

2.4.2 – Domínio da frequência

O modelo no domínio da frequência baseia-se na utilização do circuito equivalente monofásico do motor de indução. A Figura 2.6 mostra o mencionado circuito para análise em regime permanente considerando o sistema de alimentação equilibrado, bem como os enrolamentos do MIT.

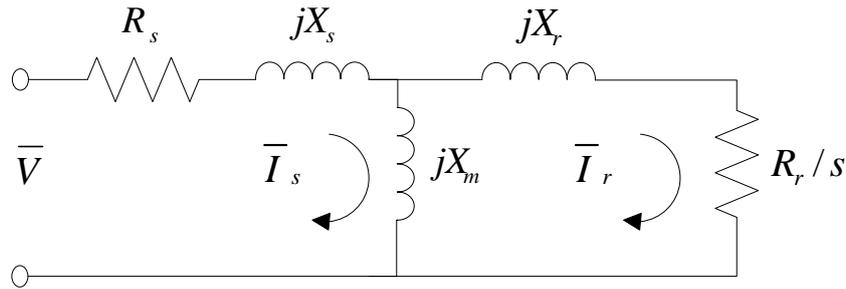


Figura 2.6 – Circuito equivalente do MIT.

Onde:

- \bar{V} é a tensão de fase de entrada do MIT;
- \bar{I}_s e \bar{I}_r são as correntes fasoriais circulantes no estator e no rotor do MIT referidas ao estator;
- R_s e X_s são a resistência e a reatância indutiva do MIT;
- X_m é a reatância magnetizante do MIT;
- R_r e X_r são a resistência e a reatância indutiva do MIT referidas ao estator; e
- s é o escorregamento.

O escorregamento pode ser calculado por (2.23) e a velocidade síncrona pode ser obtida por (2.24).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_R}{\omega_s} \quad (2.23)$$

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} \quad (2.24)$$

Onde:

- ω_s é a velocidade síncrona;
- ω_R é a velocidade do rotor;
- f é a frequência da rede de alimentação do motor; e
- p é o número de polos do motor.

Para o cálculo simplificado do conjugado do MIT, obtém-se primeiro a potência mecânica (P_{MEC}), fornecida por (2.25). De posse dessa potência, o resultado final para o conjugado é encontrado pela equação (2.26).

$$P_{MEC} = P_1(1-s) = 3 \frac{Rr}{s} I_r^2(1-s) \quad (2.25)$$

$$T = \frac{P_{MEC}}{\omega_R} \quad (2.26)$$

Onde:

- P_1 é a potência transferida pelo entreferro do estator para o rotor.

Para o cálculo do rendimento do motor, as perdas rotacionais por atrito e ventilação (P_{ROT}) devem ser consideradas. Nas equações (2.27), (2.28) e (2.29) expõem-se os cálculos da potência de saída, do rendimento e da potência de entrada, respectivamente.

$$P_{SAIDA} = P_{MEC} - P_{ROT} \quad (2.27)$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} \cdot 100 \quad (2.28)$$

$$P_{ENTRADA} = 3V_{FASE} \cdot I_{FASE} \cdot \cos \theta \quad (2.29)$$

Onde:

- θ é o ângulo, em graus, entre a tensão e a corrente da fase em questão.

Em sistemas desequilibrados, os cálculos para a obtenção dos conjugados e do rendimento são análogos. Porém, adotando o desequilíbrio fornecido pela IEC, utilizam-se dois circuitos equivalentes, um para a componente de tensão de sequência positiva (V_1) e outro para a componente de tensão de sequência negativa (V_2). As figuras 2.7 e 2.8 mostram esses circuitos.

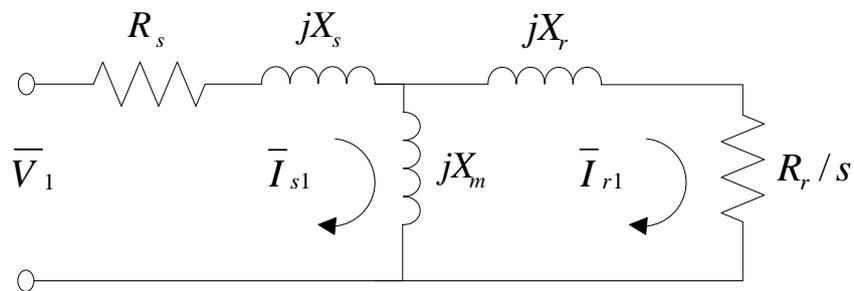


Figura 2.7 – Circuito equivalente para V_1 .

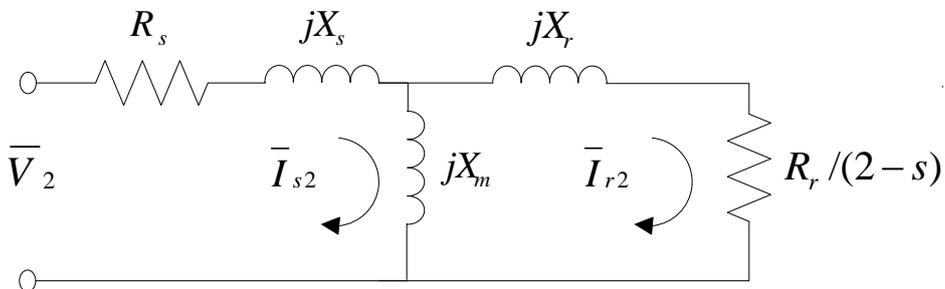


Figura 2.8 – Circuito equivalente para V_2 .

Quando o MIT opera submetido a um sistema elétrico desequilibrado, o campo magnético girante total existente é menor do que quando da operação em condições equilibradas. Isto ocorre devido ao campo magnético girante advindo da corrente de sequência negativa, que é contrário àquela produzido pela corrente de sequência positiva.

Para o cálculo do conjugado (T) do MIT, obtém-se primeiro a potência mecânica. Esta potência é conseguida pela soma das partes positiva (P_1) e negativa (P_2) do circuito

equivalente e são fornecidas por (2.30) e (2.31). De posse dessa potência, o resultado final para o conjugado é encontrado pela equação (2.32).

$$P_1 = P_{G1}(1-s) = 3 \frac{Rr}{s} I_{r1}^2 (1-s) \quad (2.30)$$

$$P_2 = P_{G2}(s-1) = 3 \frac{Rr}{2-s} I_{r2}^2 (s-1) \quad (2.31)$$

$$T = \frac{P_1 + P_2}{\omega_R} = \frac{P_{G1}(1-s) + P_{G2}(s-1)}{(1-s)\omega} = \frac{P_{G1}}{\omega} + \frac{P_{G2}}{\omega} \quad (2.32)$$

Onde:

- P_{G1} e P_{G2} são as potências transmitidas ao entreferro do estator para o rotor pelas sequências positiva e negativa.

Para o cálculo do rendimento do motor, as perdas rotacionais (P_{ROT}) devem ser consideradas. As equações (2.33), (2.34) e (2.35) demonstram os cálculos da potência de saída, do rendimento e da potência de entrada do MIT.

$$P_{SAIDA} = P_1 - P_2 - P_{ROT} \quad (2.33)$$

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} \cdot 100[\%] \quad (2.34)$$

$$P_{ENTRADA} = 3 \cdot V_{FASE} \cdot I_{FASE} \cdot \cos \theta \quad (2.35)$$

2.4.3 – Redes Neurais Artificiais (RNA)

O sistema de RNA adotado neste trabalho possui quatro redes no total, listadas adiante:

- Conjugado de Partida;

- Conjugado Máximo;
- Conjugado de Operação; e
- Rendimento.

As RNA desenvolvidas neste trabalho são do tipo *perceptron* de múltiplas camadas com retropropagação de erro. As redes foram desenvolvidas no *software* Matlab e os subitens seguintes mostram o passo a passo de suas montagens. O Apêndice A fornece informações adicional sobre essa ferramenta computacional, além do Matlab/Simulink, e sobre as RNA.

2.4.3.1 – Criação

A criação da RNA é executada pelo comando *newff*, que precisa dos seguintes parâmetros de entrada:

- Matriz P de entrada, com os valores dispostos em colunas;
- Matriz T com os valores desejados da saída;
- Vetor com o número de neurônios das camadas ocultas;
- Funções de ativação das camadas ocultas;
- Função de treinamento da rede por retropropagação;
- Função de treinamento dos pesos por retropropagação; e
- Função de desempenho.

A aquisição dos parâmetros que compõem a estrutura da RNA foi obtida por meio de ensaios experimentais. No total, realizaram-se 163 ensaios, nos quais combinações de tensões foram aplicadas ao MIT e para cada condição de desequilíbrio mediram-se os conjugados e o rendimento do motor. Dessa forma, verificou-se para cada condição de alimentação do motor o comportamento correspondente de cada parâmetro analisado.

As matrizes P e T são compostas pelos fasores de tensão que são constituídos pelos módulos das tensões experimentais e pelo conjugado ou rendimento, obtidos nos ensaios. Ressalta-se que os valores das matrizes devem ser normalizados entre 0 e 1 (MENOTTI, 2011). Desse modo, três colunas são inseridas na matriz P e uma na matriz T, arrançadas da seguinte maneira:

- 1ª Coluna da matriz P: Módulo da tensão de linha AB;
- 2ª Coluna da matriz P: Módulo da tensão de linha BC;
- 3ª Coluna da matriz P: Módulo da tensão de linha CA; e
- 1ª Coluna da matriz T: Valor do conjugado ou do rendimento.

As RNA deste trabalho são semelhantes às utilizadas por (GOEDTEL, 2007), que emprega a função tangente hiperbólica (sigmoide) nas camadas ocultas e a função linear na camada de saída. Conforme (MATOS, 2012), as funções de treinamento da rede, treinamento dos pesos e desempenho são, respectivamente: *Resilient backpropagation*, gradiente descendente com momentum e o erro médio quadrático.

2.4.3.2 – Treinamento da RNA

Efetua-se o treinamento da rede neural pelo comando *train*, que necessita das matrizes P e T descritas anteriormente. Após a execução desse comando, a RNA encontra-se treinada, com os pesos sinápticos ajustados. O treinamento da RNA obedece aos critérios de parada, a fim de que não ocorra o *overtraining* (excesso de treinamento). Antes de abordar esses critérios, elaboram-se duas explicações:

- De acordo com (GOEDTEL, 2003), uma época é definida, no algoritmo *backpropagation*, como o passo que identifica o vetor de dados a rede, calcula a saída e recalcula o valor dos pesos sinápticos se o erro estiver acima do valor desejado; e
- Conforme (MATOS, 2012), a validação cruzada é uma técnica estatística clássica, útil em determinar, durante o treinamento, a capacidade de generalização de uma rede neural.

Os critérios de parada para o treinamento são:

- Número de épocas é igual a mil;
- Erro médio quadrático igual a zero;
- Taxa de decréscimo do gradiente é menor que 10^{-10} ; e
- Erro na validação cruzada aumenta mais de seis vezes em relação ao último decréscimo.

O gráfico da Figura 4 apresenta os critérios de parada de treinamento da RNA.

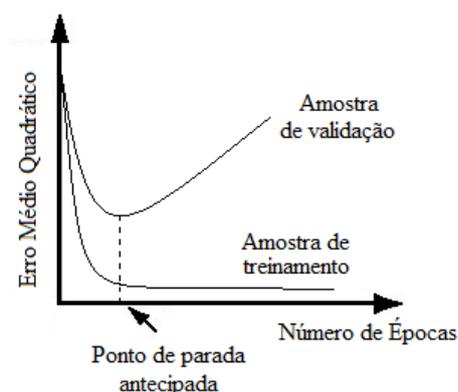


Figura 4 – Critério de parada para durante o treinamento da RNA (Matos, 2012).

Observa-se, quando o número de épocas ultrapassa o ponto de parada antecipada, um aumento demasiado no erro médio quadrático da amostra de validação ainda que a amostra de treinamento diminua o valor desse erro. Esse acontecimento chama-se *overtraining*.

2.4.3.3 – Verificação da RNA

Conforme (SILVA, 2005), para a verificação da rede treinada, aproveita-se uma amostra entre 10 % e 25 % do conjunto total de valores de entrada para a RNA. O comando *sim* executa a simulação da RNA já treinada com os valores de testes para a verificação. Após a simulação, pode-se obter o erro médio quadrático e o desvio-padrão e comprovar a eficiência da rede neural. Na presente investigação, 130 combinações de tensões são admitidas para o treinamento da RNA e 33 delas na verificação. De modo que nessa, distintos valores de V_1 e V_{UF} são adotados a fim de investigar com maior propriedade o comportamento dos conjugados e do rendimento.

2.5 – PROPOSTA DE ANÁLISE

Este item visa apresentar os procedimentos e os materiais adotados para a análise do comportamento do conjugado e do rendimento do MIT frente às mudanças das amplitudes e dos ângulos das tensões. Nesse contexto, as simulações e os testes laboratoriais a serem efetuados nessa dissertação são descritos em dois grupos de investigações, a saber:

- Avaliação comparativa dos modelos do MIT submetido aos desequilíbrios de tensão com valores obtidos em ensaios experimentais; e
- Análise do comportamento do conjugado e do rendimento do MIT para uma determinada faixa de amplitudes e ângulos de tensão.

A seguir, exibem-se os procedimentos e materiais para cada uma das análises propostas.

2.5.1 – Análise comparativa entre modelos do MIT

As simulações e os ensaios propostos neste item têm por objetivo identificar as discrepâncias entre os modelos teóricos e os resultados obtidos por meio dos experimentos laboratoriais. Para tanto, a seleção dos valores de VUF para a execução dos experimentos ocorre de maneira que as tensões de linha estejam entre 201 V e 231 V. Para a obtenção de valores de VUF entre 0% e 4%, opta-se pela variação somente das amplitudes das tensões de fase. Os ângulos permanecem nominais em 0°, -120° e 120° - sequência de fases direta.

A escolha da faixa de operação das tensões de alimentação entre 201–231 V está relacionada aos valores permitidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica no Brasil, que estabelece para um sistema cuja tensão nominal é igual a 220 V os patamares supramencionados (ANEEL, 2012). O Apêndice B mostra os valores das combinações de tensão empregadas nas simulações e nos experimentos.

As simulações efetuadas na plataforma Matlab R2011a utilizam os procedimentos desenvolvidos nas subseções 2.2.4.1 (Método das componentes simétricas), 2.4.2 (Modelo no Domínio da Frequência) e 2.4.3 (RNA). Na plataforma Matlab/Simulink foram efetuadas as simulações no domínio do tempo, cujos procedimentos estão elaborados na seção 2.4.1.3 (Transformada de Park).

Os ensaios práticos permitem compreender os efeitos do desequilíbrio de tensão sobre o MIT quando esse supre uma carga correspondente a 100% do seu carregamento nominal. A inserção dessa, embora não se caracterize como essencial ao propósito do

presente trabalho, torna o ensaio mais próximo ao que de fato se tem em ambientes industriais.

No arranjo experimental, escolhe-se um motor de 1 cv, 220/380 V, com rotor em gaiola de esquilo, conexão delta, cujos parâmetros são encontrados no Apêndice C deste trabalho. Nos testes em laboratório, o MIT, cujas tensões terminais de fase são alteradas de acordo com as condições selecionadas para sua alimentação, é acoplado a um gerador de corrente contínua (GCC).

Com o ajuste da carga do GCC, é possível colocar o MIT funcionando em condição nominal. Nessa situação o conjugado de partida vale 11,4 N.m, o conjugado máximo 11,0 N.m e o de operação 4,1 N.m. Esses valores são medidos e o rendimento, que em condição nominal vale 71,5%, é calculado com base nos dados das potências de saída e de entrada.

A Figura 2.10 exibe o arranjo experimental empregado, onde se identificam os equipamentos utilizados.



Figura 2.10 – Equipamentos da montagem experimental.

As unidades que compõem a montagem experimental são:

1. Fonte de corrente contínua – alterar a tensão de campo da carga;
2. Três variavolts – modificar as tensões de alimentação do MIT;
3. Carga resistiva da armadura – dissipar a potência da carga;
4. Medidor de potência ativa de entrada;

5. Sensor de conjugado, velocidade e potência ativa de saída; e
6. Acoplamento GCC–Sensor–MIT.

Para que o conjugado nominal seja obtido, ajusta-se a tensão de campo da fonte de corrente contínua para uma amplitude em que o conjugado observado no sensor de conjugado seja 4,1 N.m. Para essa condição, verifica-se a potência de saída lida na unidade cinco e a potência de entrada na unidade quatro.

O conjugado máximo do MIT é obtido ao alterar de maneira crescente a tensão da unidade um até que a unidade cinco mostre um valor decrescente no valor do conjugado lido. Esse procedimento deve ser realizado paulatinamente, a fim de obter a leitura correta do conjugado máximo.

Com o intuito de obter o conjugado de partida do MIT, desliga-se a unidade seis por meio do painel onde estão localizados os varivolts. Desse modo, trava-se o eixo do motor conforme exibido na Figura 2.11.

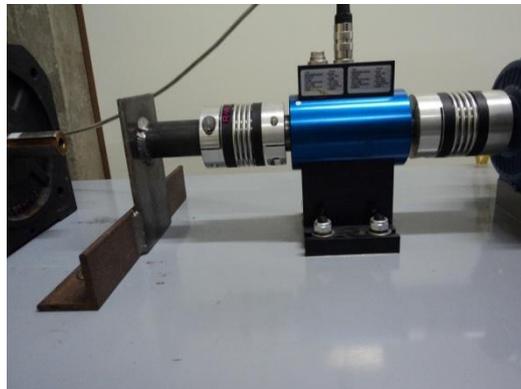


Figura 2.11 – Eixo do MIT com travão.

Com o rotor travado, parte-se o MIT por aproximadamente dois segundos, a fim de capturar a medição da unidade cinco. Esse tempo deve ser respeitado para não se danificar o motor, cuja corrente de partida alcança valores próximos a 25 A. Como esse ensaio é de curta duração, utiliza-se um condicionador de sinais para a obtenção precisa da medida. O sinal adquirido é tratado em um código desenvolvido em Matlab.

