

Gustavo Felipe Martin Nascimento

**OPERAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS
ALIMENTADOS POR TENSÕES DESBALANCEADAS SOB O
ENFOQUE DO RENDIMENTO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Jean Viane Leite

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Nascimento, Gustavo Felipe Martin
Operação de motores de indução trifásicos alimentados por
tensões desbalanceadas sob o enfoque do rendimento /
Gustavo Felipe Martin Nascimento ; orientador, Jean Viane
Leite ; coorientador, Pedro Armando da Silva Junior. -
Florianópolis, SC, 2016.
95 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação
Multidisciplinar em Saúde.

Inclui referências

1. Saúde. 2. Motor de indução trifásico. 3. Desequilíbrio
de tensão. 4. Rendimento. 5. Eficiência energética. I.
Leite, Jean Viane. II. da Silva Junior, Pedro Armando.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação Multidisciplinar em Saúde. IV. Título.

Gustavo Felipe Martin Nascimento

OPERAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS POR TENSÕES DESBALANCEADAS SOB O ENFOQUE DO RENDIMENTO

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 5 de Setembro de 2016.



Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Pedro Armando da Silva Jr, Dr.

Co-orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Sandro Carlos Lima, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me deu a oportunidade e perseverança para a conclusão desse curso.

À minha mãe, Maria Elisete Martin Nascimento, por todo o carinho, dedicação, amor e claro por todas as broncas nesse período de universidade.

Ao meu pai, engenheiro Rubens José Nascimento, pelo exemplo passado e por todo o auxílio prestado durante toda a minha vida.

À memória do meu avô José Nascimento, por tudo, pois é a única palavra que se aproxima do que ele fez por mim e pela minha família.

Ao GRUCAD por me aceitar como aluno, mesmo em tempo parcial, acreditando na minha capacidade para a elaboração deste estudo.

À Ecoeficiência Engenharia Ltda por disponibilizar tempo e recursos suficientes para a conclusão deste trabalho e por incentivar a capacitação profissional dos seus colaboradores.

À Tractebel Energia por financiar parcialmente este trabalho, que é inserido no projeto PD-0403-0034/2013, intitulado “Avaliação em campo de rendimento de motores de indução trifásicos”, desenvolvido no âmbito do Programa de P&D da Tractebel Energia regulamentado pela ANEEL.

Ao professor Jean Viane Leite, pela ajuda e atenção na elaboração deste trabalho.

Aos colegas de GRUCAD, em especial à Ricardo de Araújo Elias e à Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, cujo auxílio na elaboração desse trabalho foi de vital importância.

Aos engenheiros João Casalinho Gomes, Daniel Diniz Ardies, Angelo José de Lima Perosa, Vinicius Roberto Santos e Alex Emiliano de Andrade e também à Marcus Vinicius Oliveira Silva, por todas as festas e alegrias durante todo esse período de estudos na Universidade Federal de Santa Catarina.

“As flores brotam e morrem, as estrelas brilham, mas um dia se apagarão. Tudo morre, a Terra o Sol, a Via Láctea e até mesmo todo esse universo não é exceção Comparado a isso, a vida do homem é tão breve e efêmera quanto o piscar de olhos. Nesse curto instante, os homens nascem, riem, choram, lutam, sofrem, festejam, lamentam, odeiam pessoas e amam outras. Tudo isso em um só instante.”

(Masami Kurumada, 1990)

RESUMO

A presente dissertação aborda a operação de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desequilibradas, principalmente no que concerne ao rendimento destes equipamentos. Primeiramente é realizada uma apresentação da teoria das componentes simétricas que norteia as análises de sistemas polifásicos desequilibrados. Em seguida, são expostas as definições de quantificação do nível de desbalanceamento de tensão. Posteriormente, detalhes sobre motores de indução trifásicos são apresentadas com o intuito de contextualizar o leitor aos conceitos técnicos utilizados neste trabalho. Além disso, apresenta-se o estado da arte do estudo da operação de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desequilibradas. Adicionalmente, construiu-se um banco de dados com medições realizadas em 244 motores instalados em quatro plantas do setor industrial brasileiro com a intenção de estimar o consumo de energia e o custo excedente em razão do desequilíbrio de tensões. Finalmente foram realizados ensaios em um motor em bancada sob diferentes níveis e tipos de desbalanceamento de tensões com o intuito de obter a redução do rendimento de um MIT em função do desequilíbrio de tensões. Estes resultados foram comparados com simulações realizadas utilizando o modelo em regime permanente de um MIT.

Palavras-chave: Motor de indução trifásico. Desequilíbrio de tensão. Rendimento. Eficiência energética.

ABSTRACT

This master's thesis approaches the operation of three-phase induction motors when powered by unbalanced voltages, especially with regard to its efficiency. Initially, the theory of symmetrical components is presented, that guides the analysis of unbalanced polyphase systems. Then, the definitions of voltage unbalance level are showed. Later, generalities about induction motors are presented in order to contextualize the reader to the technical concepts used in this work. In addition, this thesis presents the state of the art of the operation study of induction motors powered by unbalanced voltages. Additionally a database of measurements performed on 244 motors installed in four plants in the Brazilian industrial sector, was build, in order to estimate the excess energy consumption and the excess cost due to the voltage unbalance. Posteriorly, tests were performed in a three-phase induction motor at different types and levels of voltage unbalance, in order to determine the efficiency reduction of this motor in these conditions. The results were compared with simulations using the steady state model of a three-phase induction motor.

Keywords: Three-phase induction motor. Voltage unbalance, Motor efficiency. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Composição setorial do consumo de energia elétrica no Brasil em 2008.	1
Figura 2.1 – Fasores desequilibrados decompostos em componentes simétricas.	9
Figura 2.2 – Fator de redução da potência de um MIT em função do fator de desbalanceamento das tensões (LVUR).	13
Figura 2.3 – Corte de um motor de indução típico.	14
Figura 2.4 – Vista frontal de um estator de um motor de indução típico. ...	15
Figura 2.5 – Rotor do tipo gaiola de esquilo.	16
Figura 2.6 – Desenho esquemático de um rotor de gaiola de esquilo.	16
Figura 2.7 – O campo girante.	17
Figura 2.8 – Fluxo de potência em um motor de indução.	19
Figura 2.9 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução trifásico.	23
Figura 2.10 – Circuito equivalente por fase de sequência positiva.	25
Figura 2.11 – Circuito equivalente por fase de sequência negativa.	25
Figura 2.12 – Circuito equivalente por fase de sequência zero.	25
Figura 2.13 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução trifásico durante o ensaio a vazio.	29
Figura 3.1 – Tipos de desequilíbrio entre os dados medidos.	35
Figura 3.2 – Fotografia parcial do motor ensaiado.	37
Figura 3.3 – Placa de identificação do motor ensaiado.	37
Figura 3.4 – Freio de Foucault utilizado nos ensaios.	38
Figura 3.5 – Fotografia parcial da balança.	39
Figura 3.6 – Fotografia parcial do estroboscópio digital.	39
Figura 3.7 – Analisador de energia utilizado para a medição de potência elétrica.	40
Figura 3.8 – Fonte de tensão utilizada nos ensaios.	41
Figura 3.9 – Fotografia parcial dos ensaios realizados.	42
Figura 4.1 – Temperatura do núcleo do motor em momentos imediatamente anteriores aos testes.	43
Figura 4.2 – Bancada durante os ensaios realizados.	44
Figura 4.3 – Redução do rendimento do motor avaliado para cada tipo e nível de desbalanceamento avaliado.	46
Figura 4.4 – Resultados do ensaio de separação de perdas.	48
Figura 4.5 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -UV.	50
Figura 4.6 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -OV.	50

Figura 4.7 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -OV, 1 ϕ -UV.	51
Figura 4.8 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 3 ϕ -UV.	51
Figura 4.9 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 3 ϕ -OV.	52
Figura 4.10 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -OV, 2 ϕ -UV.	52
Figura 4.11 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 2 ϕ -OV, 1 ϕ -UV.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de desequilíbrio de tensão.	8
Tabela 2.2 – Comparação entre VUF, PVUR e LVUR	12
Tabela 2.3 – Perdas suplementares em função da potência nominal do motor.	23
Tabela 3.1 – Dados gerais do banco de dados.	33
Tabela 3.2 – Custo anual médio da operação dos motores medidos.	34
Tabela 3.3 – Desequilíbrios de tensão encontrados nas medições.	34
Tabela 3.4 – Fator de desbalanceamento máximo nos motores das fábricas avaliadas.	35
Tabela 3.5 – Fator de desbalanceamento máximo de cada tipo de desequilíbrio avaliado.	36
Tabela 3.6 – Características nominais do motor medido.	38
Tabela 3.7 – Características nominais da balança.	40
Tabela 3.8 – Características nominais da câmara estroboscópica.	40
Tabela 3.9 – Características nominais do analisador de energia.	41
Tabela 3.10 – Características nominais da fonte de tensão.	41
Tabela 4.1 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1 ϕ -UV.	45
Tabela 4.2 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1 ϕ -UV.	45
Tabela 4.3 – Medições de grandezas elétricas realizadas no teste em vazio.	47
Tabela 4.4 – Perdas no teste em vazio.	48
Tabela 4.5 – Medições de grandezas elétricas realizadas no teste de escorregamento nominal.	49
Tabela 4.6 – Parâmetros do circuito elétrico equivalente.	49
Tabela 4.7 – Consumo anual excedente máximo em função do desequilíbrio máximo encontrado nas medições realizadas.	55
Tabela 4.8 – Consumo anual excedente máximo nas fábricas nas quais foram medidos os motores componentes do banco de dados criado .	55
Tabela 4.9 – Características nominais do motor avaliado.	56
Tabela 4.10 – Medições realizadas no motor avaliado.	57
Tabela 4.11 – Parâmetros do circuito elétrico equivalente.	57
Tabela A.1 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1 ϕ -OV.	67
Tabela A.2 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1 ϕ -OV, 1 ϕ -UV.	67

Tabela A.3 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 3φ-UV.	68
Tabela A.4 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 3φ-OV.	68
Tabela A.5 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 2φ-OV, 1φ-UV.	69
Tabela A.6 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1φ-OV, 2φ-UV.	69
Tabela A0.7 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1φ-OV.	70
Tabela A.8 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1φ-OV, 1φ-UV.	70
Tabela A0.9 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 3φ-UV.	71
Tabela A.10 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 3φ-OV.	71
Tabela A.11 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 2φ-OV, 1φ-UV.	72
Tabela A.12 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1φ-OV, 2φ-UV.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;
MIT – Motor de indução trifásico;
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*;
PVUR – *Phase Voltage Unbalance Rate*;
NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*;
LVUR – *Line Voltage Unbalance Rate*;
IEC – *International Electrotechnical Commission*;
VUF – *Voltage Unbalance Factor*;
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

LISTA DE SÍMBOLOS

- 3 ϕ -OV – Desbalanceamento de tensão aliado a sobretensão em três fases;
- 2 ϕ -OV – Desbalanceamento de tensão aliado a sobretensão em duas fases;
- 1 ϕ -OV – Desbalanceamento de tensão aliado a sobretensão em uma fase;
- 3 ϕ -UV – Desbalanceamento de tensão aliado a subtensão em três fases;
- 2 ϕ -UV – Desbalanceamento de tensão aliado a subtensão em duas fases;
- 1 ϕ -UV – Desbalanceamento de tensão aliado a subtensão em uma fase;
- 2 ϕ -OV, 1 ϕ -UV – Desbalanceamento de tensão aliado a sobretensão em duas fases e subtensão em uma fase;
- 1 ϕ -OV, 2 ϕ -UV – Desbalanceamento de tensão aliado a sobretensão em uma fase e subtensão em duas fases;
- 1 ϕ -OV, 1 ϕ -UV – Desbalanceamento de tensão aliado a sobretensão em uma fase e subtensão em outra fase;
- V_0 – tensão de sequência zero;
- V_1 – tensão de sequência positiva;
- V_2 – tensão de sequência negativa;
- V_a – tensão da fase a;
- V_b – tensão da fase b;
- V_c – tensão da fase c, e;
- a – operador $e^{j\frac{2\pi}{3}}$, que representa a defasagem de 120° entre as tensões;
- V_{medf} – média aritmética das tensões de fase;
- V_{ab} – tensão de linha entre as fases a e b;
- V_{bc} – tensão de linha entre as fases b e c;
- V_{ca} – tensão de linha entre as fases c e a;
- V_{medl} – média aritmética das tensões de linha descritas anteriormente;
- n_{sinc} – velocidade angular do campo girante, em rpm;
- f – frequência fundamental das correntes aplicadas no estator, em Hz;
- p – número de pares de polos da máquina;
- s – escorregamento;
- n_{rotor} – velocidade angular do rotor;
- f_r – frequência das correntes induzidas no rotor;
- η – rendimento do motor;
- P_{out} – potência útil do motor, entregue à carga;
- P_{in} – potência elétrica de entrada do motor;
- P_{fe} – perdas no ferro do estator;
- P_{fr} – perdas no ferro do rotor;

k_h – coeficiente de histerese;
 k_h – coeficiente de correntes de Foucault;
 \emptyset – fluxo mútuo presente no entreferro da máquina.
 I_s – corrente que flui pelos enrolamentos do estator;
 R_s – resistência dos enrolamentos do estator;
 X_s – reatância de dispersão do estator;
 R_m – resistência de perdas no ferro;
 X_m – reatância de magnetização do núcleo;
 R_r – resistência dos enrolamentos do rotor;
 X_r – reatância de dispersão do rotor;
 I_r – corrente que flui pelo rotor;
 Z_0 – impedância equivalente do circuito de sequência zero;
 Z_{m1} – impedância equivalente de magnetização de sequência positiva;
 Z_{m2} – impedância equivalente de magnetização de sequência negativa;
 Z_{r1} – impedância equivalente do rotor de sequência positiva;
 Z_{r2} – impedância equivalente do rotor de sequência negativa;
 Z_{s1} – impedância equivalente do estator de sequência positiva;
 Z_{s2} – impedância equivalente do estator de sequência negativa;
 Z_1 – impedância equivalente do circuito de sequência positiva;
 Z_2 – impedância equivalente do circuito de sequência negativa;
 I_{s0} – corrente de sequência zero nos enrolamentos do estator;
 I_{s1} – corrente de sequência positiva nos enrolamentos do estator;
 I_{s2} – corrente de sequência negativa nos enrolamentos do estator;
 P_{rv} – potência total medida no ensaio a vazio,
 P_{rvrs} – perdas na resistência dos enrolamentos do estator no ensaio a vazio,
 $P_{rvferro}$ – perdas no ferro no ensaio a vazio;
 P_{rot} – perdas rotacionais, por atrito e ventilação.

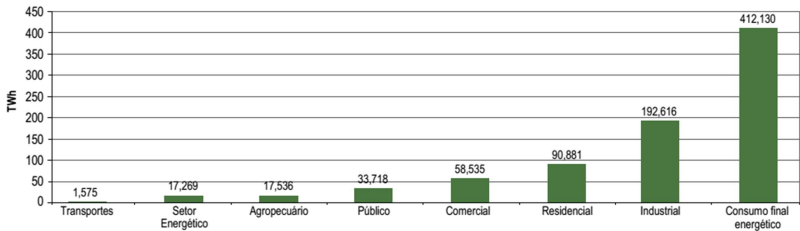
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1.2	OBJETIVOS	6
1.2.1	Objetivo Geral	6
1.2.2	Objetivos Específicos	6
2	ESTADO DA ARTE: DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES E O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	7
2.1	DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES	7
2.1.1	Componentes simétricas	8
2.1.2	Nível de desbalanceamento	10
2.1.3	Normas Regulamentadoras	12
2.2	O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	13
2.2.1	O campo girante	16
2.2.2	Escorregamento	18
2.2.3	Perdas em um motor de indução	19
2.2.4	Modelo em regime permanente	23
2.2.5	Determinação dos parâmetros de um MIT	28
3	DADOS COLETADOS: DESEQUILIBRIO DE TENSÃO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS E ENSAIOS REALIZADOS	33
3.1	DESEQUILIBRIO DE TENSÃO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS	33
3.2	ENSAIOS PRÁTICOS	36
3.3	SIMULAÇÕES EM REGIME PERMANENTE	42
4	ESTUDO DE CASO DE UM MOTOR ALIMENTADO POR TENSÕES DESEQUILIBRADAS	43
4.1	ENSAIOS PRÁTICOS	43
4.1.1	Ensaio de determinação do rendimento	44
4.1.2	Determinação dos parâmetros do circuito equivalente	47
4.2	SIMULAÇÕES	49
4.2.1	Simulações em regime permanente	49
4.3	CONSUMO ANUAL EXCEDENTE EM FUNÇÃO DO DESEQUILIBRIO DE ENERGIA	53
5	CONCLUSÃO	59
6	REFERÊNCIAS	63
	ANEXO 1	67

1 INTRODUÇÃO

Dados do Atlas da Energia Elétrica do Brasil de 2008 [1] indicam que o setor industrial é responsável por pelo menos 46,7% da energia elétrica consumida no território brasileiro como mostra a distribuição exposta na Figura 1.1. No setor industrial grande parte do consumo é devido a motores elétricos que desempenham as mais variadas funções, como o acionamento de compressores de ar, bombas hidráulicas, exaustores, ventiladores, esteiras etc.

Figura 1.1 – Composição setorial do consumo de energia elétrica no Brasil em 2008.



Fonte: ANEEL 2008 [1]

Dentre os motores elétricos mais utilizados no setor industrial, destacam-se os motores de indução trifásicos, principalmente por sua robustez, seu baixo custo de aquisição e manutenção e grande gama de aplicação. O crescente desenvolvimento da eletrônica de potência tornou possível conceber dispositivos mais eficientes e precisos em termos de controle de velocidade, fazendo com que os motores de indução pudessem assumir o lugar de motores de corrente contínua nas aplicações nas quais o controle de velocidade é importante. Por ser o tipo de motor mais utilizado na indústria, grande parte das recentes inovações tecnológicas se ativeram a este tipo de motor, de forma que, atualmente, há no mercado motores de indução com rendimento na ordem de 96%.

Motores de indução trifásicos são geralmente projetados para operar com tensões de alimentação puramente senoidais e, quando polifásicas, tensões equilibradas. O desempenho dos motores fica prejudicado quando a qualidade da energia fornecida para o seu acionamento não é adequada. Isto é observado, principalmente, na presença de alto conteúdo harmônico nas ondas de tensão de alimentação, ou quando as tensões do sistema polifásico estão desequilibradas, seja por diferenças

em suas magnitudes, seja por ângulos de defasagem das tensões diferentes dos especificados para cada sistema polifásico.

Especificamente em dos motores de indução trifásicos, objeto de estudo deste trabalho, tensões de alimentação desequilibradas podem provocar aumentos de vibrações, temperatura e ruídos, elevando as perdas e, conseqüentemente, diminuindo o rendimento do motor. Esta redução no rendimento fica evidenciada quando utilizada a teoria das componentes simétricas para avaliar a operação deste tipo de máquina operando com alimentação desequilibrada. De acordo com esta teoria, a alimentação de MITs com tensões desequilibradas dá origem a um torque de sequência negativa, com sentido oposto ao da rotação original da máquina, reduzindo assim o rendimento do conjunto.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual os fasores apresentam tensões com módulos diferentes entre si, defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente. As normas IEEE std 141 [6] e NEMA MG-1-14.36 [5] determinam métodos para a quantificação do desbalanceamento de tensões, bem como citam efeitos da operação de motores sob estas condições e indicam diretrizes para mitigar estes efeitos.

Desde 1918, ano em que Fortescue [4] propôs o método das componentes simétricas para a análise de circuitos polifásicos desbalanceados, uma grande gama de pesquisas foi realizada com o intuito de determinar as condições de operação de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desequilibradas.

Este assunto já era abordado em 1954 quando Williams [13] publicou um trabalho indicando algumas das principais conseqüências de alimentar motores de indução com tensões desbalanceadas. Segundo Williams, os dois principais efeitos da operação de motores sob estas condições são o desbalanceamento severo das correntes de linha do estator mesmo em baixos níveis de desequilíbrio das tensões, e o aumento das perdas nos enrolamentos do motor. Este aumento das perdas se deve, principalmente, ao surgimento das correntes de sequência negativa que são superpostas às perdas devidas às correntes de sequência positiva, elevando as perdas totais do sistema. O aumento destas perdas indica que o motor não pode mais operar em sua potência nominal sem sobreaquecer. Assim, o trabalho propõe que, quando alimentado com tensões desbalanceadas, o motor deve operar abaixo de

sua potência nominal, sendo que esta redução depende do grau de desequilíbrio das tensões. Esta redução foi normatizada com a publicação da norma NEMA MG-1-14.36 [5] e está ilustrada posteriormente neste trabalho, na Figura 2.2.

Em sequência, trabalhos seguidos sendo publicados foram este assunto. No ano de 1997, Wallace et al [14] publicaram os resultados de testes realizados em três motores de indução trifásicos de características distintas com o foco sobre a variação do fator de potência e do rendimento destas máquinas. Os motores foram submetidos a subtensões, sobretensões e a desbalanceamentos de tensão de 1,25 % e 2,5 %. Com relação à operação do motor sob regime desequilibrado, o trabalho indica que o desequilíbrio de correntes aumenta drasticamente, entre 12 % e 18 % em cargas altas, quando há um desequilíbrio de tensões de 2,5 %. Estes testes ainda mostraram um aumento de 2 % nas perdas, passando de 5 % para 7 %, reduzindo assim o rendimento do motor.

Lee [3], em 1999, realizou diversos ensaios práticos com o intuito de investigar os efeitos do desbalanceamento das tensões de alimentação na performance de um MIT. Foram realizados ensaios com oito tipos de desequilíbrios distintos, entretanto com fatores de desbalanceamento similares. Lee mostrou que, para um mesmo fator de desequilíbrio, quanto maior é a tensão de sequência positiva, maior é o rendimento do motor e menor é o seu fator de potência. Adicionalmente, ele realizou ensaios introduzindo subtensões em uma das fases com o intuito de variar o fator de desbalanceamento. A partir destes testes foi possível confirmar, que neste caso de desequilíbrio, quanto maior é o desbalanceamento, menor é o rendimento. Contudo, a importância do conhecimento das tensões de sequência positiva e negativa no julgamento dos desequilíbrios de tensões avaliados ficou ainda mais evidenciada. Em um dos casos avaliados, foi possível notar que um motor alimentado com tensões cujo fator de desbalanceamento é de 5 %, e tensão de sequência positiva de 125,7 V, apresentou rendimento de 81,1 %, enquanto o mesmo motor, com fator de desbalanceamento igual a 4 % mas tensão de sequência positiva igual a 115,8 V, apresentou rendimento igual a 80,5 %. Outro resultado importante demonstrado neste trabalho é a influência da componente de sequência negativa da tensão no rendimento do motor. Ensaios realizados mantendo-se a tensão de sequência positiva constante e variando a de sequência negativa, mostraram uma queda de rendimento de cerca de 2 % neste motor, quando o desbalanceamento atingiu 7 %, ao mesmo tempo em que o fator de potência decresceu de 0,005. Resultados similares foram

publicados por Quispe et al [15], em 2005. Neste estudo foi possível observar a redução do fator de potência com o aumento da tensão de sequência positiva, sendo mantido o mesmo fator de desbalanceamento. Além disso, é possível notar a redução do rendimento do motor em conjunto com a redução da tensão de sequência positiva, indicando que subtensões aliadas ao desbalanceamento prejudicam mais o rendimento dos motores que sobretensões.