2.5.2 – Análise do comportamento do conjugado e do rendimento do MIT

Visando-se a elaboração de uma nova proposta de metodologia para a análise dos conjugados e do rendimento de um MIT submetido aos desequilíbrios de tensão, empregando-se simulações computacionais, submete-se o mencionado MIT a conjuntos de bancos de dados (BD) com as seguintes características:

- **BD1** - Amplitudes variando entre 201–231 V e ângulos nominais nas referências angulares (0° , -120° e 120°);
- **BD2** - Amplitudes nominais e ângulos variando até 5° com base nas referências angulares. O BD2 é adotado a fim de verificar o comportamento do conjugado e do rendimento do MIT quando somente os ângulos variam. A escolha da faixa dos ângulos, entre 0° e 5° , é decorrente dos valores encontrados em medições de campo executadas em 900 locais do sistema de distribuição brasileiro, conforme consta em (BONELLI, 2012);
- **BD3** - Amplitudes variando entre 201–231 V e ângulos de 0° a 5° com base nas referências angulares. O BD3 é estabelecido considerando as modificações limites para as amplitudes e para os ângulos; e
- **BD4** - Amplitudes variando entre 201–231 V e ângulos alterando entre 0° e 3° com base nas referências angulares. O BD4 é utilizado para evidenciar as variações limites nas amplitudes e perturbações intermediárias nos ângulos, de até 3° .

As simulações investigadas neste subitem são elaboradas com o emprego da modelagem do MIT no domínio da frequência, na plataforma Matlab R2011a, com a adoção das equações da subseção 2.4.2. Essa modelagem é considerada ideal na investigação do trabalho devido à possibilidade de obtenção das tensões de sequência positiva e negativa separadamente e à independência de resultados experimentais. Para tanto, adota-se o MIT de 1 cv dos testes práticos. Para a execução das simulações, estabeleceram-se como referência os dados fornecidos pelo catálogo do fabricante. Os parâmetros do MIT

para as simulações foram adquiridos com uso da função *power_AynchronousMachine Params*, cujas referências são (PEDRA, 2006) e (PEDRA, 2008).

Conforme (PEDRA, 2006), motores com gaiola simples geralmente precisam ser modelados como gaiola dupla, a fim de prever a corrente de partida e os dados de conjugado do fabricante. Em seu trabalho, (PEDRA, 2008) validou a função por ele desenvolvida empregando-a a 608 motores de diferentes fabricantes. Segundo ele, o modelo com gaiola simples não representa de maneira confiável o MIT de gaiola de esquilo e, nesse contexto, o modelo de gaiola dupla deve ser utilizado. Como a função proposta por ele retorna parâmetros para MITs com gaiola dupla, é necessária uma simplificação no circuito equivalente do rotor conforme exibe a Figura 2.12.

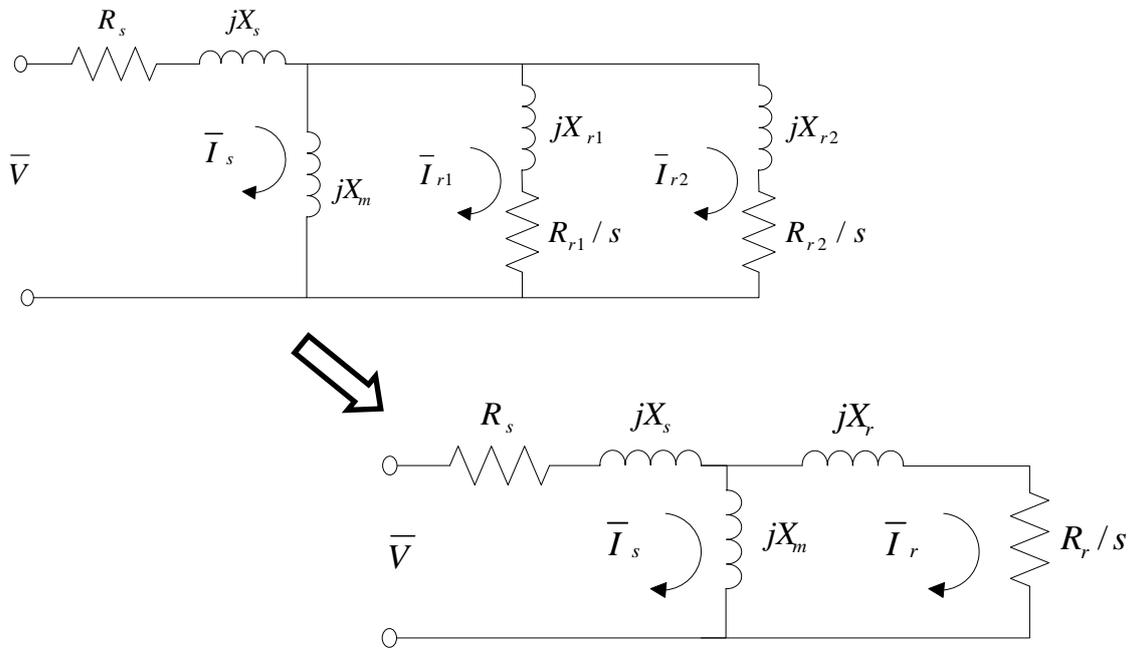


Figura 2.12 – Simplificação do circuito equivalente de gaiola dupla para gaiola simples.

Conforme a Figura 2.12, a simplificação do MIT em gaiola dupla para gaiola simples consiste no equivalente paralelo no ramo do rotor. De posse dos parâmetros do MIT obtidos considerando-se a simplificação apresentada na Figura 2.12, serão executadas, neste trabalho, as simulações computacionais para os quatro bancos de dados supramencionados.

2.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, apresentaram-se a definição do fenômeno desequilíbrio de tensão, suas causas e os efeitos no MIT. Foram ainda expostos os métodos de cálculo para sua quantificação e as normas regulamentadoras que definem seus limites.

Estudos relacionados ao tema desequilíbrio de tensão foram investigados e exibidos no item estado da arte. Com a análise dos estudos sobre o comportamento do conjugado e do rendimento do motor de indução quando este é submetido aos desequilíbrios de tensão, identificaram-se alguns aspectos que se caracterizam como lacunas a serem investigadas.

Três modelagens teóricas do motor de indução para avaliação do comportamento dos parâmetros almejados foram descritas, a saber: no domínio do tempo, no domínio da frequência e por meio das redes neurais artificiais.

Ao final do capítulo, expuseram-se as propostas de análises adotadas para a efetuação dos experimentos laboratoriais e das simulações computacionais para o MIT submetido aos desequilíbrios de tensão.

3 – RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo visa apresentar os resultados obtidos com a execução das ações descritas no item 2.5, cujos objetivos são avaliar comparativamente os modelos de representação do MIT submetido aos desequilíbrios com dados oriundos de ensaios experimentais, e analisar o desempenho do motor quando ocorre variação das amplitudes e dos ângulos das tensões de alimentação.

De posse desses resultados, é investigada a hipótese de substituição do fator de desequilíbrio por um índice que possa aperfeiçoar a relação do índice empregado na quantificação do desequilíbrio de tensão com o desempenho do motor.

3.2 – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MODELOS DO MIT

Nesta seção, exibem-se os resultados obtidos experimentalmente e os adquiridos computacionalmente pelos modelos no domínio do tempo, da frequência e com o emprego de RNA.

Os valores dos dados experimentais, exibidos para a comparação com os obtidos por modelos teóricos, são escolhidos com base no banco de dados utilizado na validação da RNA. As Figuras 3.1 a 3.4 exibem, respectivamente, os resultados adquiridos para o conjugado de partida, máximo, de operação e rendimento do MIT submetido a diversas condições de desequilíbrio de tensão. Os valores dos conjugados estão referenciados a 4,1 N.m, correspondente a 100%.

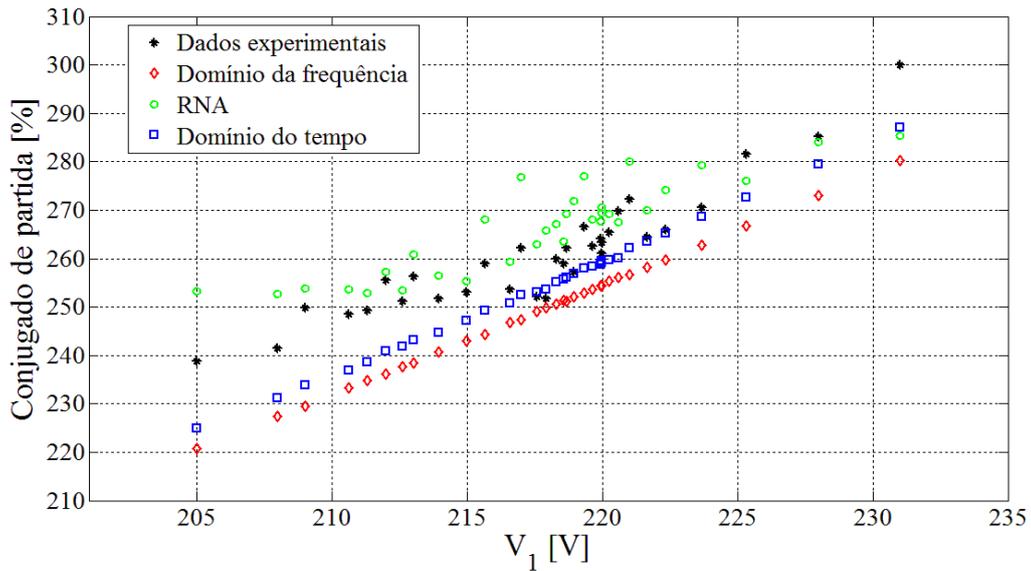


Figura 3.1 – Conjugado de partida em função de V_1 .

Da Figura 3.1, observa-se, sobretudo em relação aos resultados dos modelos nos domínios do tempo e da frequência, uma linearidade entre o comportamento do conjugado de partida e o valor da tensão de sequência positiva. Nota-se uma alta correlação entre os modelos no domínio do tempo e da frequência. Porém, a maior parte dos resultados experimentais possui valores maiores que os obtidos por essas modelagens. Comprova-se, além disso, a tentativa de aproximação dos resultados gerados pela RNA com os experimentais.

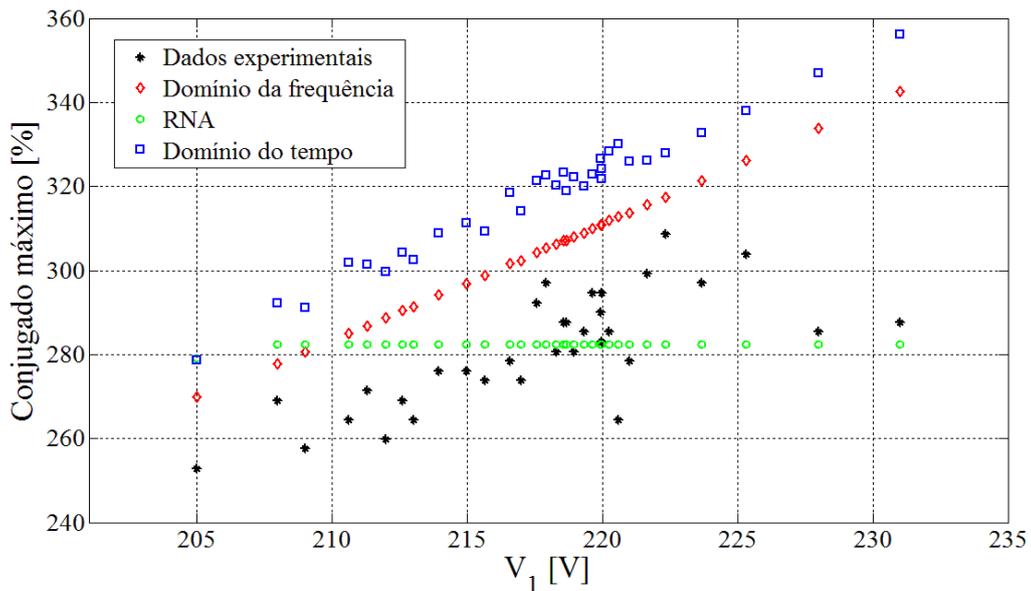


Figura 3.2 – Conjugado máximo em função de V_1 .

Assim como na Figura 3.1, observa-se na Figura 3.2, uma alta correlação entre os dados obtidos pelo modelo no domínio da frequência e do tempo. Identifica-se, na Figura 3.2, uma reta com inclinação nula, formada pelos resultados adquiridos pela RNA devido à dispersão dos valores experimentais. Em função da disposição dos valores experimentais, visualizam-se diferenças consideráveis para as três modelagens.

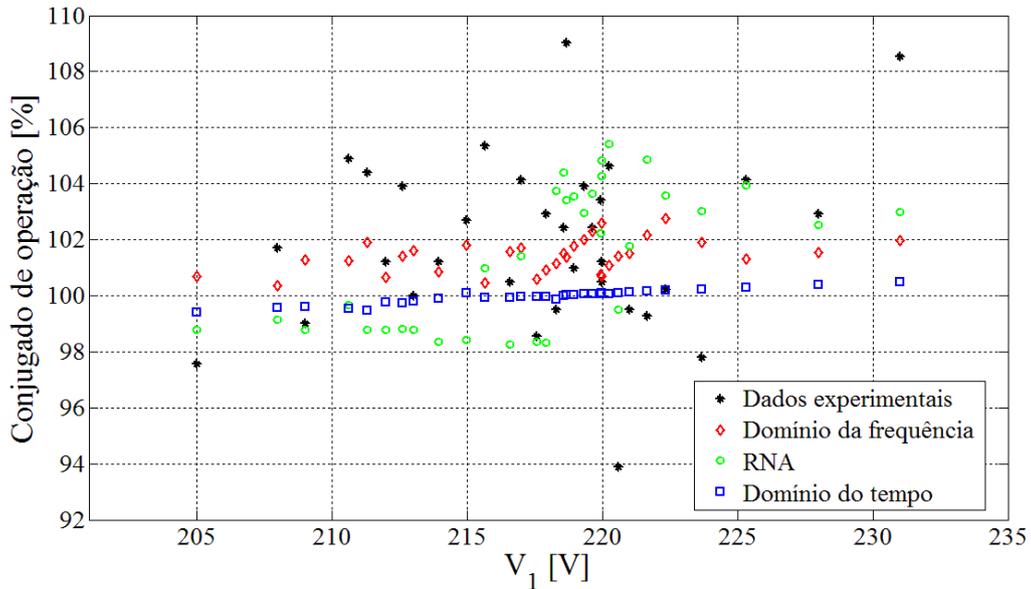


Figura 3.3 – Conjugado de operação em função de V_1 .

Observa-se, da Figura 3.3, uma variação maior dos resultados obtidos experimentalmente em relação aos obtidos computacionalmente. Além do exposto, as seguintes afirmativas são declaradas com o aumento de V_1 :

- Os resultados experimentais e os concebidos pela modelagem por RNA possuem comportamentos bastante variantes; e
- O conjugado de operação determinado pelas modelagens no domínio da frequência e do tempo tendem a aumentar com o crescimento de V_1 .

Ainda na Figura 3.3, de $V_1=201$ V a $V_1=231$ V, constatam-se, das variações experimentais para o conjugado de operação, patamares de, aproximadamente, 15%, enquanto o modelo no domínio do tempo indica uma alteração em torno de 1%.

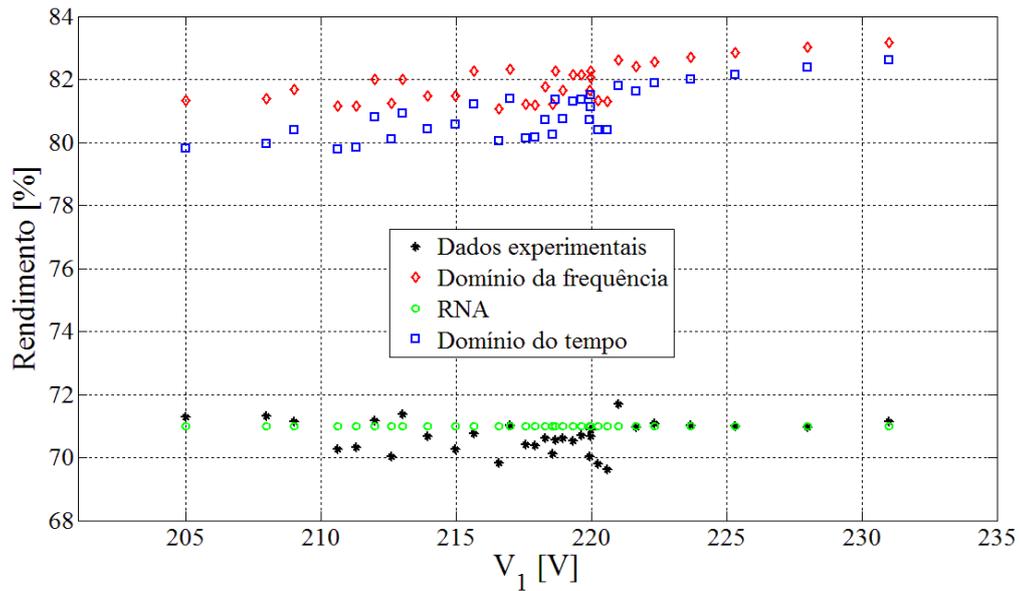


Figura 3.4 – Rendimento em função de V_1 .

Da Figura 3.4, verificam-se diferenças consideráveis entre os rendimentos adquiridos das simulações no domínio do tempo e da frequência e os obtidos experimentalmente e por RNA. Observam-se aproximações entre os resultados adquiridos no domínio da frequência e do tempo com os valores encontrados em catálogo (cerca de 80%). Porém, a RNA, treinada e validada com testes laboratoriais, e os experimentos forneceram valores próximos de 70%. A Tabela 3.1 evidencia os erros médios e os desvios padrão de cada modelo para cada parâmetro.

Tabela 3.1 – Erro médio e desvio padrão entre os parâmetros simulados e reais.

Parâmetro	Modelo	Erro médio (%)	Desvio padrão (%)
Conjugado de partida	Domínio da frequência	4,45	5,04
	Domínio do tempo	2,72	5,17
	RNA	2,74	3,54
Conjugado máximo	Domínio da frequência	8,45	5,04
	Domínio do tempo	13,22	4,92
	RNA	4,00	0,20
Conjugado de operação	Domínio da frequência	2,43	0,59
	Domínio do tempo	2,70	0,25
	RNA	2,93	2,40
Rendimento	Domínio da frequência	15,86	0,73
	Domínio do tempo	14,48	0,96
	RNA	0,65	0,00

Em relação ao conjugado de partida, da Tabela 3.1, verificam-se os menores erros médios para o modelo no domínio do tempo e por RNA. A afirmação anterior deve-se ao fato dos resultados provenientes dessas modelagens estarem mais próximos dos obtidos experimentalmente. O conjugado de partida fornecido pela modelagem no domínio da frequência atinge erros médios próximos de 4%. Esta porcentagem é cerca de 60% maior em relação aos erros atribuídos pelos outros dois modelos, que estão em torno de 2,7%. Ao investigar os desvios padrão para o mencionado conjugado, a modelagem por RNA apresenta o menor valor, em torno de 3,5%, enquanto as outras duas fornecem desvios padrão próximos de 5%. Desse modo, atribui-se, para esse parâmetro, uma maior confiabilidade à RNA, comparada aos outros modelos estudados.

Na continuidade da Tabela 3.1, observa-se para o conjugado máximo, a exposição do menor erro médio, igual a 4%, pela modelagem da RNA. As modelagens no domínio da frequência e do tempo exibem erros médios de 8,45% e 13,22%, respectivamente. Assim sendo, percebe-se que RNA é o mais confiante no modelo de representação desse conjugado. Assim como constatado para o conjugado de partida, o desvio padrão encontrado pela RNA para o conjugado máximo é quase nulo enquanto os dois restantes estão por volta de 5%. Esses resultados decorrem da elevada dispersão encontrada pelos resultados experimentais. Os modelos no domínio da frequência e do tempo manifestam aumento no conjugado máximo quando se eleva o valor de V_1 . Porém, experimentalmente, percebe-se que não é bem assim que o conjugado se comporta.

Ainda sobre a Tabela 3.1, certifica-se, para o conjugado de operação, a procedência de erros médios próximos e menores que 3% para as três modelagens. Porém, em relação aos desvios padrão, notam-se valores por volta de 2% pelo modelo por RNA, e os modelos no domínio do tempo e da frequência indicam desvios padrão menores que 1%. Infere-se, desse modo, maior confiabilidade para esse parâmetro, pelo modelo elaborado no domínio do tempo, muito embora a RNA também apresente bons resultados.

Na continuidade da análise da Tabela 3.1, ao investigar os valores para o rendimento observam-se grandes discrepâncias entre os erros médios adquiridos pelos modelos no domínio da frequência e do tempo com relação aos declarados pela RNA. Verificam-se erros médios, para as modelagens no domínio do tempo e da frequência, superiores a

vinte vezes ao obtido na simulação por RNA. Esta, por sua vez, obteve erro médio e desvio padrão inferiores a 1%. Confirma-se, após a averiguação dos resultados do rendimento, maior exatidão aos experimentos laboratoriais realizados pela RNA.

Ao concluir a análise da Tabela 3.1, comprova-se que a RNA é a modelagem mais confiável na análise do conjugado de partida, máximo e rendimento, considerando-se o erro médio máximo de 4% e desvios padrão inferior a 4%. Em relação ao rendimento, nessa modelagem verificou-se desvio padrão nulo. O modelo no domínio da frequência assumiu o maior erro médio (15,86% para o rendimento) e domínio do tempo apontou o maior desvio padrão existente na comparação dos modelos (5,17% para o conjugado de partida).

3.3 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CONJUGADOS E DO RENDIMENTO DO MIT

Nesta seção, exibem-se os resultados obtidos computacionalmente com a utilização de:

- BD1: banco de dados em que somente as amplitudes das tensões variam;
- BD3: banco de dados em que módulos e ângulos alteram-se; e
- Resultados adquiridos experimentalmente.

Os bancos de dados BD2 e BD4 também foram investigados, porém seus resultados são abrangidos por BD1 e BD3.

3.3.1 – Resultados das simulações computacionais

Inicia-se este subitem com a exposição da Figura 3.5, onde se tem a envoltória de V_1 em função do VUF para o banco de dados em que os ângulos permanecem constantes e os módulos são alterados em todas as fases (BD1).

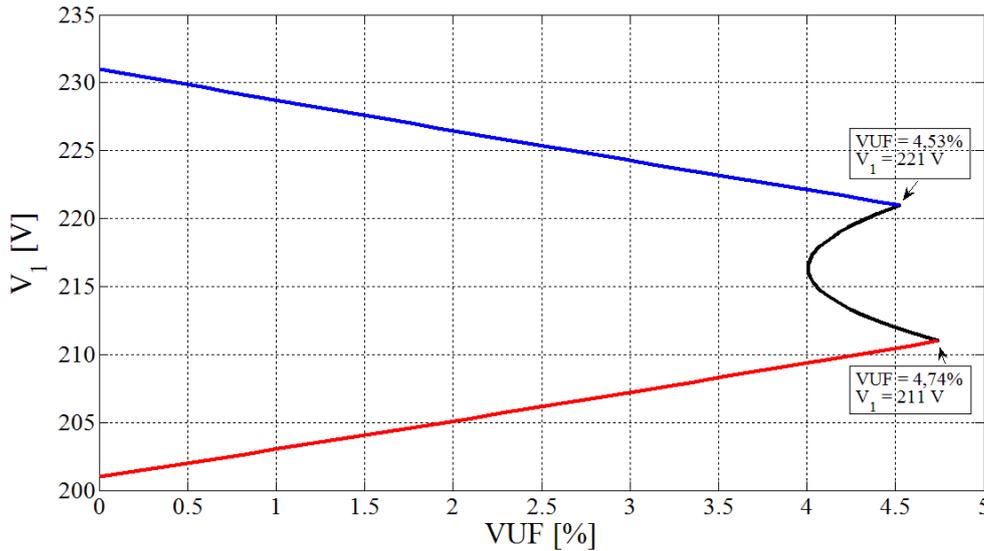


Figura 3.5 – Envoltória de V_1 em função de VUF com amplitudes de tensão variando.

Verifica-se da Figura 3.5, para o banco de dados onde somente as amplitudes das tensões variam na faixa preestabelecida para este estudo, o alcance do VUF a valores próximos de 5%. O maior valor de VUF identificado é igual a 4,74% para V_1 igual a 211 V. A parte inferior da envoltória (em vermelho) é formada por módulos de duas tensões de linha em 201 V e uma variando de 201 V a 231 V (VUF=0% a VUF=4,74%). A parte superior (em azul) é constituída por duas linhas em 231 V e uma variando de 231 V a 201 V (VUF=0% a VUF=4,53%).

Ainda da Figura 3.5, notam-se os picos da envoltória – onde existem os maiores valores de VUF – a exatamente 10 V (1/3 da faixa de 30 V) dos limites da faixa 201-231 V, ou seja, eles estão em $211\text{ V} = 201 + 10\text{ V}$ e $221\text{ V} = 231 - 10\text{ V}$. Se as tensões de fase não possuem variações angulares, os picos de VUF existem quando duas das tensões estão em um limiar (inferior ou superior) e a terceira em outro limite (superior ou inferior). Ao abordar essa linha de raciocínio e considerar qualquer faixa de tensão, o maior pico de VUF ocorre quando duas das três tensões estão no limite inferior e a terceira no limite superior. Estendendo esta investigação e considerando as variações angulares nas tensões de 3° e 5° (BD4 e BD3, respectivamente), bem como as amplitudes nominais com alterações nos ângulos (BD2), obtém-se a Figura 3.6.

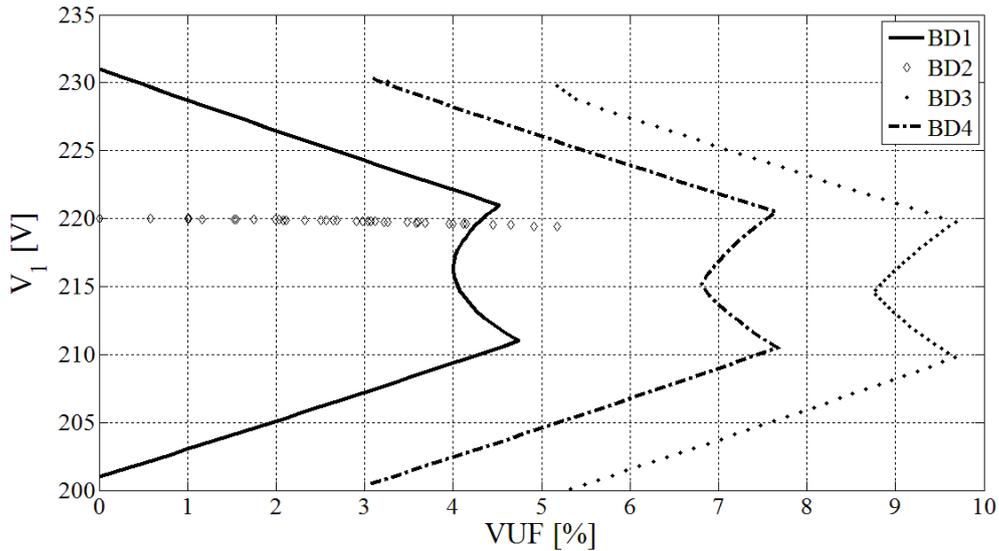


Figura 3.6 – Envoltórias de V_1 em função de VUF..

Da Figura 3.6, é possível identificar para o BD2, valores de V_1 próximos de 220 V. Entretanto, considerando os bancos de dados BD1, BD3 e BD4, é possível verificar que quanto maiores valores do VUF, menores são as faixas de variação para V_1 . Considerando-se $VUF=4\%$ para BD1 e BD4, as faixas de variação de V_1 são, respectivamente, 209-222 V e 202-228 V. Desse modo, comprova-se a existência de maiores faixas de variação para V_1 quando existem mudanças angulares maiores.

Ainda com base na Figura 3.6, é possível perceber, quando se tem somente variação nas amplitudes das tensões (BD1), a impossibilidade de o desequilíbrio ultrapassar 5%. Porém, para variações angulares iguais a 3° e 5° , os máximos valores de VUF são da ordem de 8% e 10%, respectivamente. Analisando-se os dados, é possível concluir que a variação de 1° nos ângulos das tensões culmina no aumento de aproximadamente 1% no valor do VUF.

Depreende-se do comportamento dos dados que as amplitudes das tensões são responsáveis pela forma da envoltória e os ângulos das tensões determinam a sua posição. Em outras palavras, quando os ângulos são nominais, é possível detectar com base nas variações das amplitudes das tensões, a relação entre o VUF e o V_1 . Diante desta afirmação, qualquer variação angular nas tensões implicará no aumento dos valores de VUF. Com isso, a ocorrência de somente a variação das amplitudes das tensões fornece a faixa mínima de variação do VUF, enquanto a variação dos ângulos

identifica a possibilidade dos máximos valores de VUF.

Ainda da análise da Figura 3.6, nota-se o deslocamento quase imperceptivelmente para baixo das envoltórias com a inserção das variações angulares. Isto demonstra que a variação angular, por mínima que seja, cria uma envoltória, com todas as possibilidades de combinações de módulos e ângulos, que se desloca para a direita, expressivamente, e para baixo, minimamente.

As análises seguintes estão relacionadas às simulações que contemplam os conjugados e o rendimento do MIT submetidos às alterações impostas pelos bancos de dados BD1 e BD3.

3.3.1.1 – Análise do conjugado e do rendimento do MIT em relação ao VUF

A Figura 3.7 apresenta os conjugados do MIT em função do VUF, quando do emprego do banco de dados BD1.

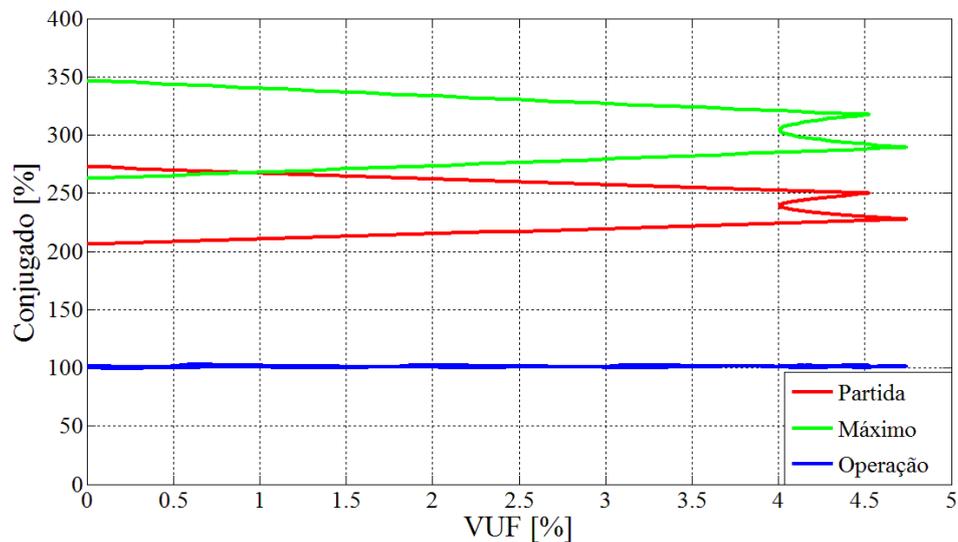


Figura 3.7 – Envoltórias dos conjugados em função do VUF com amplitudes de tensão variando.

Da Figura 3.7, observa-se, para um mesmo valor de VUF, a existência de inúmeros possíveis valores de conjugado de partida e máximo. Para o conjugado de operação a faixa de variação não é apreciável. Além disso, notam-se as maiores faixas de variação dos conjugados para os menores valores de VUF. Por exemplo, para VUF=1%, a faixa

de variação para os conjugados de partida, máximo e de operação valem, respectivamente, 56,72%, 71,11% e 3,23%. Para VUF=4%, as faixas valem 28,12%, 35,75% e 2,40%, respectivamente. Diante disto, conclui-se que o emprego unicamente do VUF não fornece resultados precisos na avaliação de conjugado em sistemas com desequilíbrio de tensão. Ademais, observam-se semelhanças entre as envoltórias do comportamento de V_1 em relação ao VUF (Figura 3.5) e as envoltórias dos conjugados de partida e máximo em relação ao VUF (Figura 3.7).

A Figura 3.8 apresenta o comportamento do rendimento em função do VUF quando os ângulos são nominais.

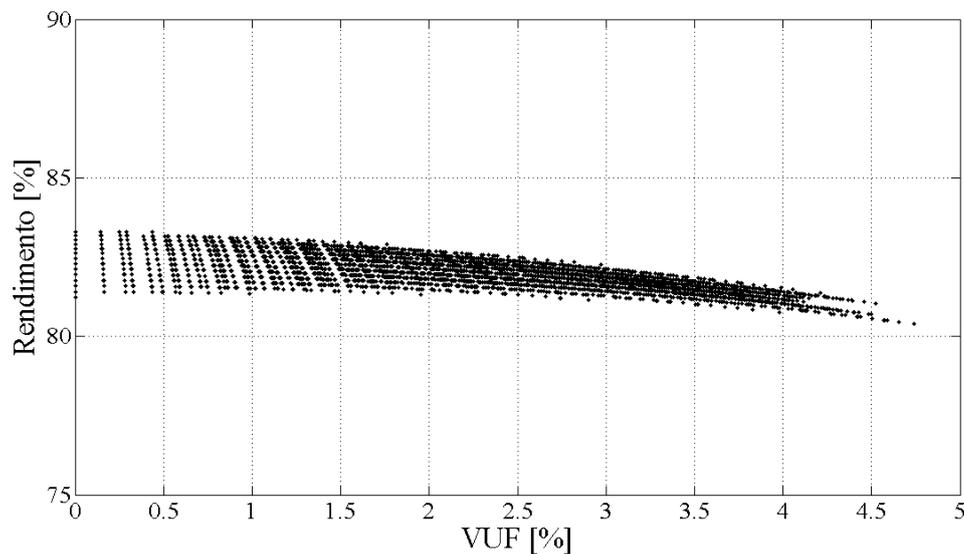


Figura 3.8 – Rendimento em função do VUF com amplitudes de tensão variando.

Da Figura 3.8, verifica-se uma alteração máxima de cerca de 3% no rendimento com a variação do VUF. Observa-se, semelhantemente ao que ocorre com os conjugados, a diminuição na faixa de variação do rendimento para o aumento nos valores de VUF. A menos dessa diferença, observa-se irrelevância na informação do VUF para conhecimento do rendimento.

Nas figuras 3.9 e 3.10, expõem-se, respectivamente, os resultados obtidos para os valores dos conjugados de partida, máximo e de operação, e rendimento em função de VUF para o BD3.

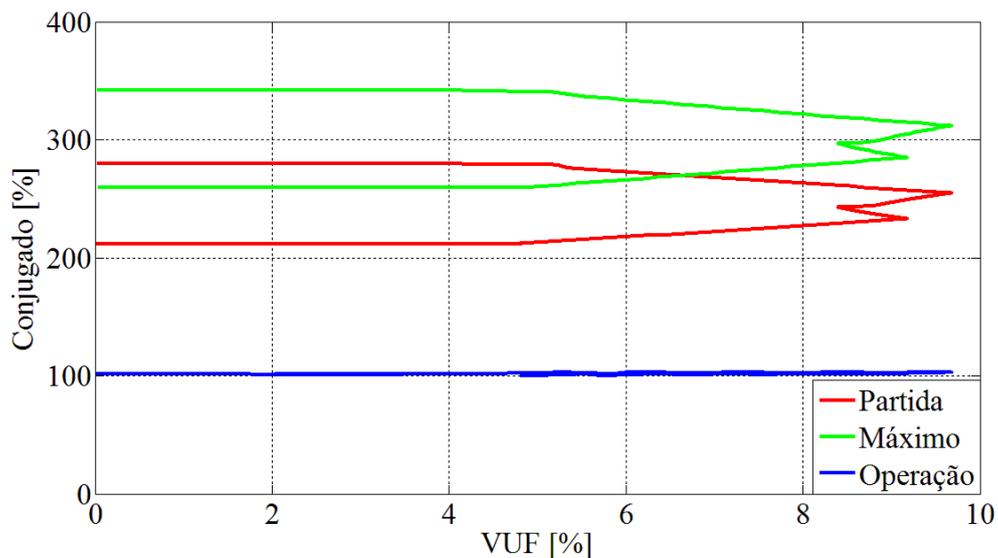


Figura 3.9 – Conjugados em função do VUF com amplitudes e ângulos de tensão variando.