Posteriormente, Pillay [16] buscou estimar as perdas na vida útil de máquinas de indução alimentadas com tensões desbalanceadas. De acordo com os resultados publicados em seu trabalho, a operação de um motor de indução a plena carga, alimentado com tensões cujo fator de desbalanceamento é igual a 3 %, reduz pela metade a vida útil da máquina.

Na sequência, com o avanço computacional, foi possível a realização de diversos tipos de simulação do comportamento dos motores de indução quando alimentados por tensões desequilibradas. Dentre estas se pode citar simulações em regime permanente ou até mesmo durante o transitório destas máquinas. Além disso, também é possível prever o comportamento das máquinas nesta situação através de simulações que utilizam o método dos elementos finitos.

Em 2008, Sandhu [17] comparou os resultados de simulações em regime permanente realizadas com dois diferentes softwares comerciais, além de comparações com resultados analíticos obtidos a partir dos circuitos equivalentes dos motores e da teoria dos componentes simétricos. Os resultados por ele publicados indicam elevação nas perdas, em consequência do sobreaquecimento, de um motor alimentado por tensões desequilibradas com o aumento do fator de desbalanceamento, reduzindo assim o seu rendimento. Além disso, foi possível observar que a queda de rendimento é mais acentuada quando o desbalanceamento das tensões é aliada ao uma subtensão, se comparada ao mesmo desequilíbrio utilizando sobretensões.

Continuando o exposto no parágrafo anterior, em 2010, Akpama *et al* [18] realizaram simulações em regime dinâmico (transitório) de um MIT alimentado de forma desequilibrado. Seus resultados indicaram que, nestas condições, o motor demora mais tempo para atingir o regime permanente bem como o aparecimento de um conteúdo harmônico maior que em condições equilibradas. Conforme [18], estes fenômenos fazem com que haja um sobreaquecimento do motor em potência nominal, deteriorando o seu isolamento e reduzindo a sua vida útil.

Em 2011, Patel et al [19] publicou os resultados das suas simulações de transitório de motores alimentados de maneira

desequilibrada. Nestes é possível verificar, principalmente, o aumento do *ripple* do torque do motor. As demais conclusões, do trabalho, aumento da temperatura, redução do rendimento e etc., corroboram as conclusões dos trabalhos apresentados anteriormente.

No ano de 2012, Livadaru *et al* [20] utilizaram o método dos elementos finitos para simular e estudar o comportamento de motores de indução nas condições de interesse do presente trabalho. Nos resultados publicados, pode-se verificar o aparecimento de polos magnéticos desiguais, distorcendo o campo magnético. A distorção do campo magnético causa uma distorção nas correntes e no torque do motor, aumentando o conteúdo harmônico, as vibrações e o ruído do motor.

Concomitantemente, Ebadi *et al* [21] buscou comparar os resultados de simulações através do método de elementos finitos e de simulações em regime permanente utilizando o circuito elétrico equivalente clássico de um motor de indução. Os dados por ele publicados mostraram concordância entre os resultados das simulações realizadas, indicando que simulações através do circuito elétrico equivalente são apropriadas para analisar o desempenho de motores de indução operando sob estas condições. Assim, em função da sua simplicidade, da sua facilidade de implementação e de seus resultados satisfatórios, a análise por meio do circuito elétrico equivalente é acertiva.

Ainda em 2012, Hollanda *et al* [22] comparou modelos de MITs no domínio do tempo, da frequência e de redes neurais quando utilizados para simular o comportamento deste tipo de máquina alimentada por tensões desequilibradas. Seus resultados apresentaram diferenças máximas de 0,5 % no rendimento dos motores utilizando os diferentes modelos, mostrando que estes métodos apresentam resultados satisfatórios.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção lista os objetivos gerais e específicos que norteiam a presente dissertação.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho de motores de indução trifásicos, focando especialmente a questão do rendimento quando estes são alimentados com tensões desequilibradas. O estudo será realizado com simulações de sua operação em regime permanente, além utilizar de dados experimentais obtidos em campo e em laboratório.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios em motores comerciais alimentados com tensões desequilibradas;
- Modelar analiticamente motores de indução trifásicos alimentados com tensões desequilibradas;
- Comparar dados obtidos de ensaios experimentais e das simulações realizadas;
- Criação de um banco de dados experimentais contendo tensões, correntes, potência e fator de potência de motores de indução trifásicos, utilizados no setor industrial brasileiro;
- Estimação da diminuição média de rendimento dos motores inseridos no banco de dados;
- Estimação do potencial de economia financeira caso o desequilíbrio encontrado nessas medições seja minimizado.

2 ESTADO DA ARTE: DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES E O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Esta seção tem como objetivo apresentar o estado da arte no estudo da operação de motores de indução trifásicos alimentados com tensões desequilibradas e a fundamentação para a realização das análises teóricas e experimentais.

2.1 DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico em regime permanente é uma condição na qual os fasores apresentam tensões com módulos diferentes entre si, defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente. Assim, diversas são as combinações de desequilíbrio de tensões possíveis.

Os desequilíbrios de tensão ocorrem por diversas razões, dentre as quais se podem citar a utilização de cargas monofásicas distribuídas de forma desigual entre as três fases, impedâncias assimétricas de transformadores e de linhas de transmissão, motores elétricos com impedâncias desequilibradas, bancos de capacitores assimétricos etc.

Uma das principais consequências do desequilíbrio de tensões em um sistema elétrico é o surgimento de correntes de sequência negativa. Este tipo de corrente é um dos maiores causadores de sobreaquecimento nas máquinas rotativas em corrente alternada. Elas também causam oscilações no conjugado, aumentando o processo de fadiga mecânica nos eixos de rotação. [2]

Diversos são os tipos de desequilíbrio de tensão existentes em sistemas trifásicos, cada um com a sua particularidade. Neste trabalho será utilizada a nomenclatura proposta por Lee [3], a qual é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tipos de desequilíbrio de tensão.

Tipo de desequilíbrio	Índice
Sobretensão nas três fases	3 ϕ -OV
Sobretensão em duas fases	2 ϕ -OV
Sobretensão em uma fase	1 ϕ -OV
Subtensão nas três fases	3 ϕ -UV
Subtensão em duas fases	2 ϕ -UV
Subtensão em uma fase	1 ϕ -UV
Subtensão em uma e sobretensão nas demais	2 ϕ -OV, 1 ϕ -UV
Sobretensão em uma e subtensão nas demais	1 ϕ -OV, 2 ϕ -UV
Sobretensão em uma e subtensão em outra	1 ϕ -OV, 1 ϕ -UV

Fonte: LEE (1999)

2.1.1 Componentes simétricas

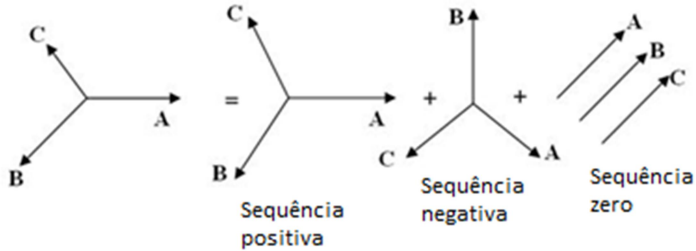
O método das componentes simétricas é uma ferramenta extremamente útil para o estudo de sistemas polifásicos assimétricos. Este método foi proposto por Fortescue [4], que estabeleceu o seguinte teorema: “Um sistema desequilibrado de n fasores relacionados pode ser convertido em n sistemas equilibrados, chamados de componentes simétricas dos fasores originais. Os n fasores de cada componente são iguais em amplitude e os ângulos entre os fasores adjacentes de cada conjunto também são iguais”. Este teorema se aplica supondo que o princípio da superposição é válido, ou seja, que os circuitos analisados são lineares.

Este teorema propicia a decomposição de um sistema trifásico em três sistemas equilibrados, denominados de sequência positiva, negativa e zero.

- Sistema de sequência positiva: Sistema trifásico equilibrado com sequência de fase igual à do sistema original;
- Sistema de sequência negativa: Sistema trifásico equilibrado com sequência de fase inversa à do sistema original;
- Sistema de sequência zero: Sistema de três vetores iguais em módulos e colineares.

A Figura 2.1 apresenta uma representação gráfica dos fasores de um sistema trifásico desequilibrado decomposto em componentes simétricas.

Figura 2.1 – Fasores desequilibrados decompostos em componentes simétricas.



Fonte: Fortescue (1918)

A transformação das grandezas de cada fase para as componentes simétricas passa pela aplicação do sistema seguinte:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Equação 1}$$

Na qual,

- V_0 é a tensão de sequência zero;
- V_1 representa a tensão de sequência positiva;
- V_2 equivale à tensão de sequência negativa;
- V_a é a tensão da fase a;
- V_b é a tensão da fase b;
- V_c representa a tensão da fase c, e;
- a corresponde ao operador $e^{j\frac{2\pi}{3}}$, que representa a defasagem de 120° entre as tensões.

A partir da aplicação deste teorema, é possível analisar o desempenho de quaisquer sistemas trifásicos, sejam eles equilibrados ou desequilibrados.

2.1.2 Nível de desbalanceamento

Atualmente há três maneiras de quantificar o grau de desequilíbrio de um sistema trifásico. Na norma IEEE std 141 [6], o fator de desbalanceamento é definido como a razão entre máxima variação da magnitude das tensões de fase em relação à tensão de fase média e a própria tensão média, conforme exibido na Equação 2. Esta definição é comumente representado por PVUR (*Phase Voltage Unbalance Rate*).

$$PVUR = \frac{\text{Max}[(V_a - V_{medf}); (V_b - V_{medf}); (V_c - V_{medf})]}{V_{medf}} \cdot 100 \quad \text{Equação 2}$$

Na qual,

- V_{medf} é a média aritmética das tensões de fase descritas anteriormente.

Como pode ser verificado na Equação 2, esta maneira de quantificar o nível de desbalanceamento do sistema considera apenas as magnitudes das tensões de fase, não contemplando desbalanceamentos ocorridos por diferenças de fase não iguais a 120° elétricos, no caso de sistemas trifásicos. Vale ressaltar que, uma vez que as grandezas de fase não possuem a mesma magnitude, a defasagem entre as grandezas de linha deixa de ser, em geral, igual de 120° .

Para incluir estas possíveis diferenças de fase, na norma NEMA MG-1-14.36 [5], o nível de desbalanceamento, calculado de maneira similar ao exposto na Equação 2 utiliza as tensões de linha, em detrimento às grandezas de fase empregadas na definição do IEEE. A Equação 3 mostra o método de cálculo desta definição, chamada de LVUR (*Line Voltage Unbalance Rate*).

$$LVUR = \frac{\text{Max}[(V_{ab} - V_{medl}); (V_{bc} - V_{medl}); (V_{ca} - V_{medl})]}{V_{medl}} \cdot 100 \quad \text{Equação 3}$$

Na qual,

- V_{ab} é a tensão de linha entre as fases a e b;

- V_{bc} a tensão de linha entre as fases b e c;
- V_{ca} a tensão de linha entre as fases c e a;
- V_{medl} é a média aritmética das tensões de linha descritas anteriormente.

Outra forma de quantificar o nível de desequilíbrio de um sistema trifásico é a partir da relação entre os valores de tensão de sequência positiva e de sequência negativa, calculados a partir da teoria das componentes simétricas. Esta definição está exposta na norma IEC 60034-26 [7] e é calculada conforme a Equação 4. Esta grandeza é normalmente representada por VUF (*Voltage Unbalance Factor*).

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \quad \text{Equação 4}$$

2.1.2.1 Comparação entre as definições de fator de desbalanceamento

A existência de diferentes métodos para quantificar o nível de desequilíbrio de um sistema deixa a dúvida de qual definição é a mais indicada a ser utilizada.

Anteriormente já foi citado que o PVUR não contempla o desbalanceamento dos ângulos de fase e, por tal razão, é menos utilizado. Adicionalmente, em ambientes industriais, nos quais nem sempre é conveniente determinar as grandezas de fase, o LVUR tem vantagem. Contudo, o conhecimento da tensão de sequência positiva é importante para identificar problemas na operação de MITs. Com o intuito de ilustrar a diferença entre os métodos de cálculo, estes foram aplicados a um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas. Os resultados estão expostos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Comparação entre *VUF*, *PVUR* e *LVUR*

V_a [V]	V_b [V]	V_c [V]	V_1 [V]	V_2 [V]	<i>VUF</i> [%]	<i>PVUR</i> [%]	<i>LVUR</i> [%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
127,0	127,0	131,0	128,3	1,3	1,0	2,1	0,5
127,0	127,0	134,8	129,6	2,6	2,0	4,0	1,0
127,0	127,0	138,7	130,9	3,9	3,0	6,0	1,5
127,0	127,0	143,0	132,3	5,3	4,0	8,1	2,0
127,0	127,0	147,0	133,7	6,7	5,0	10,0	2,5
127,0	127,0	151,5	135,2	8,2	6,0	12,1	3,1
127,0	127,0	155,5	136,5	9,5	7,0	13,9	3,5
127,0	127,0	160,0	138,0	11,0	8,0	15,9	4,1

Os dados expostos na tabela anterior mostram que, normalmente, os valores calculados por *LVUR* são inferiores aos calculados por *VUF* que por sua vez, são inferiores ao *PVUR*.

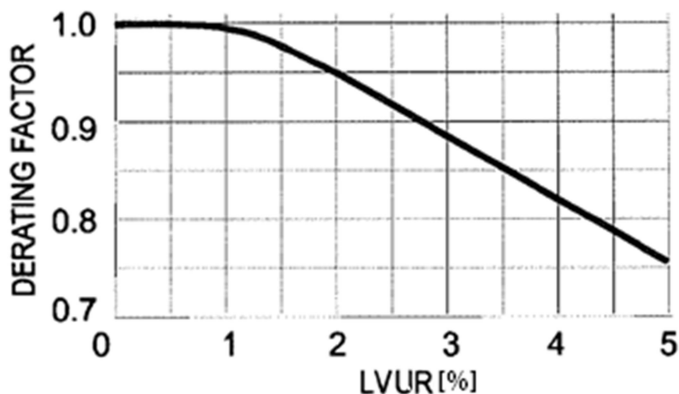
Para os dados específicos expostos nesta tabela, é possível notar ainda que o *PVUR* assume valores cerca de duas vezes maior que o *VUF*. Além disso, o *VUF*, por sua vez, também apresenta valores cerca de duas vezes maior que o *LVUR*. Contudo, é conveniente ressaltar que estas proporções nem sempre são verdadeiras, e são válidas para estes dados em específico. Contudo, mesmo que as proporções entre os valores de *LVUR*, *PVUR* e *VUF* não sejam mantidas para outros exemplos de desequilíbrios, a relação de maioria usualmente se mantém. Dessa forma, a utilização de *LVUR* é conservadora, quando comparada à de *VUF* ou de *PVUR*. Outros exemplos serão apresentados na seção 4.1.1.

2.1.3 Normas Regulamentadoras

Além de definirem o método de cálculo para o fator de desbalanceamento, as normas citadas no item anterior indicam também limites para a operação de motores de indução trifásicos alimentados com tensões desequilibradas.

Para minimizar riscos de danos a motores operando sob estas condições, a NEMA MG-1-14.36 [5] define uma curva do fator de redução da potência nominal dos motores em função do fator de desbalanceamento das tensões, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Fator de redução da potência de um MIT em função do fator de desbalanceamento das tensões (LVUR).



Fonte: NEMA (2004)

De acordo com a curva ilustrada na figura anterior, quando o fator de desbalanceamento é igual a 5 % o fator de redução da potência é aproximadamente 25 %, ou seja, o motor deverá operar com no máximo 75 % da sua potência nominal. Além disso, segundo a mesma norma, a operação de motores de indução trifásicos alimentados com tensões cujo fator de desbalanceamento é superior a 5 % não é recomendada.

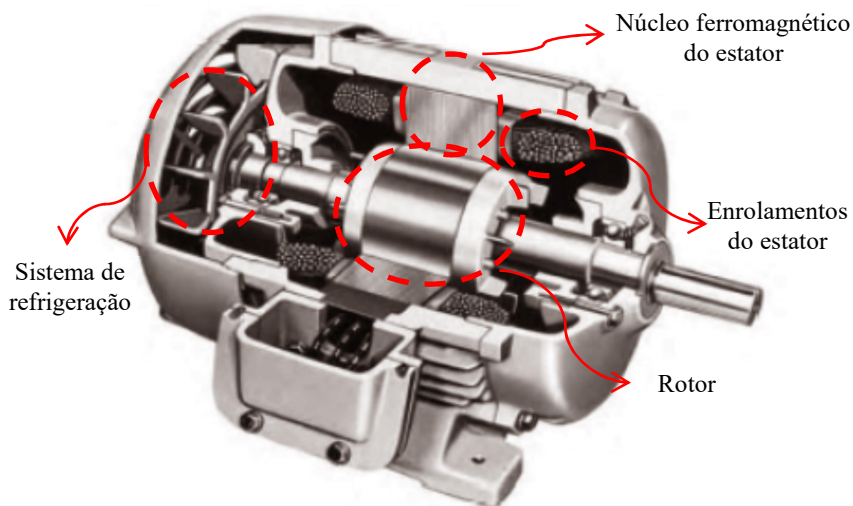
A mesma norma atesta algumas consequências da operação de motores de indução trifásicos alimentados com tensões desequilibradas, como por exemplo, a redução do torque e da velocidade nominal do motor. Outro fato destacado na NEMA MG-1-14.36 é que um determinado nível de desequilíbrio de tensões provoca um desequilíbrio nas correntes do motor cujo fator é de 6 a 10 vezes maior que o fator de desequilíbrio de tensões.

2.2 O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor de indução é uma máquina elétrica rotativa de corrente alternada, cujas correntes nos enrolamentos do rotor também são alternadas. Neste tipo de motor, correntes alternadas são aplicadas nos enrolamentos do estator, que induzem correntes no rotor, de forma semelhante ao fenômeno que ocorre em transformadores. Assim, de forma geral, embora a frequência das correntes induzidas no rotor seja

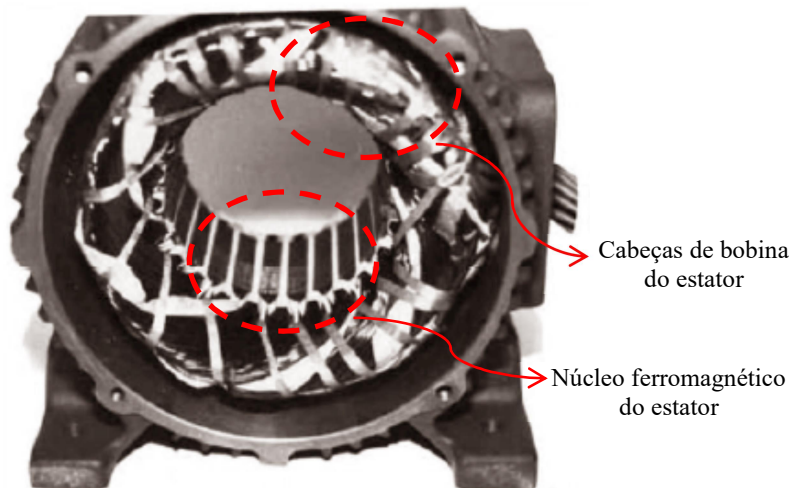
diferente da frequência das correntes do estator, um motor de indução pode ser visto como um transformador que transfere potência entre o estator e o rotor. As figuras seguintes apresentam um exemplo de um motor de indução típico, em corte, e de uma vista frontal de um estator. Na Figura 2.3 é possível visualizar os principais componentes de um motor de indução típico, como os enrolamentos e o núcleo ferromagnético do estator, o rotor, o seu sistema de refrigeração, etc. Já na Figura 2.4 visualizam-se em maiores detalhes as cabeças de bobina do estator bem como o seu núcleo ferromagnético.

Figura 2.3 – Corte de um motor de indução típico.



Fonte: CHAPMAN (2013)

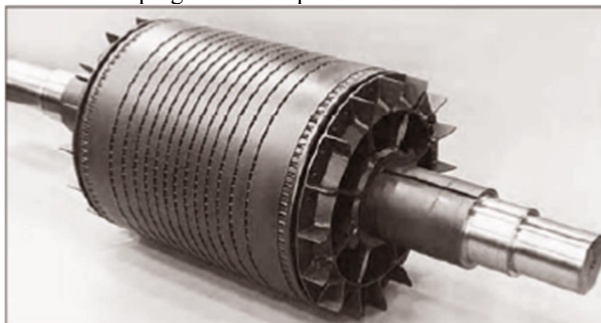
Figura 2.4 – Vista frontal de um estator de um motor de indução típico.



Fonte: CHAPMAN (2013)

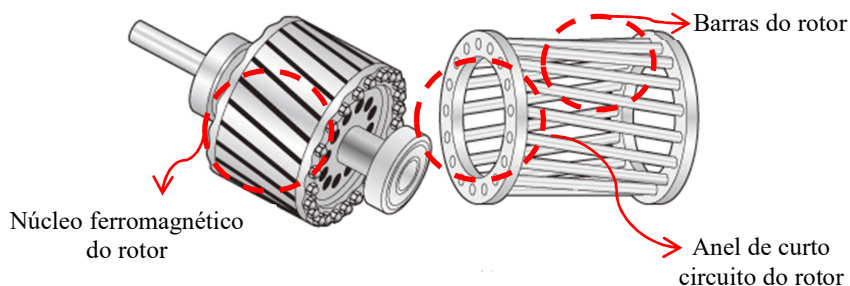
Neste tipo de máquina, os enrolamentos do rotor são curto circuitados e, geralmente, não possuem conexões externas, de modo que as correntes que se desenvolvem neles são induzidas pela variação no tempo das correntes do estator e do movimento relativo do rotor. O tipo de rotor mais utilizado nos motores de indução comercializados no Brasil é de gaiola, ilustrado na Figura 2.5. O rotor em gaiola é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, possuindo em seu interior barras condutoras dispostas paralelamente e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, que curto-circuitam as barras, como ilustra o desenho esquemático da Figura 2.6.

Figura 2.5 – Rotor do tipo gaiola de esquilo.



Fonte: CHAPMAN (2013)

Figura 2.6 – Desenho esquemático de um rotor de gaiola de esquilo.



Fonte: CHAPMAN (2013)

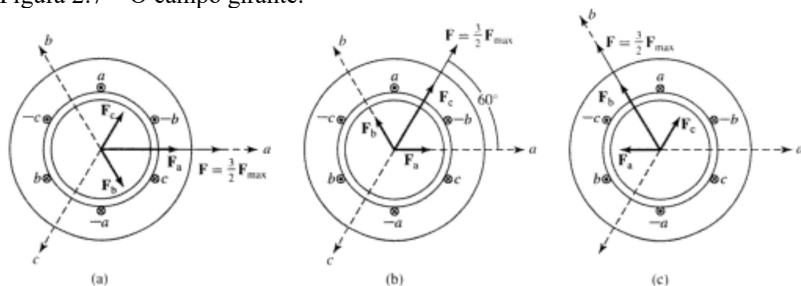
2.2.1 O campo girante

O fundamento básico para o entendimento da operação de motores elétricos polifásicos é o campo girante. Em máquinas de indução trifásicas, o campo girante aparece devido ao posicionamento dos eixos magnéticos dos enrolamentos do estator, que são defasados espacialmente de 120° . O seu efeito é equivalente ao de um ímã permanente rotacionando no entreferro a uma velocidade constante.