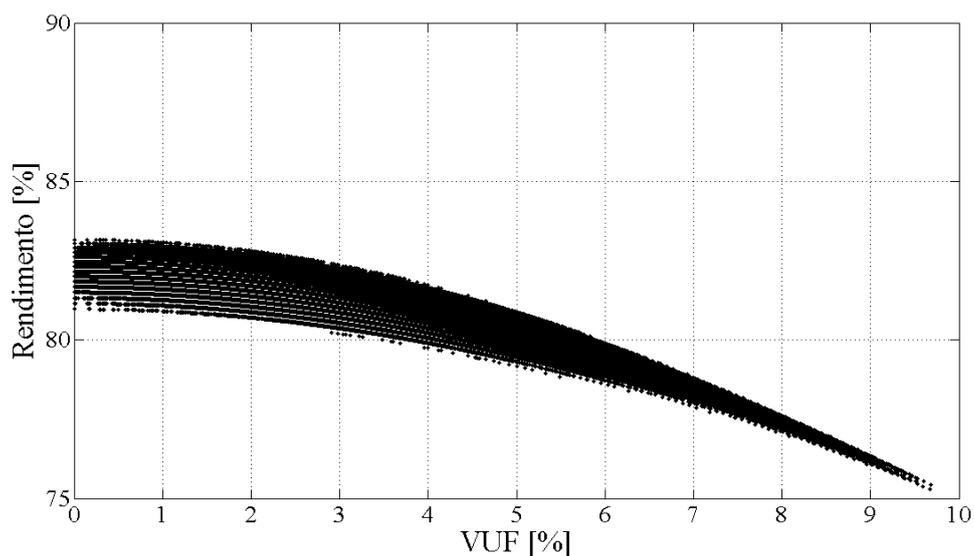


Figura 3.10 – Rendimento em função do VUF com amplitudes e ângulos de tensão variando.

Da Figura 3.9, para $VUF=0\%$ detectam-se variações iguais a 69,73% e 84,98% nos valores dos conjugados de partida e máximo, respectivamente. Descobre-se ainda da Figura 3.9, a permanência de faixas de variações dos conjugados bastante elevadas até VUF próximo de 5% para um mesmo valor de VUF.

Da Figura 3.10, observa-se que quanto menor a faixa de variação do rendimento, maiores são os valores de VUF. É possível notar que o rendimento diminui com o

aumento do desequilíbrio. Entretanto, há condições de desequilíbrio, por exemplo, para VUF próximo de 5%, onde o rendimento pode ser idêntico ao observado com VUF=0%.

Da análise da Figura 3.8 percebe-se que o rendimento mínimo observado para variações somente nas amplitudes das tensões (BD1) é igual a 80,4%. Na Figura 3.10, ao se considerar as modificações nos módulos e nos ângulos das tensões (BD3), esse parâmetro alcança o mínimo próximo a 75%. Comprova-se, à luz desses resultados, a possibilidade do rendimento mínimo do motor ser 5% menor quando esse opera com desequilíbrios de tensão nas amplitudes e nos ângulos, do que o rendimento constatado quando existem variações somente nas amplitudes.

3.3.1.2 – Análise do conjugado e do rendimento do MIT em relação ao V_1

Ao analisar com propriedade os resultados obtidos até este ponto da dissertação tendo em vista somente o emprego do VUF, comprova-se sua inexatidão no estudo do desempenho do MIT. Desse modo, opta-se pela investigação do comportamento dos conjugados e do rendimento em função de V_1 . Nesse contexto, as figuras 3.11 e 3.12 revelam os comportamentos dos conjugados e do rendimento do MIT em função de V_1 com o emprego de BD1.

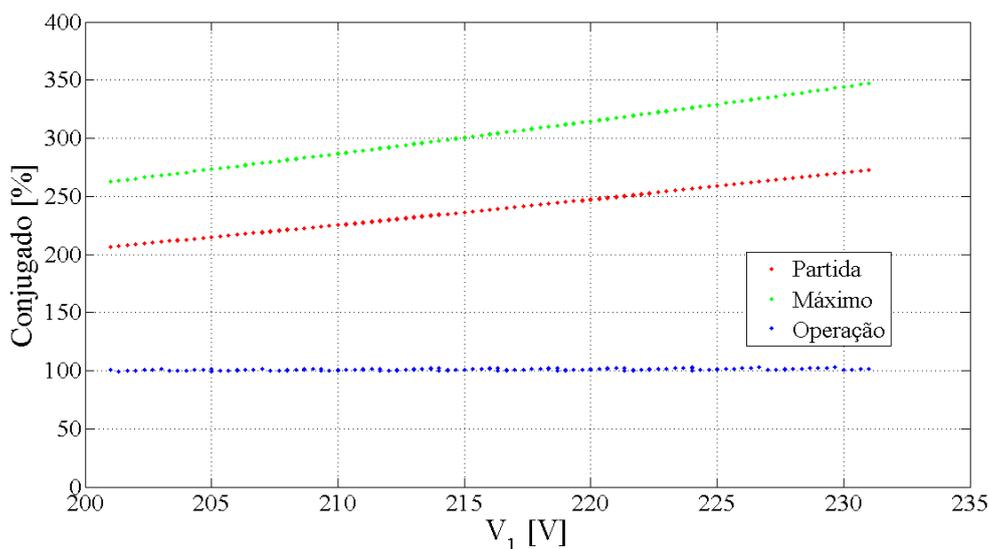


Figura 3.11 – Conjugados em função de V_1 com amplitudes de tensão variando.

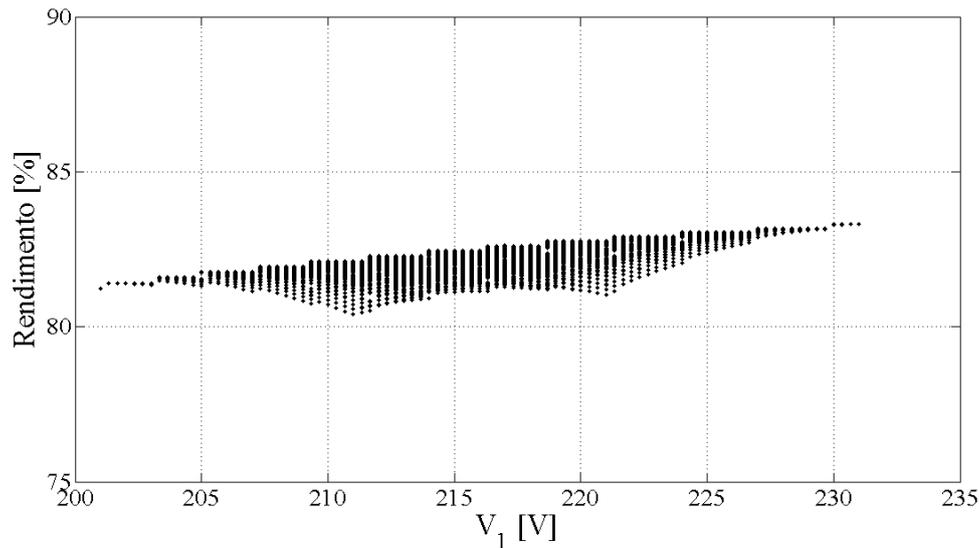


Figura 3.12 – Rendimento em função de V_1 com amplitudes de tensão variando.

Da Figura 3.11 nota-se, para os conjugados de partida e máximo, elevação nos valores dos conjugados para um aumento nos valores de V_1 . O conjugado de operação, por sua vez, pouco se altera com a variação de V_1 . Por exemplo, para $V_1=211$ V, onde ocorre o maior desequilíbrio e quando somente as amplitudes são modificadas, a faixa de variação dos conjugados de partida, máximo e de operação valem, respectivamente, 0,51%, 0,39% e 0,34%.

Na Figura 3.12, verifica-se a tendência de crescimento do rendimento com a elevação de V_1 . Para $V_1=211$ V e $V_1=221$ V, onde existem as maiores faixas de variação do VUF, ocorrem também as maiores faixas do rendimento: 1,73%.

As figuras 3.13 e 3.14 evidenciam o comportamento dos conjugados e do rendimento do MIT em função de V_1 para condições de desequilíbrio onde as amplitudes e os ângulos das tensões modificam-se (BD3).

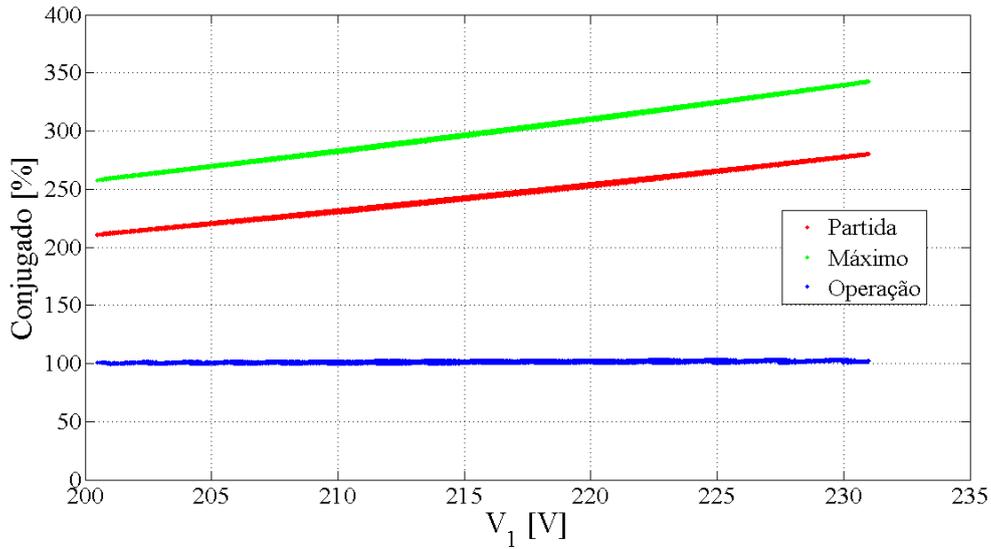


Figura 3.13 – Conjugados em função de V_1 com amplitudes e ângulos de tensão variando.

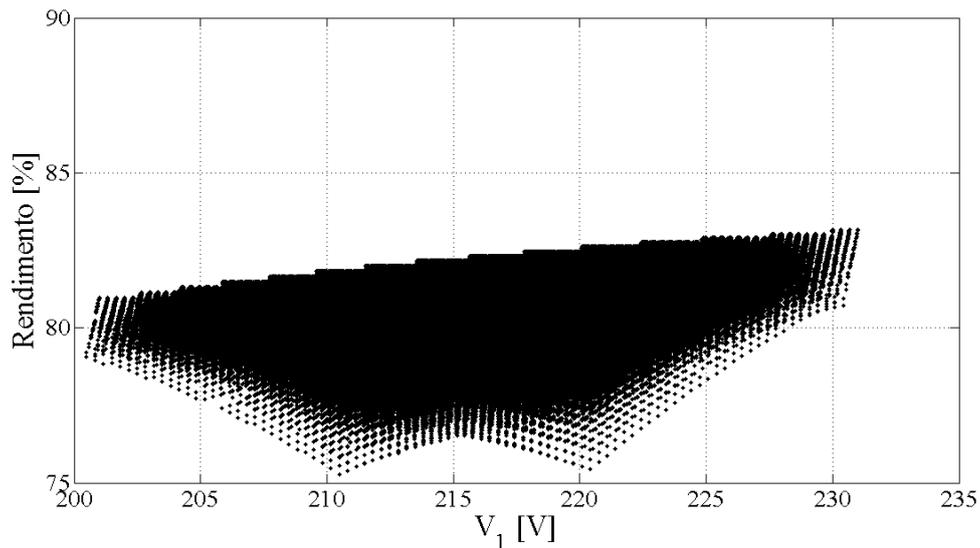


Figura 3.14 – Rendimento em função de V_1 com amplitudes e ângulos de tensão variando.

Da Figura 3.13, verificam-se comportamentos dos conjugados semelhantes ao observado na Figura 3.11. Por exemplo, para $V_1=221$ V, onde ocorre valor de desequilíbrio elevado, a faixa de variação para os conjugados de partida, máximo e de operação valem, respectivamente, 2,20%, 1,80% e 2,00%. Desse modo, pode-se comprovar a pouca influência das variações angulares nos resultados dos conjugados em função de V_1 .

Da Figura 3.14, observa-se a predisposição do rendimento em aumentar devido ao crescimento de V_1 . Porém, observa-se um aumento na faixa de variação desse parâmetro à medida que V_1 se torna mais distante dos limites de 201 V e 231 V. Nota-se, além disso, que a maior faixa de variação do rendimento, cerca de 7%, ocorre quando V_1 é próximo de 220 V.

Ao comparar as figuras 3.11 e 3.13, verifica-se a insignificância da variação angular nos valores dos conjugados. Porém, nota-se a diferença de 5% entre os rendimentos mínimos existentes nas figuras 3.12 e 3.14, ou seja, a variação angular possui uma influência maior no rendimento do que nos valores dos conjugados.

A Figura 3.15 exibe o conjugado de partida do BD3 em função de V_1 , apontando-se, discretizadamente, os valores de VUF. Esse conjugado foi escolhido por apresentar as maiores faixas de variação. A análise efetuada pode ser estendida para os conjugados máximo e de operação.

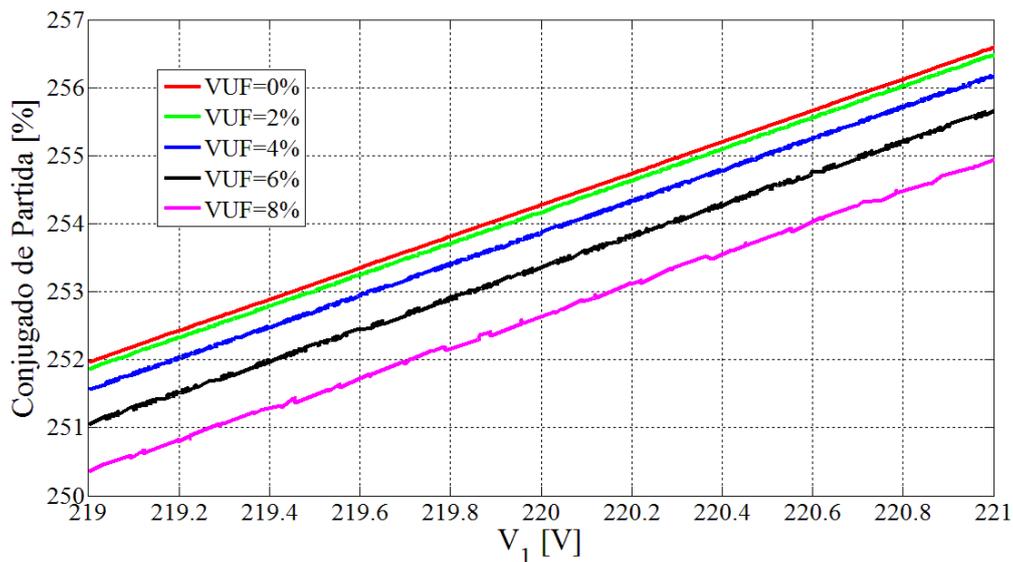


Figura 3.15 – Conjugado de partida em função de V_1 com VUF discretizado.

Verificam-se, na Figura 3.15, diversas linhas que dependem dos valores do VUF. Embora não seja possível identificar visualmente a faixa do conjugado de partida para $V_1=220$ V e VUF variando de 0% a 8%, seu valor vale 1,65%. Para determinado V_1 , os maiores valores de conjugado são relacionados a menores VUF e, em consequência disso, o emprego conjunto de V_1 e VUF culmina em uma maior precisão para os

conjugados. Na faixa 201–231 V, o conjugado aparenta ser proporcional ao V_1 , porém isto não é totalmente verdadeiro devido ao conjugado, em condições desequilibradas, estar pactuado com V_1 e V_2 . Objetivando-se estabelecer a influência da componente negativa no cálculo do conjugado do MIT, observa-se a possibilidade de negligenciar a contribuição da parcela negativa de tensão na análise de conjugados.

A Figura 3.16 evidencia, de modo análogo à Figura 3.15, o comportamento do rendimento perante o desequilíbrio de tensão.

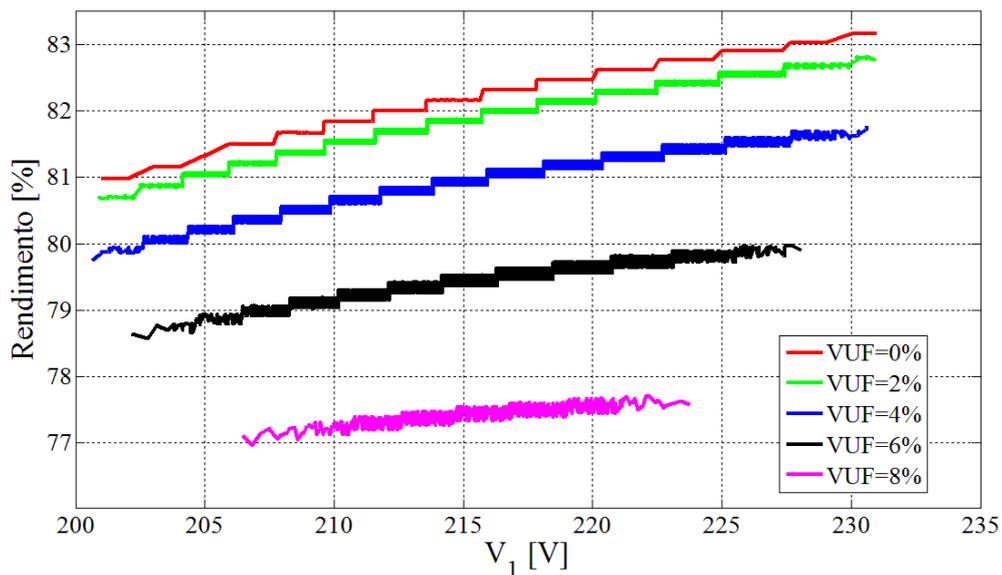


Figura 3.16 - Rendimento em função de V_1 com VUF discretizado.

Na Figura 3.16, a faixa de variação detectada, para o rendimento, quando $V_1=220$ V e VUF altera-se de 0% a 8%, é de 4,69%. Nesse sentido, comprova-se uma influência maior do distúrbio sobre esse parâmetro em relação aos conjugados. Nota-se, da faixa de variação mensurada para o rendimento, um aumento de aproximadamente três vezes em comparação à apontada da Figura 3.15.