Devido ao posicionamento dos eixos magnéticos, as correntes elétricas que fluem pelos enrolamentos criam campos magnéticos pulsantes em cada fase, defasados espacialmente também de 120° . Além disso, devido à natureza do sistema trifásico, as correntes aplicadas em cada fase estão defasadas de 120° elétricos.

A resultante da combinação dos campos gerados por cada fase é um campo magnético de amplitude constante que rotaciona a uma velocidade também constante. Tal fenômeno pode ser visualizado qualitativamente nas três situações mostradas na Figura 2.7, na qual a , b e c representam os enrolamentos das três fases e seus respectivos eixos magnéticos.

Figura 2.7 – O campo girante.



Fonte: FITZGERALD (2006)

Considerando a primeira situação, na qual a corrente elétrica no enrolamento a é máxima, a força magnetomotriz (FMM) deste enrolamento (F_a) encontrará o seu valor máximo (F_{\max}) ao longo do eixo magnético da fase a . Neste instante de tempo, as correntes das demais fases possuem módulo duas vezes menor que a corrente da fase a , gerando uma FMM também duas vezes menor sobre os seus respectivos eixos magnéticos (F_b e F_c). A soma das contribuições individuais de F_a , F_b e F_c neste instante de tempo resultam em um vetor F cujo módulo vale 1,5 vezes F_{\max} . Em um instante de tempo posterior, descrito na segunda situação da Figura 2.7, a corrente da fase c está em seu pico negativo, enquanto as correntes nas demais fases possuem valores cujos módulos são a metade do valor da fase c , fazendo com que o módulo da FMM resultante das contribuições parciais de todas as fases seja igual à da primeira situação ($1,5 F_{\max}$). No entanto, esta FMM está 60° elétricos defasada em relação à da primeira situação. O mesmo pode ser visualizado na terceira situação.

Desse modo, como citado em um parágrafo anterior, a interação entre os campos magnéticos gerados nas três fases formam um campo magnético resultante de módulo constante que gira em uma velocidade angular constante.

A velocidade do campo girante é proporcional à frequência das correntes impostas no estator e ao número de polos do motor e é definida pela Equação 5.

$$n_{sinc} = \frac{120 f}{2 p} [rpm] \quad \text{Equação 5}$$

Na qual,

- n_{sinc} é a velocidade angular do campo girante, em rpm;
- f é a frequência das correntes aplicadas no estator, em Hz, e;
- p é o número de pares de polos da máquina.

2.2.2 Escorregamento

O movimento relativo do rotor em relação ao campo girante induz uma força eletromotriz nos enrolamentos do rotor, os quais, por formarem circuitos fechados, são percorridos por correntes induzidas.

As correntes induzidas no rotor têm sentido de tal forma a gerar um campo magnético que tende a se opor à variação do fluxo concatenado formado pelo campo girante do estator. Dessa forma, surge um torque que induz movimento no rotor de maneira a diminuir a tensão induzida nos enrolamentos do rotor.

Contudo, há um limite superior para a velocidade do rotor. Se este girasse à velocidade síncrona, não haveria movimento relativo entre o campo girante e o rotor. Desse modo, a tensão induzida nas barras do rotor deixaria de existir, assim como as correntes induzidas, de maneira que o torque induzido também desapareceria. Assim, o rotor desaceleraria, por razão das perdas por atrito. Por tal razão, um motor de indução, por meios normais, atinge velocidades próximas à síncrona, sem nunca a atingir plenamente.

Para quantificar o movimento relativo entre o campo girante e o rotor, usualmente utiliza-se uma grandeza chamada escorregamento. Esta grandeza é definida pela Equação 6.

$$s = \frac{n_{sinc} - n_{rotor}}{n_{sinc}} \cdot 100 \quad \text{Equação 6}$$

Nessa equação,

- s é o escorregamento e;
- n_{rotor} é a velocidade angular do rotor.

Diversas relações são derivadas da expressão definida pela equação acima, uma das mais importantes diz respeito à frequência das correntes induzidas no rotor, que podem ser expressas pela Equação 7, na qual f_r representa a frequência das correntes induzidas no rotor.

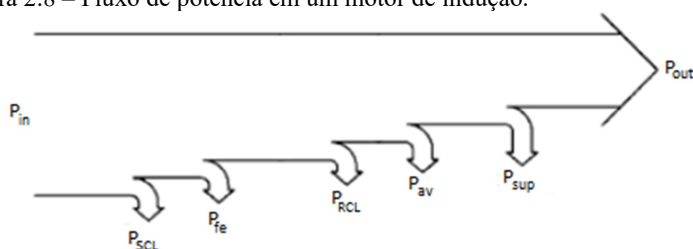
$$f_r = s \cdot f$$

Equação 7

2.2.3 Perdas em um motor de indução

Uma maneira de analisar a operação de um motor de indução é através do seu fluxo de potência. Este inicia na potência elétrica fornecida ao motor (P_{in}) e finaliza na potência mecânica entregue ao eixo (P_{out}), que realiza o trabalho sobre a carga. Através do equacionamento do fluxo de potência determinam-se as perdas envolvidas no processo de transformação de energia. Este fluxo de potência pode ser visualizado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Fluxo de potência em um motor de indução.



Fonte: CHAPMAN (2013), editado pelo autor

Na Figura 2.8 é possível identificar as perdas envolvidas no processo de conversão eletromecânica de energia. Estas perdas se dividem em perdas nos enrolamentos do estator (P_{SCL}), perdas no núcleo ferromagnético por correntes de Foucault e por histerese (P_{fe}). A

potência de perdas nos enrolamentos do rotor (P_{RCL}), perdas por atrito e ventilação (P_{av}) e perdas suplementares (P_{sup}). O rendimento de um motor de indução é definido pela Equação 8.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \text{Equação 8}$$

Na qual η é o rendimento do motor, P_{out} é a potência útil do motor, entregue à carga, e P_{in} é a potência elétrica de entrada.

2.2.3.1 Perdas nos enrolamentos

As perdas nos enrolamentos do estator e do rotor são devidas à passagem de corrente elétrica por eles, causando efeito Joule. Estas perdas podem ser definidas pela Equação 9.

$$P = \sum_{i=a}^c R_i \cdot I_i^2 \quad \text{Equação 9}$$

Nesta equação,

- P representa as perdas trifásicas nos enrolamentos, seja do estator ou do rotor;
- R é a resistência elétrica de cada fase do enrolamento em questão;
- I é a corrente eficaz que flui por ele;
- i está inserido nesta equação como um índice que varia entre a , b e c ;
- a representa a fase a
- b representa a fase b ;
- c representa a fase c ;

Estas perdas podem ser determinadas, também, através de ensaios de rotor bloqueado, detalhados posteriormente neste trabalho.

2.2.3.2 Perdas no núcleo ferromagnético

As perdas no núcleo ferromagnético, ou simplesmente perdas no ferro, acontecem em decorrência de correntes parasitas, também chamadas de correntes de Foucault, e do fenômeno da histerese magnética.

As correntes de Foucault são induzidas pela variação do fluxo magnético no núcleo ferromagnético do equipamento, por este ser também um material condutor. Estas correntes circulando no núcleo ferromagnético causam dissipação de calor por efeito Joule e, por consequência, perdas de energia. Estas correntes parasitas são limitadas pela resistência elétrica do material do núcleo. Uma das maneiras de elevar a resistência elétrica do material, e por consequência diminuir as perdas por correntes de Foucault, é dividir o núcleo em lâminas isoladas eletricamente entre si e utilizar ligas de ferro e materiais semicondutores, como o silício, por exemplo, e impurezas adequadas.

Uma vez que o caminho por onde as correntes induzidas fluem é limitado fisicamente com a laminação do material do núcleo, a sua resistência elétrica equivalente aumenta, reduzindo assim a energia dissipada nessa porção.

As perdas por histerese correspondem ao trabalho gasto para a orientação dos domínios magnéticos do material utilizado no núcleo ferromagnético, em cada ciclo de magnetização. Uma vez que a orientação dos domínios magnéticos acontece a cada ciclo de magnetização, as perdas por histerese são diretamente proporcionais à frequência da tensão de alimentação do motor. As perdas no núcleo ferromagnético do estator podem ser expressas através da Equação 10, desconsiderado o fluxo disperso. [10]

$$P_{fe} = (k_h \cdot f \cdot \emptyset^2) + (k_e \cdot f^2 \cdot \emptyset^2) \quad \text{Equação 10}$$

Na equação acima,

- P_{fe} são as perdas no ferro do estator;
- k_h é o coeficiente de histerese;
- k_e é o coeficiente de correntes de Foucault;
- f é a frequência fundamental da tensão de alimentação;
- \emptyset é o fluxo magnético presente no entreferro da máquina.

Uma vez que a frequência das correntes induzidas no rotor é reduzida pelo escorregamento, as perdas por histerese e por correntes parasitas nesta região da máquina também sofrem influência deste fator. A Equação 11 expressa as perdas no ferro do rotor.

$$P_{fr} = (k_h \cdot s \cdot f \cdot \varnothing^2) + (k_e \cdot (s \cdot f)^2 \cdot \varnothing^2) \quad \text{Equação 11}$$

Estas perdas podem ser determinadas, de forma aproximada, com a realização de um ensaio a vazio, detalhado posteriormente neste trabalho.

No entanto, para uma análise mais precisa, os coeficientes de histerese e de correntes de Foucault do material podem ser obtidos a partir de ensaios específicos e que fogem do escopo deste trabalho.

2.2.3.3 Perdas por atrito e ventilação

As perdas por atrito e ventilação consistem nas perdas mecânicas associadas à operação dos motores. Elas contemplam, por exemplo, as perdas aerodinâmicas, as perdas por atrito nos mancais e as devido à carga “extra” conectada ao eixo referente ao ventilador utilizado no resfriamento do motor. Estas perdas podem ser determinadas de forma aproximada a partir do ensaio a vazio.

2.2.3.4 Perdas suplementares

As perdas suplementares podem ser segregadas em duas parcelas principais: as de baixa e as de alta frequência. As de baixa frequência são consequência, principalmente, do fluxo disperso nas ranhuras do estator, nas cabeças de bobinas e na extremidade do pacote do motor, que induzem correntes elétricas nestes componentes, causando efeito Joule. As perdas suplementares de alta frequência aparecem no estator e no rotor. As do rotor são devido aos harmônicos da força magnetomotriz produzidos pela corrente no estator, enquanto as do estator são em decorrência dos harmônicos na força magnetomotriz produzidos pelas correntes do rotor.

Conforme exposto no parágrafo precedente, as perdas suplementares ocorrem tanto no rotor quanto no estator. Todavia, é usual, de acordo com o fluxo de potência exposto na Figura 2.8, considerar que estas perdas estão concentradas no rotor. De acordo com a Norma 112 da IEEE [11] as perdas suplementares podem ser estimadas em função da potência mecânica no eixo do rotor, como expõe a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Perdas suplementares em função da potência nominal do motor.

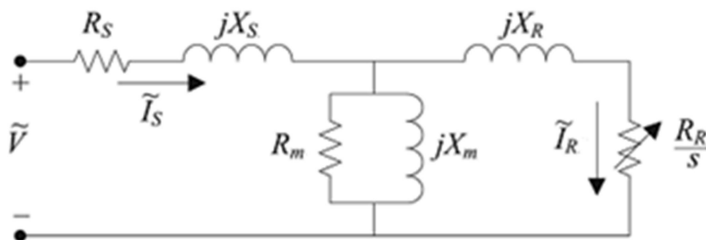
Potência nominal [kW]	Perdas suplementares [%]
1 – 90	1,8
91 – 375	1,5
376 – 1850	1,2
>1851	0,9

Fonte: IEEE (2014)

2.2.4 Modelo em regime permanente

Outra maneira de modelar matematicamente o comportamento de um motor de indução, em regime permanente, é representar os fluxos magnéticos envolvidos na sua operação e as suas perdas por efeito Joule através de um circuito elétrico equivalente. Nesta representação, as perdas são simuladas pela dissipação de energia em resistências elétricas enquanto os fluxos magnéticos são representados por reatâncias. Considerando que as características construtivas dos enrolamentos das três fases do motor são idênticas e que a alimentação é igualmente equilibrada, é possível representar o comportamento da máquina por um circuito elétrico equivalente por fase, ilustrado na figura seguinte. [9]

Figura 2.9 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução trifásico.



Fonte: FITZGERALD (2006)

Na qual,

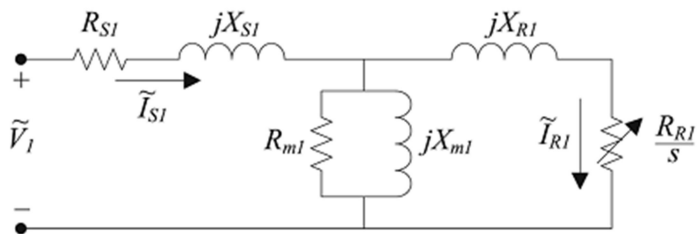
- V representa a tensão imposta no estator;
- I_s é a corrente que flui pelos enrolamentos do estator;
- R_s equivale à resistência dos enrolamentos do estator;
- X_s é a reatância de dispersão do estator;
- R_m representa a resistência de perdas no ferro;
- X_m é a reatância de magnetização do núcleo;
- R_r equivale à resistência dos enrolamentos do rotor referida ao estator;
- X_r representa a reatância de dispersão do rotor referida ao estator;
- I_r é a corrente que flui pelo rotor e referida ao estator;
- s é o escorregamento da máquina.

Contudo, quando a alimentação de um MIT não é equilibrada, o comportamento da máquina não pode ser descrito pelo circuito acima apresentado. Dessa forma, faz-se necessária a representação do desempenho do motor utilizando o conceito de componentes simétricas.

A resposta da máquina às tensões de sequência positiva é similar à resposta sob condições balanceadas. Entretanto, correntes de sequência negativa induzem um campo girante cujo sentido de rotação é o oposto do gerado pelas correntes de sequência positiva. O motor se comporta como a soma de dois motores distintos, um de sequência positiva, girando a um escorregamento s e outro de sequência negativa, rotacionando a um escorregamento igual a $(2-s)$.

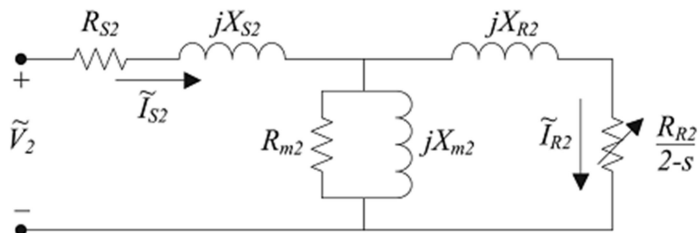
Dessa maneira, considerando ser válida a aplicação do teorema da superposição para circuitos lineares, o comportamento do motor pode ser descrito por três circuitos distintos: o de sequência positiva, o de sequência negativa e o de sequência zero. As figuras seguintes ilustram estes circuitos. Nestas figuras, os elementos de circuitos são os mesmos descritos para a Figura 2.9, contudo há a diferença quanto aos índices 0, 1 e 2, que indicam as grandezas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Figura 2.10 – Circuito equivalente por fase de seqüência positiva.



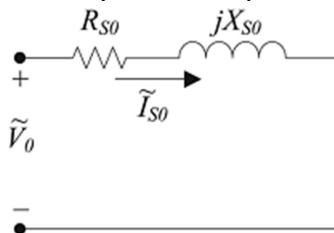
Fonte: FITZGERALD (2006) editado pelo autor.

Figura 2.11 – Circuito equivalente por fase de seqüência negativa.



Fonte: FITZGERALD (2006) editado pelo autor.

Figura 2.12 – Circuito equivalente por fase de seqüência zero.



Fonte: FITZGERALD (2006) editado pelo autor.

Os equacionamentos para o cálculo das correntes de sequência zero, positiva e negativa estão listados nas equações seguintes.

Sequência zero:

$$Z_0 = R_{s0} + jX_{s0} \quad \text{Equação 12}$$

$$I_{s0} = \frac{V_0}{Z_0} \quad \text{Equação 13}$$

Sequência positiva:

$$Z_{m1} = \frac{R_{m1} \cdot jX_{m1}}{R_{m1} + jX_{m1}} \quad \text{Equação 14}$$

$$Z_{r1} = \frac{R_{r1}}{s} + jX_{r1} \quad \text{Equação 15}$$

$$Z_{s1} = R_{s1} + jX_{s1} \quad \text{Equação 16}$$

$$Z_1 = Z_{s1} + \frac{Z_{m1} \cdot Z_{r1}}{Z_{m1} + Z_{r1}} \quad \text{Equação 17}$$

$$I_{s1} = \frac{V_1}{Z_1} \quad \text{Equação 18}$$

Sequência negativa:

$$Z_{m2} = \frac{R_{m2} \cdot jX_{m2}}{R_{m2} + jX_{m2}} \quad \text{Equação 19}$$

$$Z_{r2} = \frac{R_{r2}}{2-s} + jX_{r2} \quad \text{Equação 20}$$

$$Z_{s2} = R_{s2} + jX_{s2} \quad \text{Equação 21}$$

$$Z_2 = Z_{s2} + \frac{Z_{m2} \cdot Z_{r2}}{Z_{m2} + Z_{r2}} \quad \text{Equação 22}$$

$$I_{s2} = \frac{V_2}{Z_2} \quad \text{Equação 23}$$

Nas quais:

- Z_0 é a impedância equivalente do circuito de sequência zero;
- Z_{m1} é a impedância equivalente de magnetização de sequência positiva;
- Z_{m2} é a impedância equivalente de magnetização de sequência negativa;
- Z_{r1} é a impedância equivalente do rotor de sequência positiva;
- Z_{r2} é a impedância equivalente do rotor de sequência negativa;
- Z_{s1} é a impedância equivalente do estator de sequência positiva;
- Z_{s2} é a impedância equivalente do estator de sequência negativa;
- Z_1 é a impedância equivalente do circuito de sequência positiva;
- Z_2 é a impedância equivalente do circuito de sequência negativa;
- I_{s0} é a corrente de sequência zero nos enrolamentos do estator;
- I_{s1} é a corrente de sequência positiva nos enrolamentos do estator;
- I_{s2} é a corrente de sequência negativa nos enrolamentos do estator;

Conforme pode ser visto em [12], com relação ao estator e ao núcleo, usualmente utilizam-se os mesmo dados paramétricos tanto para sequência positiva quanto para sequência negativa. Em contrapartida, os

parâmetros do rotor diferem de $\sqrt{2}$, em virtude do aumento da frequência das correntes do rotor no modelo de sequência negativa. Este aumento da frequência altera a penetração do campo magnético nas barras do rotor, diminuindo a sua reatância indutiva e elevando a sua resistência elétrica, conforme mostram as equações a seguir:

$$R_{r2} = \sqrt{2}R_{r1} \quad \text{Equação 24}$$

$$X_{r2} = \frac{X_{r1}}{\sqrt{2}} \quad \text{Equação 25}$$

2.2.5 Determinação dos parâmetros de um MIT

Para que os modelos apresentados nos itens anteriores representem a operação de motores reais, a determinação dos seus parâmetros equivalentes é de suma importância. A norma IEEE 112 [11] expõe quatro métodos para a determinação destes parâmetros.

O primeiro corresponde a um teste de rotor travado, a corrente nominal, sendo a frequência da tensão de alimentação, no máximo, igual a 25 % da nominal.

O segundo método descrito nessa norma corresponde ao um teste de rotor travado, novamente a corrente nominal. Este método difere do anterior na questão da frequência da tensão de alimentação. Neste teste são utilizados três pontos de medição, com frequências iguais a 100 %, 50 % e no máximo 25 % da nominal.

O terceiro método utiliza um ponto de operação no qual o escorregamento do motor é praticamente o nominal.

O quarto método se resume a um teste de rotor travado a frequência nominal e é recomendado quando não for possível empregar os demais métodos.

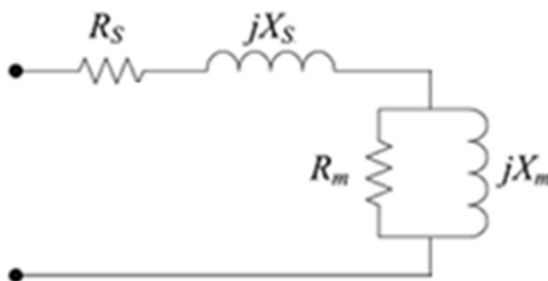
Neste trabalho utilizou-se o método três para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor avaliado. Além disso, vale ressaltar que todos os quatro métodos resumidos nos parágrafos anteriores utilizam dados do ensaio em vazio, que será detalhado em item posterior e de medições da resistência do estator corrigidas pela temperatura de operação do motor. Destas últimas medições se determina R_s .

2.2.5.1 Ensaio a vazio

Através do ensaio a vazio é possível determinar informações a respeito do ramo de magnetização do circuito equivalente de um motor de indução, assim como das perdas no núcleo ferromagnético e das perdas rotacionais.

Neste teste aplica-se a tensão nominal da máquina permitindo que o seu rotor rote livremente. Nestas condições, a despeito das perdas rotacionais, a potência mecânica desenvolvida no eixo tende a zero, assim como o escorregamento, de modo que o circuito equivalente por fase pode ser aproximado pelo exposto na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução trifásico durante o ensaio a vazio.



Fonte: FITZGERALD (2006) editado pelo autor.

Com o motor nas condições descritas no parágrafo anterior, aplica-se a tensão nominal no motor e mede-se a tensão, a corrente e a potência elétrica. A potência elétrica medida neste ensaio contempla as perdas Joule na resistência do enrolamento do estator, as perdas no núcleo ferromagnético do motor e as perdas rotacionais, como dado pela Equação 26.

$$P_{rv} = P_{rvrs} + P_{rvferro} + P_{rot} \quad \text{Equação 26}$$

Na qual o índice rv indica as grandezas determinadas durante o ensaio a vazio, de modo que P_{rv} é a potência total medida, P_{rvrs} , são as

perdas na resistência dos enrolamentos do estator, $P_{rvferro}$ as perdas no ferro e P_{rot} as perdas rotacionais, por atrito e ventilação. As perdas no enrolamento do estator podem ser calculadas em função da resistência deste enrolamento, obtida por uma medição direta nos terminais do motor (corrigida pela temperatura), e da corrente elétrica medida no ensaio a vazio. Já as perdas rotacionais podem ser determinadas de duas maneiras. Elas podem ser aproximadas como sendo iguais às perdas no ferro e assim determinadas através da Equação 27 e da Equação 28, ou então a partir do ensaio de separação de perdas.

Para a realização do ensaio de separação de perdas reduz-se gradativamente a tensão de alimentação do motor até que sua corrente atinja seu valor mínimo. Com os valores de potência elétrica e tensão medidas no decorrer deste procedimento, traça-se uma curva que relaciona a potência com o quadrado da tensão, de forma que esta apresente um caráter linear. As perdas rotacionais são então obtidas da extrapolação desta curva até a sua intersecção com o eixo das ordenadas do gráfico.