A Figura 3.17 mostra as faixas de variações, em função de V_1 , para os conjugados e para o rendimento do MIT, aplicando amplitudes de 201 V a 231 V, e os ângulos das tensões de fase alterando-se de 0° a 5° (BD3).

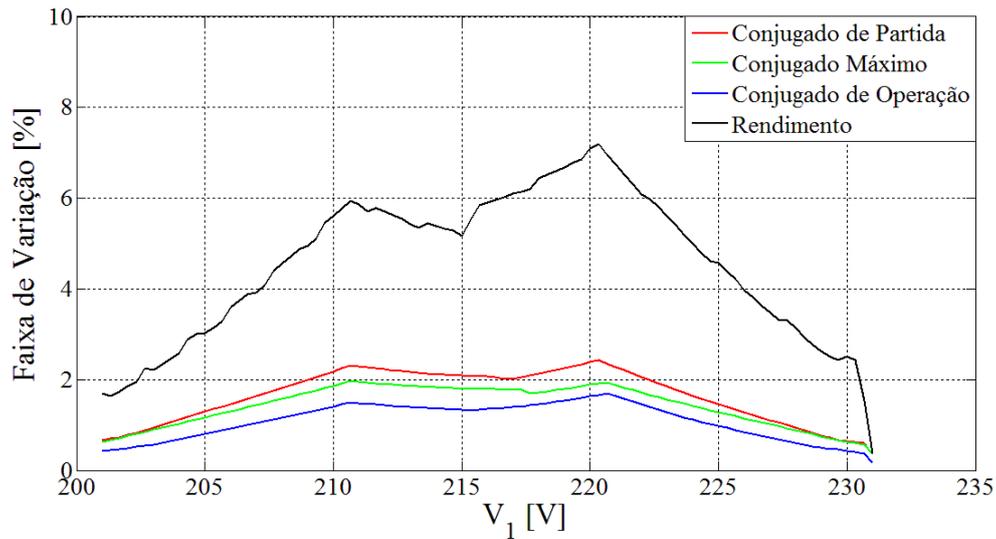


Figura 3.17 – Faixas de variação em função de V_1

Da Figura 3.17, observam-se faixas de variação, para os conjugados em função de V_1 , em torno de 2,4%. Além disso, a existência das maiores faixas de variação dos parâmetros mencionados ocorre para valores de V_1 próximos a 211 V e 221 V, justamente onde, na Figura 3.5, têm-se dois picos de VUF. Com isso, comprova-se a proporcionalidade do conjugado do MIT com o quadrado da corrente rotórica, conforme afirmado por (ANDRADE, 2012), e descarta-se a aplicação da parcela negativa da tensão para os conjugados avaliados devido à pequena influência nestes parâmetros.

Na continuidade da investigação sobre a Figura 3.17, a faixa de variação máxima do rendimento, ao determinar V_1 , vale 7,2%. Este valor confirma a abordagem realizada da Figura 3.16, onde se declara uma faixa de variação triplamente maior para o rendimento por comparação com os conjugados. Semelhante à análise efetuada para os conjugados, a maior faixa de variação do rendimento ocorre para V_1 próximo a 221 V, onde existe o maior desequilíbrio quando as amplitudes e os ângulos alteram-se.

3.3.1.3 – Um método alternativo para a quantificação do conjugado e do rendimento do MIT

Dado que V_1 é igual à média das amplitudes das tensões (V_M) para desequilíbrios onde somente as amplitudes modificam-se, conforme demonstrado na equação 3.1, V_M

simplifica os cálculos envolvidos na análise do desempenho do MIT em situações desequilibradas.

$$\begin{aligned}\bar{V}_1 &= \frac{1}{3} \cdot (V_A \angle 0^\circ + V_B \angle -120^\circ \cdot (1 \angle 120^\circ) + V_C \angle 120^\circ \cdot (1 \angle -120^\circ)) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (V_A + V_B + V_C) = \left(\frac{V_A + V_B + V_C}{3} \right) = V_M\end{aligned}\quad (3.1)$$

A Tabela 3.2 mostra a faixa de variação dos conjugados de partida, máximo, de operação e o rendimento do MIT submetido a diferentes condições de desequilíbrio com relação aos seguintes índices: VUF, VUF em conjunto com V_1 , V_1 e V_M . Os resultados foram divididos conforme os bancos de dados utilizados.

Tabela 3.2 – Maiores faixas de variações para os bancos de dados estudados (em %).

Banco de Dados	Casos	Índices	Conjugado de Partida	Conjugado Máximo	Conjugado de Operação	Rendimento
BD1	1	VUF=0%	66,20	84,20	3,80	2,08
	2	VUF=4% e $V_1=220V$	0,03	0,03	0,02	0,11
	3	$V_1=220 V$	0,47	0,35	0,31	1,59
	4	$V_M=220 V$	0,47	0,35	0,31	1,59
BD2	5	VUF=0%	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	VUF=4% e $V_1=220V$	0,03	0,03	0,01	0,03
	7	$V_1=220 V$	0,05	0,04	0,03	0,14
	8	$V_M=220 V$	1,96	2,10	0,98	2,11
BD3	9	VUF=0%	68,08	83,23	3,24	2,19
	10	VUF=4 % e $V_1=220V$	0,49	0,59	0,21	0,13
	11	$V_1=220 V$	2,38	1,89	1,98	7,09
	12	$V_M=220 V$	3,61	3,42	2,02	6,77
BD4	13	VUF=0%	68,09	83,23	3,25	2,19
	14	VUF=4 % e $V_1=220V$	0,26	0,31	0,12	0,13
	15	$V_1=220 V$	1,26	1,08	0,80	3,22
	16	$V_M=220 V$	1,89	1,69	1,16	4,28

Da Tabela 3.2, nos casos 5, 6, 7 e 8, onde as amplitudes são nominais e os ângulos alteram-se (BD2), observam-se variações nos conjugados praticamente iguais a zero e o rendimento alterado cerca de 2%. Para esse banco de dados, V_1 pouco se modifica com a mudança dos ângulos.

Na Tabela 3.2, nos casos 1, 9 e 13, onde se utiliza somente o indicador VUF, observa-se uma ampla variação dos conjugados. As maiores faixas de variações foram encontradas para a condição onde o $VUF=0\%$. De fato, para esta condição, embora não haja desequilíbrio de sequência negativa entre as amplitudes das tensões, existe a maior variação de V_1 . Ressalta-se, para $VUF=0\%$, a inexistência das componentes de sequência negativa e zero, ou seja, as amplitudes são iguais entre si. As condições onde o VUF é empregado juntamente com V_1 (casos 2, 6, 10 e 14) mostram mudanças pequenas, menores que 1%, nos conjugados e no rendimento.

Atestam-se, em situações onde somente V_1 ou V_M são conhecidos, as pequenas variações dos parâmetros avaliados quando comparadas ao emprego apenas do VUF. As maiores faixas de variações dos conjugados e do rendimento encontradas utilizando exclusivamente o V_M são 3,61% e 6,77%, respectivamente. Quando se adota unicamente o V_1 , as maiores faixas de variações dos conjugados e do rendimento são, respectivamente, 2,38% e 7,09% (Caso 11). Desse modo, as alterações semelhantes nos conjugados e no rendimento, pelo emprego de V_1 e V_M , são confirmadas.

Conforme supramencionado, caso sejam aceitáveis faixas de variação dos conjugados e do rendimento da ordem de 4% e 7%, respectivamente, torna-se possível substituir os modelos de sequência positiva e negativa por um único modelo monofásico equivalente alimentado por uma fonte de tensão cuja amplitude é igual à média das amplitudes das tensões desequilibradas.

3.3.1.4 – Resultados experimentais

Esta seção mostra os resultados experimentais obtidos com a utilização de um MIT de 0,75 kW, 220/380 V, com conexão delta. Nos testes em laboratório, acopla-se o motor a um gerador de corrente contínua (GCC) e variam-se as tensões terminais do motor com múltiplas combinações de desequilíbrios de tensão devido às alterações nas magnitudes

(BD1). Nos ensaios laboratoriais, os valores de tensão de linha variam na faixa 201-231 V e os ângulos permanecem nominais, ou seja, $V_1=V_M$. O MIT empregado nos testes possui conjugado de partida nominal igual a 11,4 N.m, o conjugado máximo, 11,0 N.m e o conjugado de operação, 4,1 N.m. O rendimento nominal constatado foi de 71,5%. As figuras 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21 expõem os resultados adquiridos para os três conjugados e o rendimento em função de VUF e V_M , respectivamente.

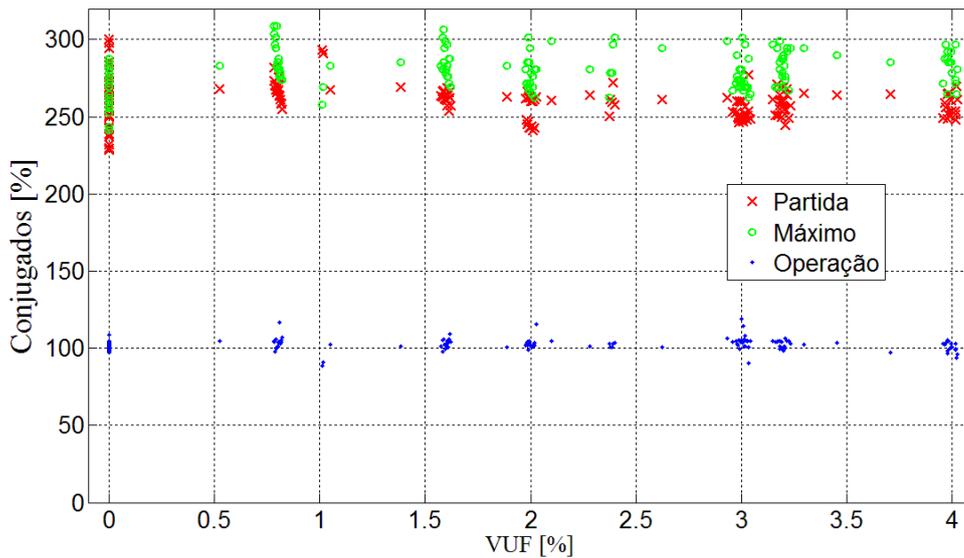


Figura 3.18 – Conjugados experimentais em função do VUF.

Da Figura 3.18, observam-se valores de VUF com elevadas faixas de variação para os conjugados de partida e máximo. Por exemplo, para valores de VUF iguais a 0%, 3% e 4%, as faixas de variação do conjugado de partida são 71,5%, 31,1% e 22,2%, respectivamente. Desse modo, fica evidenciado que quanto menores os valores de VUF, maiores são as variações do conjugado. A Figura 3.19 mostra o comportamento do rendimento em função de VUF.

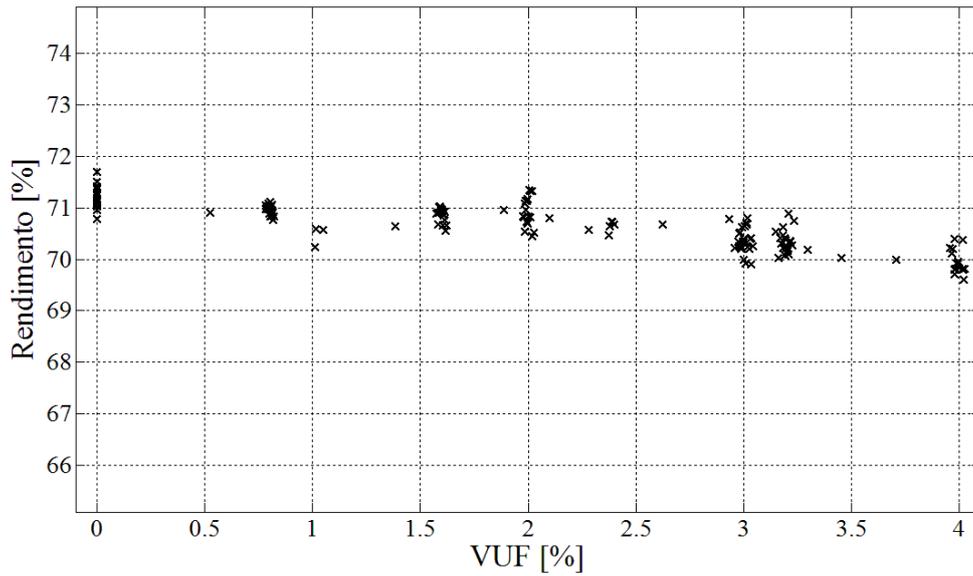


Figura 3.19 – Rendimento experimental em função do VUF.

Nota-se, da Figura 3.19, uma diminuição no rendimento para valores maiores de VUF. Porém, observa uma variação pouco significativa na eficiência quando inexistem variações angulares. Por exemplo, para VUF entre 0% e 4%, é verificada uma faixa de variação de cerca de 2% no rendimento.

A Figura 3.20 revela o comportamento dos conjugados em função de V_M em condições de desequilíbrio que contemplam alterações nos módulos das tensões e ângulos constantes.

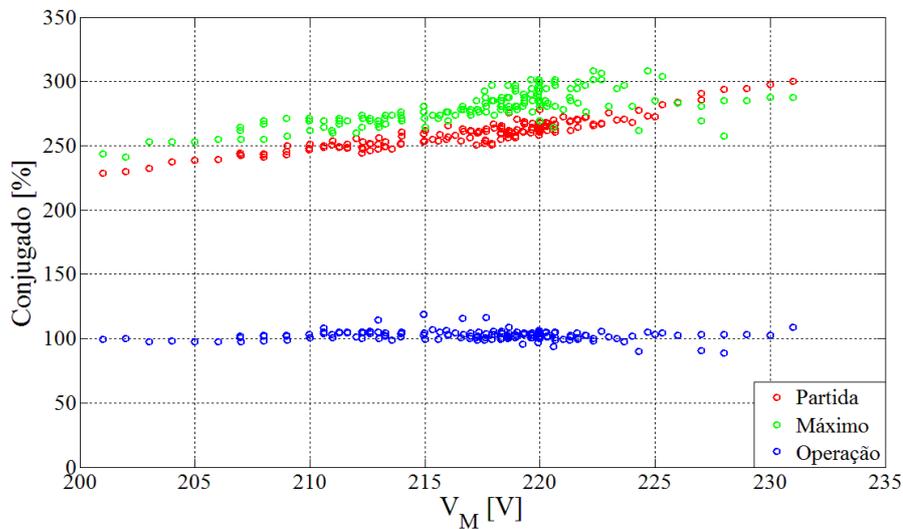


Figura 3.20 – Conjugados experimentais em função de V_M .

Da Figura 3.20, averigua-se a tendência dos conjugados de partida e máximo a aumentar seu valor com o crescimento de V_M . Nota-se, além disso, a redução das faixas de variações dos conjugados, para um determinado valor de V_M . Por exemplo, a maior faixa de variação dos conjugados para um $VUF=0\%$ vale 71,5%, e ao empregar $V_M=220$ V, tem-se 32,5%. Em relação ao conjugado de operação, as variações são pouco expressivas. A Figura 3.21 exhibe o rendimento do MIT em função de V_M .

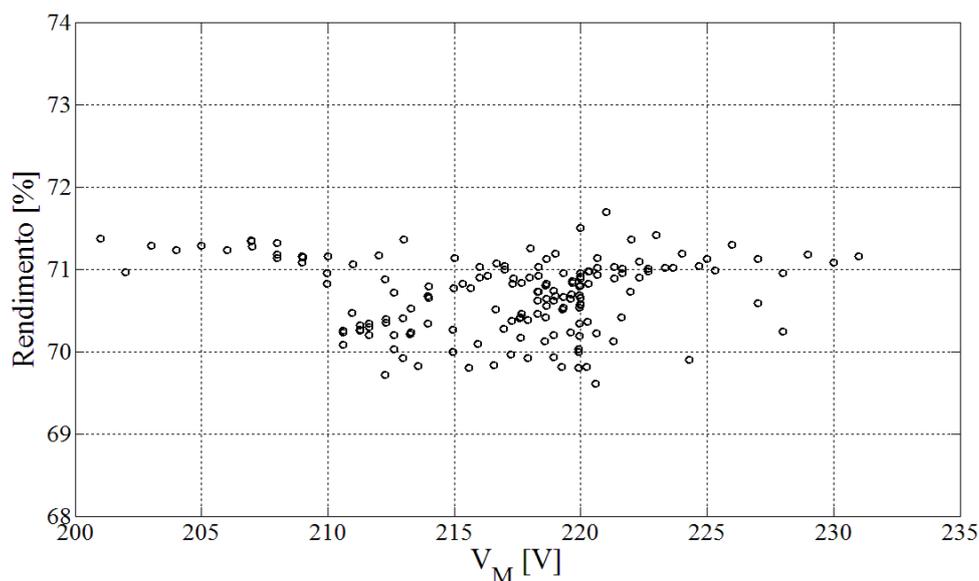


Figura 3.21 – Rendimento experimental em função de V_M .

Da Figura 3.21, verifica-se a ocorrência das maiores faixas de variação do rendimento para valores de V_M entre 210 V e 225 V. Nesta região, conforme observado na Figura 3.5, encontram-se os valores de VUF mais elevados de desequilíbrio. Além disso, independente do valor de V_M , constata-se uma tendência para a diminuição no valor do rendimento.

3.4 – ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MIT: V_M

Nesta seção, adota-se V_M na investigação do desempenho do MIT submetido a diversas condições de desequilíbrio. Considera-se, para tanto, simulações com variações nas amplitudes de 201 V a 231 V, e nos ângulos das tensões de 0° a 5° (BD3). Desse modo, objetiva-se com esta parte do trabalho:

- Apresentar as consequências da utilização do V_M na análise do desempenho do MIT;
- Avaliar a possibilidade de V_M ser empregado em substituição ao VUF na quantificação de desequilíbrio aplicado ao MIT; e
- Propor limites para V_M .

As simulações elaboradas neste estudo consideram perturbações angulares de até 5° nas fases e VUF de até 10%. A escolha desses valores deve-se aos patamares encontrados em medições reais efetuadas pela COPEL (BONELLI, 2012), onde se constatou alteração máxima nos ângulos de $4,3^\circ$ em uma das fases e VUF máximo igual a 3,85%. Logo, neste trabalho, extrapolam-se consideravelmente as condições de desequilíbrio mais severas encontradas pelas COPEL.

Com a finalidade de expor o comportamento dos conjugados e do rendimento do MIT, as Figuras de 3.22 a 3.25 exibem os resultados adquiridos desses parâmetros em função de VUF para alguns valores específicos de V_M .