Dessa forma, através de manipulações algébricas da Equação 26 é possível determinar as perdas no ferro, como indica a Equação 27.

$$P_{rvferro} = P_{rv} - P_{rvrs} - P_{rot} \quad \text{Equação 27}$$

$$P_{rvrs} = I_{rv}^2 R_s \quad \text{Equação 28}$$

2.2.5.2 Ensaio de escorregamento nominal

De posse dos dados do ensaio em vazio calcula-se a reatância total (jX_s e jX_m) de cada fase em três pontos deste ensaio: o ponto no qual a tensão é nominal, o no qual o escorregamento é nominal e o no qual a reatância total é máxima.

A reatância máxima é tomada como uma primeira aproximação para $(X_s + X_m)$ enquanto a reatância no ponto de escorregamento nominal é considerada como um ponto de partida para $(X_s + X_r)$.

Utilizando os valores de tensão (\dot{V}_{sn}), corrente (\dot{I}_{sn}), potência ativa (P_{sn}) e reativa (Q_{sn}) do estator do ponto de operação em que o escorregamento é nominal aplica-se as seguintes equações

iterativamente até que as variações de X_s e X_r sejam inferiores a 0,1 %. Os índices sn indicam grandezas obtidas do ensaio de escorregamento nominal.

$$X_s = (X_s + X_r) \frac{X_s/X_r}{1 + X_s/X_r} \quad \text{Equação 29}$$

$$X_m = (X_s + X_m) - X_s \quad \text{Equação 30}$$

$$\dot{E}_{sn} = \dot{V}_{sn} - (R_s + jX_s) \cdot \dot{I}_{sn} \quad \text{Equação 31}$$

$$R_m = \frac{3E_{sn}^2}{P_{rvferro}} \quad \text{Equação 32}$$

$$\dot{I}_{msn} = \frac{\dot{E}_{sn}}{\dot{Z}_m} \quad \text{Equação 33}$$

$$\dot{I}_{rsn} = \dot{I}_{sn} - \dot{I}_{msn} \quad \text{Equação 34}$$

$$X_r = \frac{Q_{sn}/3 - I_{sn}^2 X_s - E_{sn}^2/X_m}{I_{rsn}^2} \quad \text{Equação 35}$$

Após a determinação das reatâncias do estator e do rotor, calcula-se a resistência do rotor, referida ao estator através da Equação 36. Esta deve ser ainda corrigida em função da temperatura de operação do motor.

$$R_r = s \operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{E}_{sn}}{\dot{I}_{rsn}} \right\} \quad \text{Equação 36}$$

De posse destes valores, deve-se utilizar os dados do ensaio a vazio em tensão nominal para determinar um valor mais preciso de R_m . Para isto pode-se utilizar o seguinte equacionamento.

$$\dot{E}_{rv} = \dot{V}_{rv} - (R_s + jX_s) \cdot \dot{I}_{rv} \quad \text{Equação 37}$$

$$R_m = \frac{3E_{rv}^2}{P_{rv\text{ferro}}} \quad \text{Equação 38}$$

Vale lembrar que todas as resistências calculadas devem ser corrigidas pelas temperaturas de operação do motor avaliado.

3 DADOS COLETADOS: DESEQUILIBRIO DE TENSÃO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS E ENSAIOS REALIZADOS

A qualidade de energia elétrica é fator de preocupação no ambiente industrial. Alta distorção harmônica, flutuações de tensão, variações na frequência e desequilíbrios de tensão são alguns dos fenômenos que depreciam a qualidade da energia elétrica de uma instalação e impactam no correto funcionamento dos equipamentos inseridos nesta rede.

Com o intuito de determinar o comportamento de motores de indução trifásicos alimentados com tensões desequilibradas, foram realizados ensaios práticos com o auxílio de uma bancada experimental instalada no Laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. Estes ensaios serviram para comparar e validar os resultados de simulações em regime permanente deste mesmo motor.

3.1 DESEQUILIBRIO DE TENSÃO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

Com o objetivo de determinar a influência real do desbalanceamento de tensões em motores instalados atualmente no setor industrial brasileiro, foi realizado um levantamento de medições realizadas pela Ecoeficiência Engenharia Ltda. Estas medições consistem em dados de tensão e corrente de linha nas três fases de motores de indução trifásicos, potência elétrica e fator de potência de mais de 244 motores instalados em quatro fábricas localizadas no estado de São Paulo e do Paraná. A potência nominal destes motores variou entre 10 e 350 cv. A Tabela 3.1 apresenta o número de motores medidos e total da potência elétrica envolvida em cada unidade.

Tabela 3.1 – Dados gerais do banco de dados.

Fábrica	Tensão nominal [V]	Número de motores	Potência total [kW]
Fábrica 1	380	65	940,7
Fábrica 2	440	80	2.922,0
Fábrica 3	440	45	595,0
Fábrica 4	440	54	3.094,0
Total	-	244	7.551,7

A partir dos dados apresentados na tabela anterior é possível estimar o consumo e o custo anual da energia elétrica utilizada para o acionamento destas máquinas. Estes dados estão expostos na Tabela 3.2. O custo da energia elétrica foi obtido através de uma média dos valores praticados nas fábricas citadas na tabela anterior nos anos de 2014 e 2015. Vale ressaltar que estas plantas se enquadram como consumidores livres de energia.

Tabela 3.2 – Custo anual médio da operação dos motores medidos.

Número de horas de operação anuais [h]	8.400
Custo médio da energia elétrica [R\$/MWh]	200,00
Potência total [kW]	7.551,7
Consumo Anual [MWh]	63.434,62
Custo Anual [R\$]	12.686.923,2

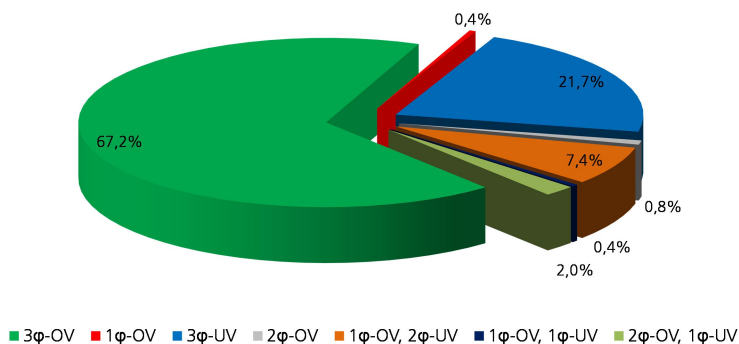
Os desequilíbrios de tensões encontrados nas medições destes motores foram classificados conforme a legenda da Tabela 2.1. A Tabela 3.3 mostra o número de motores alimentados com cada tipo de desequilíbrio exposto na tabela anterior. Em nenhuma das medições realizadas encontrou-se as condições de balanceamento perfeito, subtensão em duas fases ou subtensão em apenas uma fase.

Tabela 3.3 – Desequilíbrios de tensão encontrados nas medições.

Tipo de desequilíbrio	Quantidade
3φ-OV	164
2φ-OV	2
1φ-OV	1
3φ-UV	53
2φ-OV, 1φ-UV	5
1φ-OV, 2φ-UV	18
1φ-OV, 1φ-UV	1

Com base nos dados expostos na tabela anterior, a Figura 3.1 apresenta a contribuição de cada tipo de desbalanceamento entre os dados medidos de forma gráfica.

Figura 3.1 – Tipos de desequilíbrio entre os dados medidos.



Os dados apresentados na figura anterior evidenciam que, entre os 244 motores medidos, mais de 65 % apresentaram sobretensão nas três fases, enquanto cerca de 3 % deles sobretensão em pelo menos duas fases se fez presente. Além disso, 20 % demonstraram subtensões nas três fases, e 7,5 % em pelo menos duas. Convém ressaltar que os tipos de desbalanceamento indicados na figura anterior levam em conta as tensões de linha, de forma que, considerando as respectivas grandezas de fase, os tipos de desequilíbrio podem ser diferentes.

As medições realizadas permitiram calcular o fator de desbalanceamento das tensões de alimentação dos motores analisados. A Tabela 3.4 mostra o desbalanceamento máximo de tensão encontrado nos motores medidos em cada uma das fábricas avaliadas.

Tabela 3.4 – Fator de desbalanceamento máximo nos motores das fábricas avaliadas.

	Tensão [V]			Fator de desbalanceamento [%]
	Fase A	Fase B	Fase C	<i>LVUR</i>
Fábrica 1	376,1	378,8	376,1	0,48
Fábrica 2	440,3	451,5	442,4	1,53
Fábrica 3	437,1	440,2	439,2	0,39
Fábrica 4	433,6	432,9	434,2	0,15

A partir dos dados apresentados na tabela anterior, é possível perceber que o maior fator de desbalanceamento encontrado é inferior a 2 % se considerada a definição da IEC. Além disso, é conveniente destacar o desbalanceamento máximo de cada tipo de desequilíbrio encontrado nas medições realizadas. A Tabela 3.5 expõe os resultados encontrados.

Tabela 3.5 – Fator de desbalanceamento máximo de cada tipo de desequilíbrio avaliado.

Tipo de desequilíbrio	Tensão [V]			Fator de desbalanceamento [%]
	Fase A	Fase B	Fase C	<i>LVUR</i>
3φ-OV	440,3	451,5	442,4	1,53
2φ-OV	381,2	380,0	380,6	0,15
1φ-OV	440,0	440,5	440,0	0,07
3φ-UV	376,1	378,8	376,1	0,48
2φ-OV, 1φ-UV	441,2	442,2	439,9	0,27
1φ-OV, 2φ-UV	437,1	440,2	439,2	0,39
1φ-OV, 1φ-UV	380,0	380,1	379,4	0,11

3.2 ENSAIOS PRÁTICOS

Com o intuito de determinar a redução do rendimento com o desbalanceamento de tensão em um motor de indução trifásico sob condições controladas, foram realizados diversos ensaios em um motor com rotor de gaiola localizado no laboratório de máquinas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. A Figura 3.2 é uma fotografia parcial deste equipamento.

Figura 3.2 – Fotografia parcial do motor ensaiado.



As características nominais do motor foram retiradas da placa de identificação do mesmo, mostrada na Figura 3.3. Estes dados estão resumidos na Tabela 3.6.

Figura 3.3 – Placa de identificação do motor ensaiado

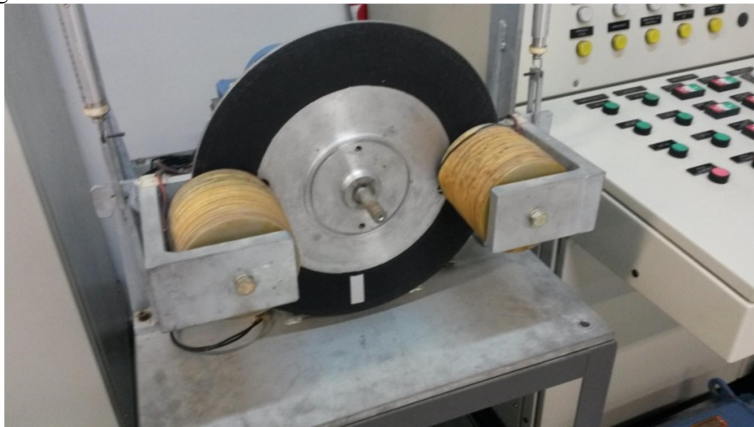


Tabela 3.6 – Características nominais do motor medido.

Fabricante	WEG
Ano de fabricação	2000
Potência nominal [cv]	1,0
Tensão nominal [V]	380/220
Corrente nominal [A]	1,78/3,08
Fator de potência nominal	0,82
Rendimento nominal [%]	78,0
Número de polos	4
Velocidade nominal [rpm]	1.730
Escorregamento nominal [%]	3,9

Os ensaios no motor avaliado foram realizados acoplando-se o eixo do motor a um freio magnético de Foucault. A Figura 3.4 mostra uma fotografia parcial deste equipamento. O braço de alavanca deste freio é igual a 26,7 cm.