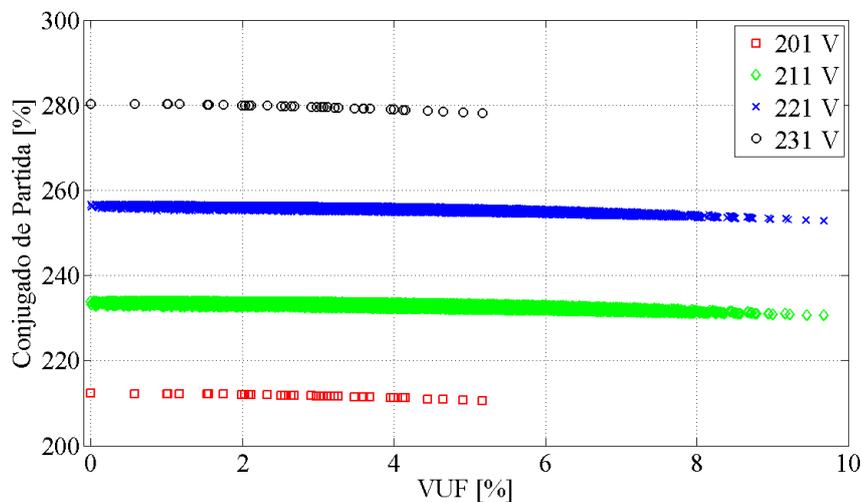


Figura 3.22 – Conjugado de Partida em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.

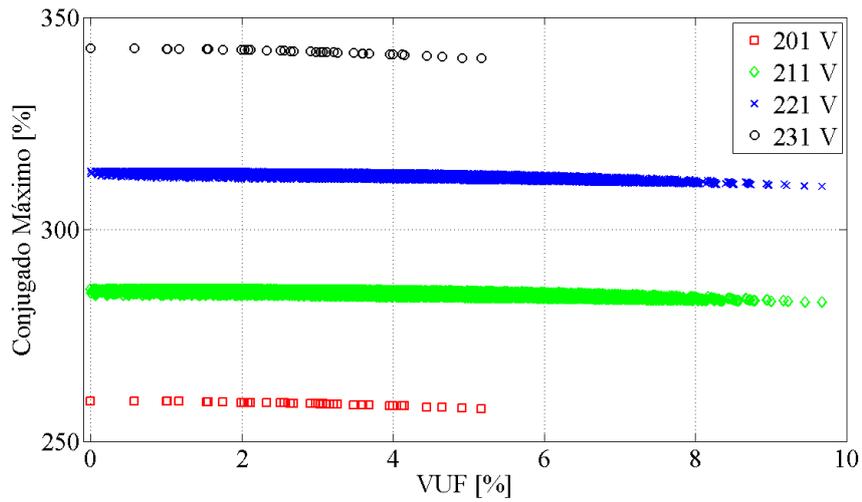


Figura 3.23 – Conjugado Máximo em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.

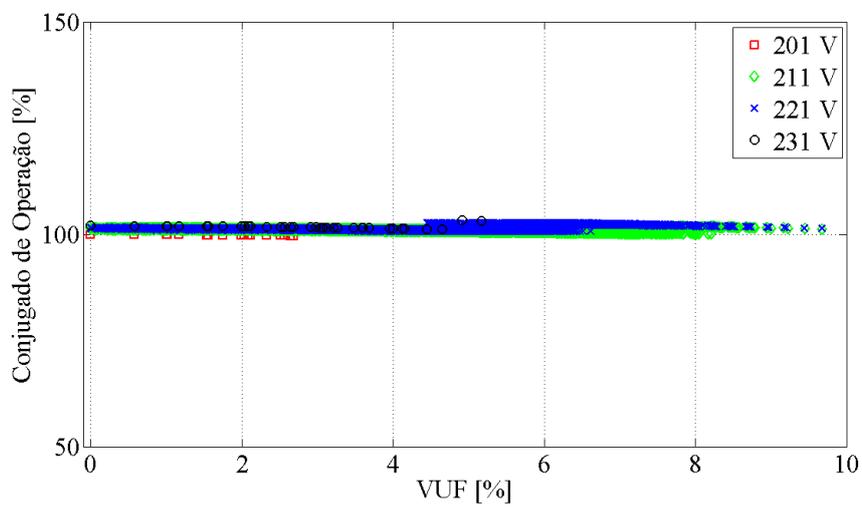


Figura 3.24 – Conjugado de Operação em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.

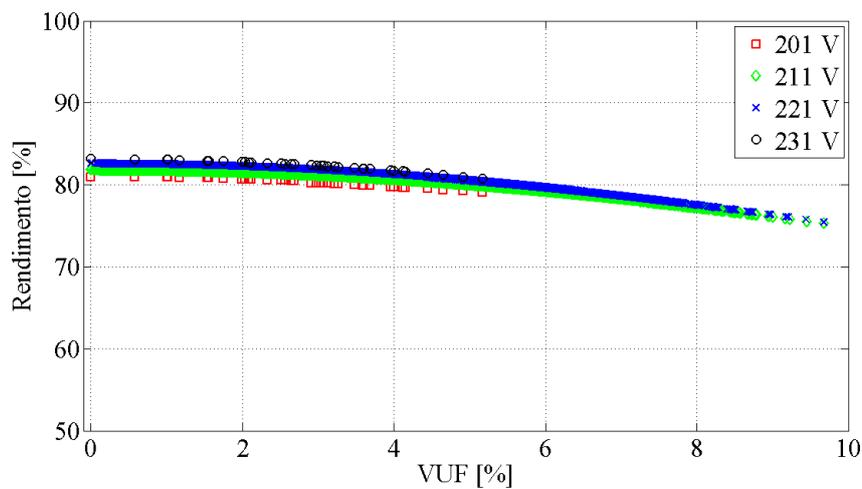


Figura 3.25 – Rendimento em função do VUF para V_M de 201 V a 231 V.

Das Figuras 3.22, 3.23 e 3.24, onde se avaliam os comportamentos dos conjugados do MIT em função do VUF submetido aos desequilíbrios, observam-se pequenas variações desses parâmetros para cada patamar de V_M . Para os conjugados de partida (Figura 3.22) e máximo (Figura 3.23), as maiores alterações ocorrem para $V_M=221$ V, com valores de 3,75% e 3,53%, respectivamente. Da Figura 3.24, onde se aborda o comportamento do conjugado de operação em função de VUF, a modificação máxima verificada ocorre para $V_M=231$ V e vale 2,10%.

Diferentemente dos conjugados, o comportamento do rendimento ilustrado na Figura 3.25 para distintos valores de V_M , apresenta, para V_M iguais a 211 V e 221 V, alterações com patamares próximos de 7%.

A Tabela 3.3 resume as variações encontradas para cada parâmetro avaliado nos níveis de tensão investigados.

Tabela 3.3 – Faixas de variação dos parâmetros ao considerar V_M específico.

V_M [V]	Conjugado de Partida (%)	Conjugado Máximo (%)	Conjugado de Operação (%)	Rendimento (%)
201	1,64	1,76	1,47	1,92
211	3,31	3,09	1,73	6,55
221	3,75	3,53	1,99	7,18
231	2,17	2,32	2,10	2,44

Da Tabela 3.3, as maiores variações dos conjugados de partida e máximo e do rendimento ocorrem quando V_M vale 221 V. Observam-se, para o mencionado valor de V_M , faixas de variação menores que 4% para os conjugados e variações em torno de 7% para o rendimento.

Com os resultados advindos da Tabela 3.3, ao escolher V_M na quantificação do desequilíbrio de tensão aplicado ao MIT, existe redução considerável nas faixas de variações dos conjugados, quando comparadas ao emprego de VUF. Porém, quanto ao rendimento, em função de V_M , a faixa de variação aumenta cerca de três vezes em relação àquelas adquiridas com o VUF, conforme mostra a Tabela 3.2.

Constatando-se a diminuição no valor do rendimento quando o desequilíbrio torna-se maior e com o intuito de manter um limite inferior para esse parâmetro, adota-se como referência a condição de alimentação em que V_M seja igual a 201 V, limite inferior da faixa 201–231 V, e VUF nulo. Nesta situação, o rendimento do MIT vale 80,97%.

Com o objetivo de verificar como o valor de V_M comporta-se em função de VUF para a faixa de rendimento entre 80,95% e 81%, a Figura 3.26 ilustra a mencionada condição.

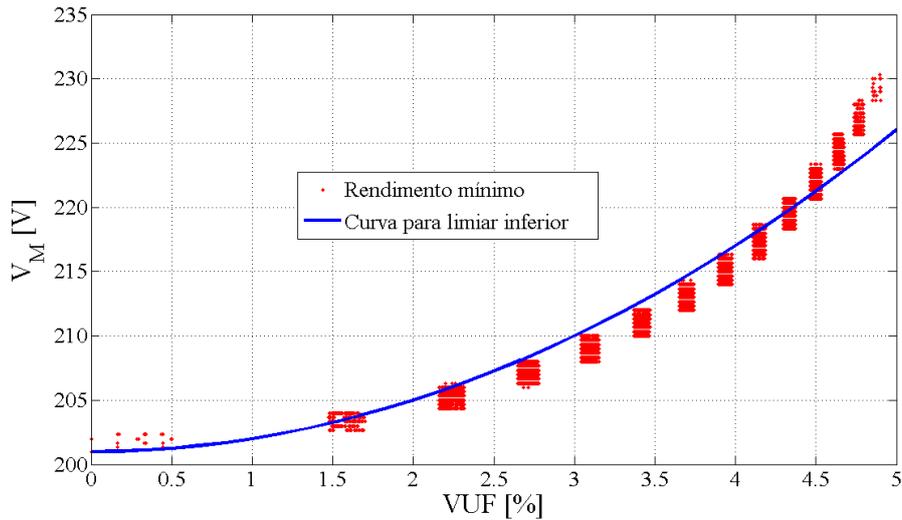


Figura 3.26 – V_M em função de VUF para rendimento mínimo.

Baseado na Figura 3.26, nota-se da curva para limiar inferior do rendimento um comportamento parabólico com ponto mínimo igual a 201 V. Observa-se, além disso, um aumento no valor de V_M para condições de desequilíbrio mais elevadas.

Da Figura 3.26, pode-se inferir que quando $V_M=210$ V e $VUF=2\%$, o rendimento do MIT é aceitável, pois está acima do limite inferior. Porém, caso exista um sistema elétrico com $V_M=210$ V e $VUF=4\%$, o rendimento do MIT será menor do que o limite inferior.

Ainda sobre a Figura 3.26, a curva para limiar inferior do rendimento sugerida é definida pela equação 3.2, onde a tensão média mínima de linha aplicada ao MIT depende do quadrado do VUF.

$$V_M = 201 + VUF^2 \quad (3.2)$$

Ao empregar a equação 3.2 para $VUF=2\%$, por exemplo, o V_M mínimo aceitável para a condição mínima do rendimento adotada como referência deve ser de 205 V e, para $VUF=3\%$, 210 V. Além disso, o limiar inferior indica garantia quanto ao rendimento mínimo em ambientes com desequilíbrios elevados. Desse modo, a proposta desenvolvida utiliza o VUF com o intuito de determinar a condição mínima do rendimento do MIT em ambientes desequilibrados.

Retomando a Figura 3.26, observam-se restrições quanto ao V_M mínimo para um rendimento com limite inferior. Porém, ainda que inexista prioridade do rendimento mínimo e apenas especifique-se V_M , as variações dos conjugados e do rendimento são bastante vantajosas em relação ao emprego somente do VUF, conforme constatado na Tabela 3.2.

3.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, compararam-se os modelos de representação do MIT no domínio do tempo, da frequência e por RNA. A modelagem por RNA, em três dos quatro parâmetros, revelou-se mais confiável e indicou os menores desvios padrão. Quanto aos erros médios, o maior obtido foi determinado pelo modelo no domínio da frequência (15,86%) e o menor pela RNA (0,65%), ambos para o rendimento do MIT.

Os resultados adquiridos com o modelo no domínio do tempo expuseram correlação significativa com os obtidos pelo modelo no domínio da frequência. Porém, os rendimentos encontrados por essas duas modelagens discordaram consideravelmente dos valores encontrados pelos experimentos. De fato, os resultados desses modelos foram sustentados pelos dados do fabricante.

Em seguida, identificaram-se as envoltórias de V_1 em função do VUF. Observou-se uma tendência em aumentar o fator de desequilíbrio quando existem variações angulares nas tensões de fase e, desse modo, análises semelhantes foram efetuadas para os conjugados e o rendimento do MIT, em função do VUF. Ao considerar o $VUF=0\%$, apontou-se variação máxima em torno de 84% para o conjugado máximo, indicando imprecisão notável desse índice na análise desempenho do MIT.

Examinando-se o comportamento dos conjugados do MIT quando V_1 é adotado em vez de VUF, observam-se reduções significativas nas faixas de variações desses parâmetros. Por exemplo, a faixa de variação do conjugado máximo quando VUF é empregado com amplitudes variando e ângulos constantes (BD1) é cerca de 2400% maior que a faixa de alteração desse parâmetro adquirida ao determinar $V_1=220$ V. Em contrapartida, ao incluir variações modulares e angulares das tensões (BD3) intensificou-se a faixa de variação do rendimento ao substituir VUF por V_1 .

Investigando-se a influência do VUF nos parâmetros do MIT ao determinar V_1 , notou-se, para o conjugado de partida com $V_1=220$ V, alteração máxima de 1,65% quando VUF variou de 0% a 8%. Quanto ao rendimento, para a mesma faixa de variação de VUF, a modificação desse parâmetro foi aproximadamente três vezes maior.

Uma tabela foi exibida com o intuito de identificar as variações adquiridas para diferentes bancos de dados com diversas condições de desequilíbrios. Apontaram-se na investigação do desempenho do MIT quatro índices para análise: i) VUF, ii) V_1 e VUF, iii) V_1 e iv) V_M . Verificou-se, para todos os parâmetros avaliados em condições de desequilíbrio onde as amplitudes e os ângulos modificam-se, resultados próximos para o emprego de V_M ou V_1 .

Em seguida, os resultados relativos aos experimentos laboratoriais foram exibidos, comprovando-se decréscimo na faixa de variação dos parâmetros do MIT em função de V_1 quando comparada em relação ao VUF.

Por fim, evidenciou-se o rendimento mínimo adequado, com $VUF=0\%$ e $V_1=201$ V, a fim de assegurar a condição inferior extrema desse parâmetro. Nesse sentido, caso deseje-se limitar o rendimento inferior, V_M deve ser adicionado ao quadrado do valor de VUF. Por outro lado, se o usuário do MIT admitir variações de até 7% no rendimento e 4% para os conjugados, a utilização somente de V_M é tolerável.

4 – CONCLUSÕES

Este capítulo visa abordar, de maneira ampla e sucinta, as conclusões sobre as análises efetuadas durante toda a dissertação. Além disso, elaboram-se propostas de trabalhos futuros que proverão continuidade à esta pesquisa.

O capítulo 1 expôs uma breve introdução sobre o assunto e contextualizou a investigação da dissertação. Dispôs-se, para tanto, de alguns estudos com questões pertinentes aos problemas a serem aprofundados pelo trabalho. Expuseram-se as justificativas e os objetivos do presente estudo, bem como as contribuições advindas do trabalho.

O capítulo 2, inicialmente, definiu o fenômeno da qualidade da energia intitulado desequilíbrio de tensão, em que módulos e ângulos de tensões modificam-se, e, em seguida, observou-se grande quantidade de causas e efeitos advindos deste distúrbio. Na continuidade, evidenciaram-se os métodos elaborados pela comunidade acadêmica para o cálculo do desequilíbrio, a saber: componentes simétricas, CIGRÉ, NEMA e IEEE. Nos cálculos desenvolvidos pelos dois primeiros métodos, verificaram-se valores idênticos de desequilíbrio e o método IEEE, atualmente, os adota em consequência de suas elevadas aceitações na área acadêmica e industrial. Quanto aos métodos NEMA e CIGRÉ, esses são limitados às tensões de linha, enquanto o método das componentes simétricas pode empregar as tensões de fase ou de linha em suas análises.

As normas internacionais IEC 61000-4-30 e IEEE 1159-2009 foram mencionadas, além da norma brasileira PRODIST, elaborada pela ANEEL. Verificou-se das atuais normas, a adoção de apenas um método de cálculo para desequilíbrio de tensão: o das componentes simétricas, tendo por índice de quantificação o VUF. Além disso, observou-se um limite desejável de desequilíbrio, pelo IEEE, de 1% no sistema elétrico, enquanto o PRODIST recomenda, nos barramentos do sistema, uma porcentagem igual ou inferior a 2%.

Ainda sobre o capítulo 2, exibiram-se diversos estudos relacionados ao estado da arte sobre desequilíbrio de tensão aplicado a motores de indução trifásicos. Trabalhos de diversos autores foram discutidos, apontando-se as contribuições mais significativas

voltadas a esta dissertação. A maioria das investigações efetuadas concluiu que o índice para determinação do desequilíbrio de tensão designado como VUF não é confiável na análise do comportamento do conjugado e do rendimento do MIT. Com base nesta conclusão, surgiu a ideia de desenvolver este estudo, o qual propôs averiguar o emprego da tensão de sequência positiva, ou da média das tensões, no estudo do desempenho do MIT em ambientes desequilibrados.

Ainda sobre o capítulo 2, descreveram-se os modelos do MIT para a análise objetivada, a saber: modelo no domínio do tempo, no domínio da frequência e por RNA. Com o intuito de verificar o comportamento do MIT submetido aos desequilíbrios de tensão em condições adversas, propostas de simulações computacionais foram efetuadas aplicando-se as modelagens supramencionadas. Igualmente, desenvolveram-se experimentos laboratoriais a título de comparação com os resultados adquiridos pelos modelos teóricos.

Adicionalmente, apresentou-se no capítulo 2 um modelo no domínio da frequência com rotor de gaiola dupla simplificado para gaiola simples para as simulações do MIT. A escolha deste modelo como referência dos estudos computacionais executados na avaliação do comportamento dos conjugados e do rendimento do MIT adveio de sua aplicação em mais de 600 motores. Depreendeu-se deste modelo de gaiola dupla, eficácia em sua execução computacional perante o desempenho dos motores reais.

No início do capítulo 3, exibiram-se os resultados relativos às propostas de análise do capítulo 2. Verificou-se nesta parte, a alta confiabilidade das RNA desenvolvidas para investigação do desempenho do MIT quando desequilíbrios de tensão são aplicados ao motor, com base nos valores obtidos sobre os erros médios e os desvios padrão gerados. O maior erro médio identificado foi obtido ao simular o rendimento pelo modelo no domínio da frequência, representando aproximadamente vinte e cinco vezes o erro médio encontrado pela RNA para o mesmo parâmetro. Os modelos no domínio do tempo e por RNA revelaram resultados bastante próximos entre si quando da simulação realizada para os conjugados de partida e de operação. Neste parâmetro, adquiriu-se o maior desvio padrão de RNA (2,4%), praticamente a metade dos desvios encontrados pelos demais modelos ao simular os conjugados de partida e máximo.

Os erros médios encontrados para o rendimento do MIT pelos modelos no domínio da frequência e do tempo foram baseados nos dados fornecidos pelo fabricante, enquanto a RNA baseou-se pelos resultados provenientes dos dados colhidos pelos experimentos laboratoriais. O fabricante do MIT assegurou rendimento de cerca de 80% para condição de alimentação nominal. Na parte prática, verificou-se rendimento de cerca de 70% para a mesma condição e, portanto, justificam-se as discrepâncias existentes para este parâmetro. Ao averiguar a hipótese de utilização das três modelagens teóricas, são permitidos seus empregos, desde que sejam aceitos erros, por exemplo, de até 10% para o caso do conjugado de operação.

Ainda no capítulo 3, estudaram-se os comportamentos dos conjugados e do rendimento do MIT em função do VUF e da componente de tensão de sequência positiva quando existem variações nos módulos e nos ângulos das tensões. Infere-se, da análise realizada, aumento considerável no fator de desequilíbrio quando os ângulos das tensões alteram. Porém, os valores dos conjugados e do rendimento possuem faixas de variação pequenas quando V_1 é empregado e VUF omitido. Computacionalmente, as faixas de variação dos parâmetros investigados são significativamente menores às encontradas nos experimentos.

Adicionalmente, no capítulo 3 propôs-se a substituição do V_1 por V_M , uma vez que as alterações angulares mais severas obtidas em medições reais nas fases não proporcionam modificações significativas dos conjugados. Uma proposta de avaliação do comportamento dos conjugados e do rendimento foi efetuada considerando variações simultâneas nas amplitudes e nos ângulos das tensões. Constatou-se, de fato, uma influência maior do desequilíbrio de tensão sobre o rendimento. Conforme relatado pelas simulações realizadas, para um mesmo valor de V_M , este parâmetro sempre diminui com o aumento do VUF. De acordo com os estudos realizados, caso aceitem-se variações de 4% nos conjugados e 7% no rendimento ao determinar um valor de V_M , possibilita-se a substituição dos modelos de sequência positiva e negativa por um único modelo monofásico equivalente alimentado por uma fonte de tensão cuja amplitude é igual à média das amplitudes das tensões desequilibradas. Neste sentido, dispondo de V_M em conjunto com VUF, a imposição de um limiar inferior para o rendimento tornou-se necessária, caso erros de até 7% para esse parâmetro não sejam admitidos.

Certificou-se do estudo pesquisado a hipótese de negligenciar o índice VUF na análise do desempenho do MIT, sob o ponto de vista dos conjugados e do rendimento. Porém, adota-se esse índice em conjunto com V_M , caso as variações de até 7% nos parâmetros do MIT em condições desequilibradas não sejam aceitáveis.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se:

- Investigar experimentalmente o comportamento dos conjugados e do rendimento do MIT em situações desequilibradas com ângulos alterando $\pm 5^\circ$ em duas tensões de fase;
- Averiguar condições de desequilíbrio em que as faixas de tensão são maiores que as investigadas neste trabalho;
- Avaliar as potências de entrada e de saída do MIT, bem como a corrente exigida para a operação do MIT quando em condições desequilibradas de tensão para diversos níveis de tensão;
- Reconhecer a influência da sequência zero no comportamento do MIT; e
- Conferir experimentalmente o rendimento mínimo determinado pela curva do limiar inferior proposta empregando-se motores com potências diferentes.

5 – Referências Bibliográficas

- ANDRADE, D. A.. Máquinas de Indução - Características Operacionais. Disponível em: <http://www.eletrica.ufu.br/pastas/Controle_de_motores/Maq_Inducao_reg_permanente.pdf>. Acesso em: abril de 2012.
- ANEEL, Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema e Distribuição de Energia Elétrica. Brasília. pp. 41, 2011.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST; Módulo 8 (Revisão 4) – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, pp. 72, 2012.
- ANWARI, M., HIENDRO, A. (2010). “New Unbalance Factor for Estimating Performance of a Three-Phase Induction Motor With Under- and Overvoltage Unbalance”. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no 3.
- BARBI, I. (1985). “Teoria Fundamental do Motor de Indução”. Florianópolis: Editora da UFSC.
- BONELLI, A. F., AOKI A. R., TEIXEIRA M. D., LANGNER A. L., SOUZA W. E., FILIPINI F. A., NELHS R. A. (2012). “Panorama do Impacto da Qualidade da Energia Elétrica Aplicada aos Motores das Indústrias do Estado do Paraná”. In: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia, Brasil.
- BRANCO, W. C. (2010). “Inteligência artificial – Notas de aula”. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/54169144/ApostilaIA>>. Acesso em: outubro de 2012.
- FAIZ, J., EBRAHIMPOUR, H., PILLAY P. (2004). “Influence of Unbalanced Voltage on the Steady-State Performance of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor.” In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 4.
- FAIZ, J., EBRAHIMPOUR, H. (2005). “Precise Derating of Three-Phase Induction

Motor with Unbalanced Voltages”, In: Conference Record of the 2005 IAS Annual Meeting, vol. 1, pp. 481–491.

FAIZ, J., EBRAHIMPOUR, H., PILLAY P. (2006). “Influence of unbalanced voltage supply on efficiency of three phase squirrel cage induction motor and economic analysis”. In: Energy Conversion and Management, vol. 47, pp. 289–302.

FERREIRA Filho, A. L. (2008). “Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão”, Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, pp. 163.

GNACINSKI, P. (2008). “Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine”. In: Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 761–770.

GOEDTEL, A. (2003). “Estimativa de conjugado de carga aplicado em eixos de motores de indução trifásicos através de redes neurais artificiais”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de São Paulo, Bauru, Brasil, pp. 141.

GOEDTEL, A., Silva, I. N., Serni, P. J. A. (2006). “Uma abordagem neural para estimativa de conjugado em motores de indução”. In: Revista Controle & Automação, vol.17 no.3.

GOEDTEL, A. (2007). “Estimador Neural de Velocidade Para Motores de Indução Trifásicos”. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, pp. 159.

GONÇALVES, J. A. R. (2008). “Estudo do comportamento do motor de indução trifásico sujeito a perturbações na qualidade da energia”. Dissertação de Mestrado, Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Leiria, Portugal, pp. 190.

- GUDWIN, R. R. (1997). “Linguagens de Programação”. Disponível em: <http://www.jairo.pro.br/lpi/ling_prog.pdf>. Acesso em: outubro de 2012.
- KAWAPHARA, M. K., VASCONCELLOS, A. B., APOLÔNIO, R., TECHI, D. A. V., ARANTES, R. B., SILVA, R. P. B. e LIMA, R. L. (2008). “Análise do comportamento da energia elétrica no acionamento de uma bomba centrífuga em função da variação da vazão através do estrangulamento de uma válvula ou via inversor de frequência”. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, Brasil.
- KERSTING, W. H. e PHILLIPS, W. H. (1997). “Phase Frame Analysis of the Effects of Voltage Unbalance on Induction Machines”. In: IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 415–420.
- KINI, P. G. e BANSAL, R. C. (2007). “A Novel Approach Toward Interpretation and Application of Voltage Unbalance Factor”. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no 4, pp. 2315–2322.
- KINI, P. G. e BANSAL, R. C. (2010). “Effect of Voltage and Load Variations on Efficiencies of a Motor-Pump System”. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no 2, pp. 287–292.
- LEE, C. Y., CHEN, B. K., LEE, W. J., HSU, Y. F. (1997). “Effects of Various Voltages on the Operation Performance of an Induction Motor under the Same Unbalance Factor Condition”. In: Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, pp. 51–59.
- LEE, C. Y. (1999). “Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor”. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no 2, pp. 202–208.
- LIMA, J. D. (2002). “Elementos básicos de programação em Matlab”. Disponível em: <http://www.4shared.com/office/9uUO12JI/Jos_Donizetti_de_Lima_-_Matlab.html>. Acesso em: abril de 2012.

- MATOS, J. M. (2012). “Avaliação dos Efeitos do Desequilíbrio de Tensão Sobre os Motores de Indução Trifásicos”. Trabalho de Graduação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, pp. 79.
- MENDES, A. M. S., QUISPE, E. C., FERNÁNDEZ, X. M. L., CARDOSO, A. J. M. (2010). “Influence of the Positive Sequence Voltage on the Temperature of Three-Phase Induction Motors”. In: XIX International Conference on Electrical Machines, Roma, Itália.
- MENOTTI, D. (2011). “Reconhecimento de Padrões – *Multi-Layer Perceptron* (MLP)”. Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/menotti/rp112/>>. Acesso em: abril de 2012.
- NEMA Std. Publication MG1–1987.
- OLIVEIRA, J. P. J. (2012). “Um estudo da influência do intervalo de agregação nos métodos de quantificação do desequilíbrio de tensão”. Trabalho de Graduação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, pp. 48.
- PEDRA, J. (2006). “Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation”. In: IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, no 2, pp. 137–146.
- PEDRA, J. (2008). “On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic”. In: IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no 4., pp. 1709–1718.
- PILLAY, P. e HOFMANN, P. (2001). “Derating of Induction Motors Operating with a Combination of Unbalanced Voltages and Over- or Undervoltages”. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, pp. 1365–1371.

- PILLAY, P. e MANYAGE, M. (2006). “Loss of Life in Induction Machines Operating With Unbalanced Supplies”. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 4, pp. 813–822.
- PIOVESAN, S. K. B. (2012). Funções de ativação e classificação das RNA. Disponível em: <<http://www.fag.edu.br/professores/suzan/Redes%20Neurais%20e%20Logica%20Fuzzy/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.
- QUISPE, E.C., FERNÁNDEZ, X. M. L., MENDES, A.M.S., CARDOSO, A. J. M., PALACIOS, J.A. (2011). “Experimental study of the effect of positive sequence voltage on the derating of induction motors under voltage unbalance”. In: IEEE International Electric Machines & Drives Conference, pp. 908–912.
- REED, H. R. e KOOPMAN, R. J. W. (1936). “Induction motors on unbalanced voltages”. In: AIEE Transactions, vol. 55, pp. 1206–1213.
- SIDDIQUE, A., YADAVA, G. S. e SINGH, B. (2004). “Effect of Voltage Unbalance on Induction Motors”. In: Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.26-29, Indianápolis, EUA.
- SILVA, R. M. (2005). “Redes Neurais Artificiais aplicadas à Detecção de Intrusão em Redes TCP/IP”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 190.
- SOUTO, O. C. N. (2001) “Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, pp. 323.
- TEIXEIRA Neto, F. A. (2010). “Geração de perfis de cargas industriais mediante o controle PWM da tensão de campo do gerador de corrente contínua”. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

- WALLACE, A., JOUANNE, A., ANDREWS, P., WOHLGEMUTH, C., WAINRIGHT, G. (1997). "The effects of voltage and winding abnormalities on the measured performance of induction motors". In: Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, vol. 1, pp. 196–200.
- WANG, Y. J. (2000). "An Analytical Study on Steady-state Performance of an Induction Motor Connected to Unbalanced Three-phase Voltage". In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, pp. 159–164.
- WANG, Y. J. (2001). "Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor". In: IEEE Power Engineering Review, vol. 21, no. 9, pp. 270–275.
- WILLIAMS, J. E. (1954). "Operation of Three-phase Induction Motors on Unbalanced Voltages," AIEE Transactions, pt. 111- A, Paver Apparatus and Systems, vol. 73, pp. 125–133.
- WOLL, R. F. (1975). "Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors". In: IEEE Transaction on Industry Applications, vol. L4-11, no. 1, pp.38–42.
- XAVIER, P. A. C., Ferreira Filho, A. L., Oliveira, M. A. G. (2005). "Avaliação das características elétricas de reatores eletrônicos utilizados em lâmpadas fluorescentes tubulares". In: VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SBQEE/>>. Acesso em: outubro de 2012.
- ZAMBIASI, S. P. (2011). "Histórico das Redes Neurais". Disponível em: <<http://www.gsigma.ufsc.br/~popov/aulas/rna/historico.html>>. Acesso em: outubro de 2012.

APÊNDICES

A – FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Este apêndice visa fornecer informações mais detalhadas e o histórico sobre o Matlab, Matlab/Simulink e as Redes Neurais Artificiais.

A.1 – MATLAB®

Conforme (LIMA, 2002), o Matlab pode ser usado para:

- Cálculos matemáticos;
- Desenvolvimento de algoritmos;
- Modelagem, simulação e visualização de protótipos;
- Análise, exploração e visualização de dados;
- Gráficos científicos e de engenharia; e
- Desenvolvimento de aplicações, incluindo a elaboração de interfaces gráficas com o usuário.

Essa ferramenta é utilizada por vários membros da comunidade acadêmica. Dentre os trabalhos que envolvem o motor de indução trifásico, podem ser citados (XAVIER, 2005), (ANWARI, 2010) e (OLIVEIRA, 2012).

A.2 – MATLAB/SIMULINK®

Conforme (GUDWIN, 1997), o Simulink opera em conjunto com o Matlab, de modo a permitir a especificação de diferentes sistemas dinâmicos, determinar as condições e parâmetros da simulação, e efetivamente executá-la. Essa ferramenta permite também a análise dos resultados da simulação.

O Simulink provê uma biblioteca de módulos básicos, que podem ser utilizados na elaboração de diagramas que especificam o sistema, a simulação e a análise a ser efetuada. Esses módulos são interconectados e determinam o relacionamento com outros. Módulos sofisticados podem ser construídos e transformados em módulos simples, podendo então ser referenciados por outros programas. Além disso, também é

possível que novos módulos sejam construídos, a partir do Matlab, ou então em linguagem C.

Dentre os trabalhos voltados ao estudo de motores de indução trifásicos e realizados com Simulink, podem ser citados (TEIXEIRA, 2010), (GOEDTEL, 2007), (GOEDTEL, 2006), (SIDDIQUE, 2004) e (GOEDTEL, 2003).

A.3 – REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA)

Uma RNA pode ser definida como um sistema matemático que possui um aprendizado conforme o treinamento a qual é submetida pelas entradas e saídas de valores. A maior vantagem das RNA está baseada na habilidade em aproximar relações não lineares (GOEDTEL, 2006).

A rede neural artificial possui esse nome, pois se assemelha à estrutura de um cérebro, que aprende conforme é estimulado. A estrutura da RNA compreende basicamente neurônios e ligações entre eles. Um neurônio é a unidade de processamento da rede neural artificial e as ligações entre eles são ajustadas à medida que a rede neural é treinada para uma determinada saída desejada.

Conforme (ZAMBIASI, 2011), as Redes Neurais Artificiais surgiram em 1943, quando o neurofisiologista Warren McCulloch e o matemático Walter Pitts, da Universidade de Illinois, fizeram uma analogia entre as células nervosas e o processo eletrônico num artigo publicado no *Bulletin of Mathematical Biophysics* com o título: *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*.

Em 1956, na Primeira Conferência Internacional de Inteligência Artificial, foi apresentado um modelo de rede neural artificial por um pesquisador da IBM, Nathaniel Rochester. Seu modelo consistia numa simulação de centenas de neurônios interconectados por meio de um sistema que verificaria como a rede responderia aos estímulos ambientais.

Já em 1959, Frank Rosenblatt, da Universidade de Cornell, criou uma rede de múltiplos neurônios do tipo discriminadores lineares e a batizou de rede *perceptron*. Esse tipo de rede neural é utilizado nesta dissertação.

A.3.1 – O neurônio artificial

A Figura A.1 mostra o modelo de um neurônio artificial.

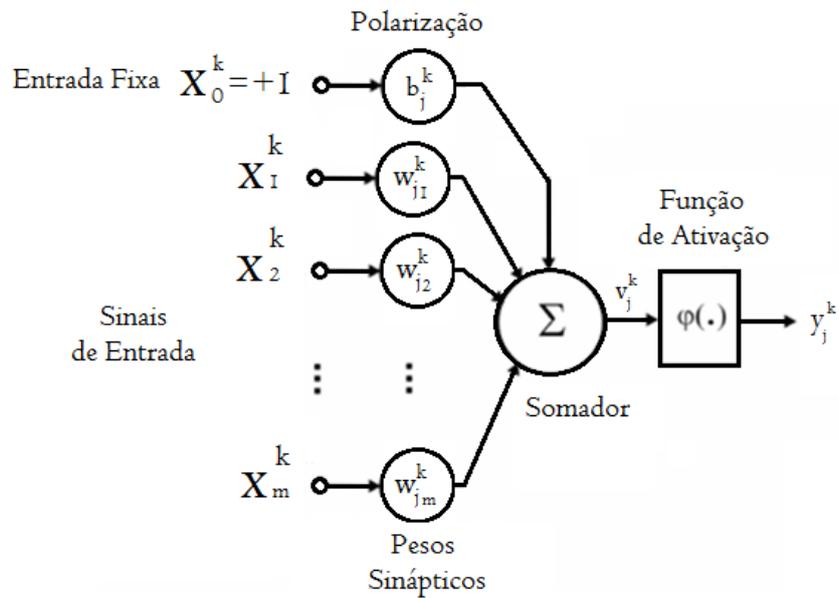


Figura A.1 – Modelo de um neurônio artificial (MATOS, 2012).

Com base na Figura A.1, é possível identificar:

- Um conjunto de sinapses, ou conexões, caracterizado por um peso sináptico w_{jm}^k , que indica a importância do sinal X_m^k na determinação da saída do neurônio j da camada k ;
- Um somador Σ , o qual tem a função de realizar uma combinação linear dos sinais de entrada ponderados pelos respectivos pesos sinápticos de suas ligações;
- O potencial de ativação, v_j^k , da k -ésima camada do neurônio j ;
- Uma função de ativação $\varphi(\cdot)$ para limitar a amplitude da saída num intervalo normalizado geralmente de $[0,1]$ ou $[-1,1]$;

- O sinal de saída y_j^k da k-ésima camada do neurônio j; e
- A polarização, ou *bias*, representada por b_j^k , cujo efeito é elevar ou reduzir a entrada da função de ativação, dependendo se ele é positivo ou negativo, respectivamente.

Conforme (PIOVESAN, 2012), as funções de ativação são divididas, basicamente, em quatro tipos: linear, rampa, degrau e sigmoide, respectivamente, mostrados na Figura A.2.

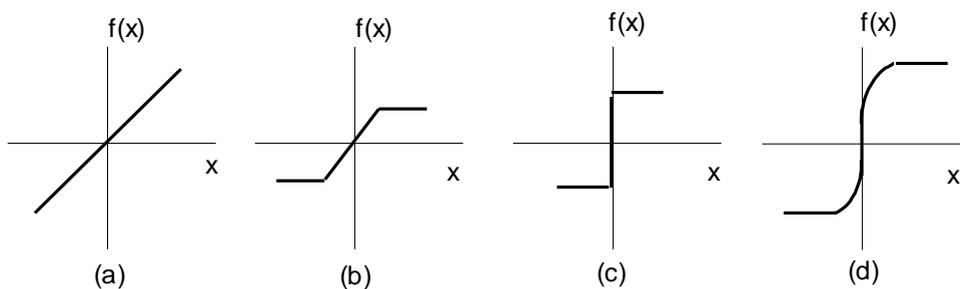


Figura A.2 – Tipos de função de ativação

A.3.2 – Arquitetura e modelo de RNA

Conforme (BRANCO, 2010), as RNA podem ser classificadas em diretas (*feedforward*) e recorrentes (*feedback*). Na primeira classe, a saída de um neurônio não pode ser utilizada como entrada de nenhum neurônio de sua própria camada ou de camadas anteriores, fato esse permitido nas redes da segunda categoria. Modelos de RNA foram construídos com base nessas duas classes, sendo um dos mais comuns o *perceptron* multi-camadas, baseado na classe *feedforward*. Esse modelo é uma rede direta cujos neurônios são do tipo MCP (multicamadas *perceptron*) e se conectam apenas com os neurônios da camada seguinte. Três tipos de neurônios são encontrados nesse modelo:

- As unidades sensoriais ou neurônios de entrada: recebem os sinais de entrada e os repassam para a rede;
- As unidades associativas ou neurônios internos: conectam os neurônios de entrada e de saída; e

- As unidades de resposta ou neurônios de saída: enviam para o usuário as respostas geradas pela rede.

A aprendizagem de uma RNA ocorre por meio do treinamento, com base em um conjunto de exemplos transmitidos à rede. Treinar uma RNA consiste em ajustar seus pesos sinápticos para que se obtenha a saída desejada quando um conjunto de valores de entrada é apresentado. Os algoritmos de treinamento da RNA podem ser divididos em três grupos: por reforço, não supervisionado e supervisionado:

A.3.2.1 – Treinamento por reforço

Pode ser visto como um caso particular de treinamento supervisionado, pois utiliza tanto as entradas quanto as saídas durante o treinamento. A principal diferença é que o treinamento supervisionado mede o erro entre a saída desejada e a gerada pela rede para efetuar as alterações. No treinamento por reforço, não é calculado o valor do erro, apenas é informado para a rede se a resposta está correta ou não.

A.3.2.2 – Treinamento não supervisionado

Neste caso, apenas os valores da entrada são passadas para a rede, a qual ajusta seus pesos para que entradas semelhantes gerem saídas semelhantes. É importante destacar que deve haver redundância nos dados de teste para a utilização do treinamento não supervisionado.

A.3.2.3 – Treinamento supervisionado

As técnicas deste grupo possuem em comum o fato de que, durante o treinamento, são passados pares para a rede contendo as entradas e as saídas desejadas, para que a rede possa fazer o ajuste de seus pesos pela correção de erros. Um dos exemplos é o algoritmo de retropropagação (*backpropagation*) utilizado pelo *perceptron* multicamadas. Esse tipo de treinamento é utilizado nesta dissertação.

B – VALORES UTILIZADOS

Este apêndice revela os valores empregados nas simulações e nos experimentos laboratoriais. A ordem é crescente com V_1 de 201 V a 231 V.

Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	Vab [V]	Vbc [V]	Vca [V]	V_1 [V]	VUF [%]
116,05	116,05	116,05	201,00	201,00	201,00	201,00	0,00
116,62	116,62	116,62	202,00	202,00	202,00	202,00	0,00
117,20	117,20	117,20	203,00	203,00	203,00	203,00	0,00
117,78	117,78	117,78	204,00	204,00	204,00	204,00	0,00
118,36	118,36	118,36	205,00	205,00	205,00	205,00	0,00
118,93	118,93	118,93	206,00	206,00	206,00	206,00	0,00
120,68	122,96	114,86	209,87	210,03	201,16	206,98	2,02
116,03	124,10	118,37	203,95	212,93	204,18	206,98	2,00
119,51	119,51	119,51	207,00	207,00	207,00	207,00	0,00
121,25	123,54	115,44	210,87	211,03	202,16	207,98	2,01
118,94	124,68	116,61	208,11	213,05	202,90	207,98	2,00
120,09	120,09	120,09	208,00	208,00	208,00	208,00	0,00
121,83	124,12	116,01	211,87	212,03	203,16	208,98	2,00
119,52	125,25	117,19	209,11	214,05	203,90	208,98	1,99
120,67	120,67	120,67	209,00	209,00	209,00	209,00	0,00
122,41	124,70	116,59	212,87	213,03	204,16	209,98	1,99
120,10	125,83	117,77	210,11	215,05	204,90	209,98	1,98
121,24	121,24	121,24	210,00	210,00	210,00	210,00	0,00
118,95	129,24	116,60	209,80	219,39	202,97	210,61	3,19
124,72	125,85	114,23	216,51	213,75	201,89	210,62	3,04
121,27	128,11	115,42	212,56	217,35	202,23	210,62	3,02
119,52	127,54	118,35	209,95	217,65	205,49	210,97	2,37
121,82	121,82	121,82	211,00	211,00	211,00	211,00	0,00
124,72	127,00	114,22	216,93	215,33	201,91	211,28	3,23
122,43	128,12	115,41	214,15	217,34	202,65	211,29	3,01
118,94	129,25	117,77	209,79	219,82	204,53	211,29	2,99
119,53	129,82	117,18	210,80	220,39	203,97	211,61	3,18

Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	Vab [V]	Vbc [V]	Vca [V]	V ₁ [V]	VUF [%]
125,29	126,43	114,81	217,51	214,75	202,89	211,62	3,03
121,85	128,69	116,00	213,56	218,35	203,23	211,62	3,00
122,40	122,40	122,40	212,00	212,00	212,00	212,00	0,00
119,54	132,08	116,01	211,64	223,14	202,47	212,25	3,98
125,30	127,57	114,80	217,93	216,33	202,91	212,28	3,21
123,00	128,70	115,99	215,15	218,34	203,65	212,29	3,00
119,52	129,82	118,35	210,79	220,82	205,53	212,29	2,97
120,11	130,39	117,76	211,80	221,39	204,97	212,61	3,16
125,87	127,01	115,39	218,51	215,75	203,89	212,62	3,01
122,43	129,27	116,57	214,56	219,35	204,23	212,62	2,99
124,16	128,71	115,98	216,74	218,34	204,07	212,95	3,03
121,85	129,84	117,16	213,97	220,36	204,81	212,95	3,01
122,98	122,98	122,98	213,00	213,00	213,00	213,00	0,00
120,12	132,66	116,59	212,64	224,14	203,47	213,25	3,96
123,58	129,28	116,56	216,15	219,34	204,65	213,29	2,99
120,10	130,40	118,92	211,79	221,82	206,53	213,29	2,96
126,47	129,87	113,59	220,40	219,05	201,83	213,58	4,02
124,73	129,29	116,55	217,74	219,34	205,07	213,95	3,02
122,42	130,41	117,74	214,97	221,36	205,81	213,95	3,00
123,56	127,00	120,07	215,28	217,46	209,30	213,99	1,62
123,55	123,55	123,55	214,00	214,00	214,00	214,00	0,00
125,31	129,87	117,13	218,74	220,34	206,07	214,95	3,00
123,00	130,99	118,32	215,97	222,36	206,81	214,95	2,98
124,14	127,58	120,65	216,28	218,46	210,30	214,99	1,61
124,13	124,13	124,13	215,00	215,00	215,00	215,00	0,00
124,71	125,86	122,39	216,43	216,73	212,85	215,33	0,82
124,18	133,26	115,95	218,43	224,66	204,18	215,58	4,02
124,13	126,43	122,97	215,85	217,73	213,43	215,66	0,82
124,74	131,57	117,71	218,57	222,92	206,68	215,94	3,21
124,72	128,16	121,23	217,28	219,46	211,30	215,99	1,60
124,71	124,71	124,71	216,00	216,00	216,00	216,00	0,00
125,29	126,44	122,97	217,43	217,73	213,85	216,33	0,82

Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	Vab [V]	Vbc [V]	Vca [V]	V ₁ [V]	VUF [%]
124,76	133,84	116,53	219,43	225,66	205,18	216,58	4,00
127,02	128,17	120,05	220,46	219,03	210,58	216,64	2,03
124,71	127,01	123,55	216,85	218,73	214,43	216,66	0,81
125,32	132,15	118,29	219,57	223,92	207,67	216,94	3,19
125,29	128,73	121,80	218,28	220,46	212,30	216,99	1,60
125,29	125,29	125,29	217,00	217,00	217,00	217,00	0,00
125,91	133,86	116,51	221,02	225,65	205,60	217,25	4,00
124,74	132,72	118,88	218,98	224,94	208,25	217,28	3,20
123,56	130,44	122,39	216,53	223,06	212,47	217,31	2,00
125,86	127,01	123,55	218,43	218,73	214,85	217,33	0,81
125,33	134,42	117,11	220,43	226,66	206,18	217,58	3,98
126,47	132,16	118,28	221,16	223,92	208,09	217,61	3,21
127,62	131,03	118,28	222,34	222,33	208,49	217,62	3,03
127,60	128,74	120,63	221,46	220,03	211,58	217,64	2,02
125,29	127,59	124,13	217,85	219,73	215,43	217,66	0,81
127,06	133,87	116,50	222,62	225,64	206,02	217,91	4,02
124,76	134,98	117,70	219,84	227,67	206,76	217,91	3,99
125,87	129,31	122,38	219,28	221,46	213,30	217,99	1,59
125,86	125,86	125,86	218,00	218,00	218,00	218,00	0,00
125,32	133,30	119,46	219,98	225,94	209,25	218,28	3,18
124,15	133,29	120,64	218,38	226,38	210,39	218,28	2,99
126,46	131,03	120,63	220,72	223,19	211,19	218,30	2,39
124,14	131,02	122,97	217,53	224,06	213,47	218,31	1,99
125,29	129,88	122,96	218,69	222,47	213,88	218,32	1,61
126,44	127,59	124,12	219,43	219,73	215,85	218,33	0,81
122,42	136,11	120,06	217,05	230,16	209,05	218,58	3,96
127,05	132,74	118,86	222,16	224,92	209,09	218,61	3,19
128,19	131,61	118,85	223,33	223,33	209,49	218,62	3,02
125,88	131,60	121,21	220,13	224,20	211,77	218,64	2,38
128,18	129,32	121,21	222,46	221,03	212,58	218,64	2,01
127,02	129,32	122,38	220,86	221,46	213,72	218,65	1,62
125,86	128,17	124,71	218,85	220,73	216,43	218,66	0,81

Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	Vab [V]	Vbc [V]	Vca [V]	V ₁ [V]	VUF [%]
127,64	134,45	117,08	223,62	226,64	207,02	218,91	4,00
125,33	135,56	118,28	220,84	228,67	207,76	218,91	3,97
129,91	131,05	118,26	225,52	222,33	209,33	218,94	3,23
122,98	134,43	121,81	217,21	228,41	211,55	218,95	3,18
126,45	129,89	122,96	220,28	222,46	214,30	218,99	1,58
126,44	126,44	126,44	219,00	219,00	219,00	219,00	0,00
130,50	132,77	116,47	226,99	224,04	207,24	219,24	4,03
124,73	133,87	121,21	219,38	227,38	211,39	219,29	2,98
124,71	131,60	123,55	218,53	225,06	214,47	219,31	1,98
125,87	130,46	123,54	219,69	223,47	214,88	219,32	1,61
127,02	128,17	124,70	220,43	220,73	216,85	219,33	0,81
125,31	134,44	120,62	220,39	227,95	210,83	219,61	3,20
128,77	132,18	119,43	224,33	224,33	210,49	219,62	3,01
128,75	129,90	121,78	223,46	222,03	213,58	219,64	2,00
127,60	129,89	122,95	221,86	222,46	214,72	219,65	1,61
126,44	128,74	125,28	219,85	221,73	217,43	219,66	0,80
128,22	135,02	117,66	224,62	227,64	208,02	219,91	3,98
130,50	132,77	117,65	226,97	224,47	208,79	219,92	3,71
128,21	133,89	118,84	224,18	226,49	209,54	219,93	3,46
129,35	132,76	118,84	225,35	224,90	209,93	219,94	3,30
130,49	131,63	118,83	226,52	223,33	210,32	219,94	3,22
127,05	133,88	120,02	222,57	226,92	210,67	219,95	3,15
128,20	132,75	120,02	223,74	225,34	211,07	219,95	2,93
127,04	132,75	121,20	222,14	225,77	212,21	219,96	2,63
125,88	132,74	122,37	220,54	226,21	213,35	219,97	2,40
124,71	132,74	123,55	218,95	226,65	214,49	219,97	2,28
127,03	131,61	122,37	221,71	224,62	213,75	219,98	2,10
125,87	131,61	123,54	220,11	225,05	214,89	219,98	1,89
127,02	130,47	123,54	221,28	223,46	215,30	219,99	1,57
125,87	130,46	124,70	219,69	223,90	216,45	219,99	1,38
127,02	129,32	124,70	220,85	222,31	216,86	219,99	1,05
127,02	128,17	125,86	220,42	221,15	218,43	220,00	0,52

Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	Vab [V]	Vbc [V]	Vca [V]	V ₁ [V]	VUF [%]
127,02	127,02	127,02	220,00	220,00	220,00	220,00	0,00
125,33	136,71	119,44	221,24	230,69	209,34	220,25	3,98
128,78	133,33	119,43	224,76	225,91	210,51	220,28	3,22
125,29	132,18	124,12	219,53	226,06	215,47	220,31	1,98
126,45	131,04	124,12	220,69	224,47	215,88	220,32	1,60
127,60	128,75	125,28	221,43	221,73	217,85	220,33	0,80
129,37	135,04	117,64	226,22	227,63	208,43	220,58	4,02
125,89	135,02	121,20	221,39	228,95	211,83	220,61	3,19
129,33	130,48	122,36	224,46	223,03	214,58	220,64	1,99
128,18	130,47	123,53	222,86	223,46	215,72	220,65	1,60
127,02	129,32	125,86	220,85	222,73	218,43	220,66	0,80
127,59	127,59	127,59	221,00	221,00	221,00	221,00	0,00
129,35	133,90	120,00	225,76	226,91	211,51	221,28	3,20
127,02	131,62	124,70	221,69	225,47	216,88	221,32	1,59
128,17	129,32	125,86	222,43	222,73	218,85	221,33	0,80
126,47	135,60	121,78	222,39	229,95	212,83	221,61	3,17
128,76	131,05	124,11	223,86	224,46	216,72	221,65	1,60
127,60	129,90	126,44	221,85	223,73	219,43	221,66	0,79
129,34	132,77	122,35	225,31	226,19	214,61	221,97	2,39
128,17	128,17	128,17	222,00	222,00	222,00	222,00	0,00
127,60	132,19	125,27	222,69	226,47	217,88	222,32	1,58
128,75	129,90	126,43	223,43	223,73	219,85	222,33	0,79
129,33	131,63	124,69	224,86	225,46	217,72	222,65	1,59
128,17	130,48	127,01	222,85	224,73	220,43	222,66	0,79
128,75	128,75	128,75	223,00	223,00	223,00	223,00	0,00
129,33	130,48	127,01	224,43	224,73	220,85	223,33	0,79
128,75	131,05	127,59	223,85	225,73	221,43	223,66	0,79
129,33	129,33	129,33	224,00	224,00	224,00	224,00	0,00
132,23	134,50	121,73	229,93	228,33	214,90	224,28	3,04
129,33	131,63	128,17	224,85	226,73	222,43	224,66	0,78
129,90	129,90	129,90	225,00	225,00	225,00	225,00	0,00
130,48	131,63	128,17	226,43	226,73	222,85	225,33	0,78

Va [V]	Vb [V]	Vc [V]	Vab [V]	Vbc [V]	Vca [V]	V ₁ [V]	VUF [%]
130,48	130,48	130,48	226,00	226,00	226,00	226,00	0,00
131,06	133,36	128,74	227,85	229,31	223,86	226,99	1,02
131,06	131,06	131,06	227,00	227,00	227,00	227,00	0,00
131,64	133,94	129,32	228,85	230,31	224,86	227,99	1,01
131,64	131,64	131,64	228,00	228,00	228,00	228,00	0,00
132,21	132,21	132,21	229,00	229,00	229,00	229,00	0,00
132,79	132,79	132,79	230,00	230,00	230,00	230,00	0,00
133,37	133,37	133,37	231,00	231,00	231,00	231,00	0,00

C – PARÂMETROS DO MIT

Este apêndice mostra os parâmetros do MIT utilizado na dissertação para os experimentos laboratoriais.

Parâmetro	Valor
Potência	1 cv
Resistência de Estator	7,32 Ω
Resistência de Rotor	2,78 Ω
Indutância de Dispersão do Enrolamento de Estator	8,95.10 ⁻³ H
Indutância de Dispersão do Enrolamento de Rotor	5,44.10 ⁻³ H
Indutância de Magnetização	1,41*10 ⁻² H
Momento de Inércia do Rotor	2,71*10 ⁻³ kg.m ²
Velocidade Síncrona 188,49 rad/s	188,49 rad/s
Escorregamento Nominal	3,8%
Conjugado Nominal	4,1 N.m