Figura 3.4 – Freio de Foucault utilizado nos ensaios.



A partir da utilização do freio de Foucault é possível estabelecer a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor através da medição indireta do torque desenvolvido no eixo e da sua velocidade. Estas medições foram realizadas através de uma balança de precisão conforme mostra a Figura 3.5. Além disso, a velocidade angular do motor foi obtida através de um estroboscópio digital. As figuras subsequentes

apresentam fotografias parciais destes equipamentos de medição, enquanto as suas características nominais estão detalhadas na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8.

Figura 3.5 – Fotografia parcial da balança.



Figura 3.6 – Fotografia parcial do estroboscópio digital.



Tabela 3.7 – Características nominais da balança.

Fabricante	Ohaus
Capacidade	4.100 g
Resolução	0,1 g
Repetibilidade	0,01 g

Tabela 3.8 – Características nominais da câmera estroboscópica.

Fabricante	Shimpo
Modelo	DT315A
Escala	40,0 – 35.000 rpm
Precisão	0,01%

A potência elétrica absorvida pelo motor é mensurada através de um analisador de energia. Este equipamento é não intrusivo, sendo as correntes obtidas através de sensores que captam o campo magnético gerado pelos condutores que alimentam cada uma das fases do motor, enquanto as tensões são obtidas nos terminais da fonte. A Figura 3.7 mostra uma fotografia parcial do analisador de energia, enquanto na Tabela 3.9 estão expostas as características nominais deste equipamento.

Figura 3.7 – Analisador de energia utilizado para a medição de potência elétrica.



Tabela 3.9 – Características nominais do analisador de energia.

Fabricante	Yokogawa
Modelo	CW 240
Tensão máxima admissível [V]	1.000
Precisão [%]	1,0
Modelo da sonda utilizada	96033
Range de medição [A]	50 A

A fonte utilizada para a alimentação do motor, por sua vez, é capaz de impor tensões pré-selecionadas em cada uma das fases. Com esta fonte é possível escolher o nível de tensão de cada fase bem como o ângulo de defasagem de cada uma das fases que alimentam o motor, de forma a selecionar o fator de desbalanceamento desejado. A Figura 3.8 mostra uma fotografia parcial da fonte, enquanto a Tabela 3.10 apresenta as características nominais deste equipamento.

Figura 3.8 – Fonte de tensão utilizada nos ensaios.

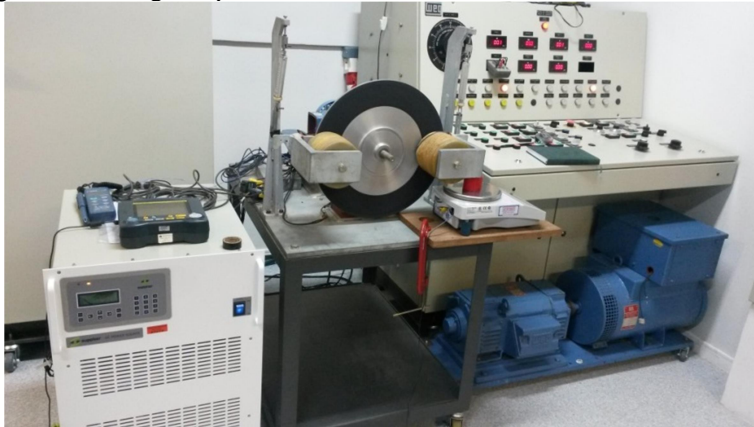


Tabela 3.10 – Características nominais da fonte de tensão.

Fabricante	Supplier
Modelo	FCATHQ 3000-38-50-n55450
Potência nominal [kVA]	30
Tensão de saída [V]	0 a 380
Frequência da saída [Hz]	15 a 500
Corrente nominal de saída [A]	45,4

A Figura 3.9 apresenta uma fotografia parcial da instalação utilizada para a realização dos ensaios.

Figura 3.9 – Fotografia parcial dos ensaios realizados.



Além disso, com o objetivo de determinar os parâmetros do circuito equivalente por fase do motor avaliado, foram realizados testes a vazio e de escorregamento nominal na ocasião da realização dos demais testes.

3.3 SIMULAÇÕES EM REGIME PERMANENTE

A partir dos modelos em regime permanente de um motor de indução, da teoria da superposição para circuitos lineares e da teoria das componentes simétricas, é possível simular o comportamento de um MIT através dos circuitos expostos na Figura 2.10 e na Figura 2.11. Com este intuito, foram realizadas simulações em regime permanente, com o auxílio de softwares de cálculos numéricos. Estas simulações foram realizadas nas mesmas condições descritas para os ensaios práticos no item anterior e os resultados obtidos estão apresentados no capítulo posterior.

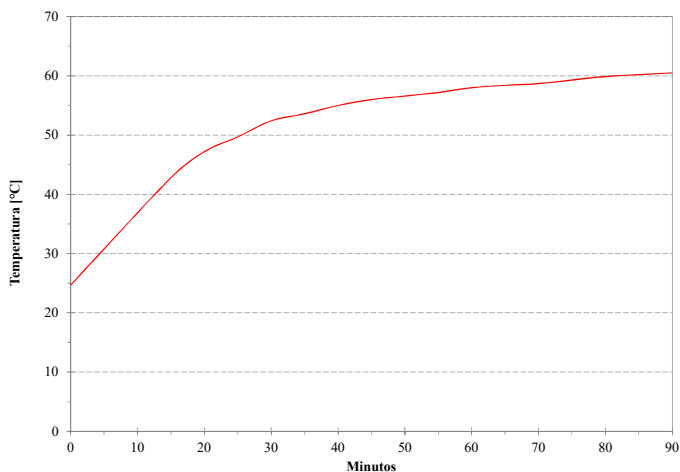
4 ESTUDO DE CASO DE UM MOTOR ALIMENTADO POR TENSÕES DESEQUILIBRADAS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e nas simulações realizadas, conforme descrito no capítulo anterior.

4.1 ENSAIOS PRÁTICOS

Conforme exposto no item 3.2 foram realizados ensaios para determinar a influência do desequilíbrio de tensões em um motor instalado no Laboratório de Máquinas Elétricas da UFSC. Também foram realizados ensaios para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente deste equipamento. Estes ensaios foram realizados após o motor atingir o seu regime permanente, como mostra a Figura 4.1, que apresenta a temperatura do núcleo no período imediatamente anterior ao teste. Esta medição foi realizada através de sensor de temperatura tipo termopar introduzido na caixa de ligação do motor.

Figura 4.1 – Temperatura do núcleo do motor em momentos imediatamente anteriores aos testes.



4.1.1 Ensaios de determinação do rendimento

Com o intuito de identificar a variação do rendimento com o nível e o tipo de desbalanceamento da tensão de alimentação, foram impostas ao motor de indução especificado no item 3.2 tensões desbalanceadas com o auxílio da fonte também citada naquele item. Assim foi possível observar o desempenho do motor operando em diversos níveis e tipos de desequilíbrios de tensão. Uma fotografia parcial da bancada em operação está exposta na Figura 4.2. As tabelas seguintes expõem as tensões de fase impostas pela fonte nos diversos níveis e tipos de desbalanceamento de tensões utilizados.

Figura 4.2 – Bancada durante os ensaios realizados.



As tensões impostas ao motor, juntamente com o seu respectivo fator de desbalanceamento estão indicadas na Tabela 4.1, como exemplo do tipo de desbalanceamento 1ϕ -UV. As tensões impostas para os demais tipos de desequilíbrio estão exibidas no Anexo 1.

Tabela 4.1 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1 ϕ -UV.

V_a	V_b	V_c	V_1	V_2	VUF	$PVUR$	$LVUR$
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
127,0	127,0	123,4	125,8	1,2	1,0	1,0	1,0
127,0	127,0	119,5	124,5	2,5	2,0	2,0	2,0
127,0	127,0	116,0	123,3	3,7	3,0	3,0	3,0
127,0	127,0	112,5	122,2	4,8	4,0	4,0	3,9
127,0	127,0	109,0	121,0	6,0	5,0	5,0	4,9
127,0	127,0	105,5	119,8	7,2	6,0	6,0	5,9
127,0	127,0	102,0	118,7	8,3	7,0	7,0	6,9
127,0	127,0	98,7	117,6	9,4	8,0	8,0	8,0

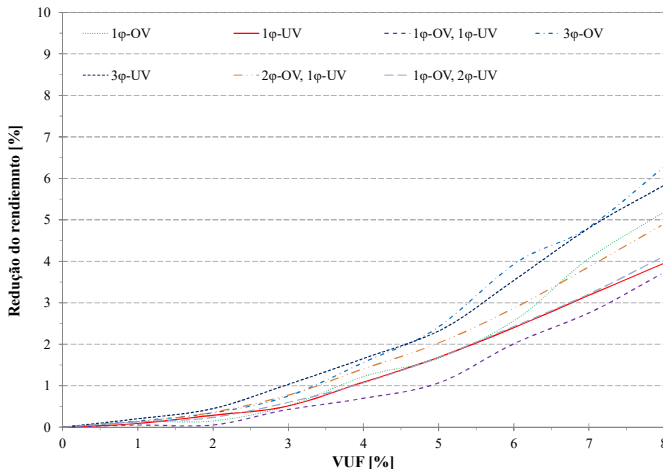
Com o motor operando nas condições expostas na tabela anterior, e nas expostas no Anexo 1, foram coletados dados de potência elétrica, torque e velocidade angular, sendo estes dois últimos utilizados para determinar a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor. Os resultados destas medições estão expostos na Tabela 4.2, como exemplo do tipo de desequilíbrio 1 ϕ -UV, juntamente com o rendimento do motor em cada uma das condições avaliadas. Os resultados obtidos para os demais tipos de desbalanceamento estão expostos no Anexo 1.

Tabela 4.2 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1 ϕ -UV.

VUF	Potência ativa	Torque	Velocidade angular	Potência mecânica	Rendimento
[%]	[W]	[N.m]	[rpm]	[W]	[%]
0,0	916,6	3,7147	1.729,0	672,6	73,4
1,0	926,0	3,7546	1.726,2	678,7	73,3
2,0	931,4	3,7710	1.723,8	680,7	73,1
3,0	935,4	3,7817	1.721,4	681,7	72,9
4,0	942,8	3,7874	1.719,1	681,8	72,3
5,0	952,0	3,7984	1.716,5	682,8	71,7
6,0	962,2	3,8069	1.713,4	683,1	71,0
7,0	971,9	3,8074	1.710,6	682,0	70,2
8,0	983,1	3,8159	1.707,5	682,3	69,4

As reduções do rendimento do motor analisado, para os tipos e níveis de desbalanceamento avaliados, estão apresentadas graficamente na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Redução do rendimento do motor avaliado para cada tipo e nível de desbalanceamento avaliado.



Os dados apresentados na figura anterior mostram que, em valores baixos de VUF (inferiores a 2,5 %), a redução do rendimento do motor avaliado é similar nos tipos de desequilíbrio analisados e inferior a 1,0 %.

Além disso, é possível notar que as maiores reduções de rendimento ocorrem em conjunto com sobre e subtensões nas três fases. Operar motores de indução trifásicos com tensões diferentes das nominais aumenta as perdas, depreciando o seu rendimento.

Uma maneira de verificar apenas a influência do desbalanceamento de tensão é o aumento do VUF mantendo-se a tensão de sequência positiva. Este teste foi realizado nos ensaios de desbalanceamento do tipo 1φ-UV, 1φ-OV. É possível perceber, nas curvas da Figura 4.3, que a correspondente a este tipo de desequilíbrio se encontra sempre abaixo das demais, reforçando a influência das sobretensões e subtensões na redução do rendimento de motores de indução.

4.1.2 Determinação dos parâmetros do circuito equivalente

As seções seguintes mostram os resultados dos ensaios para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor avaliado.

As medições de resistência do estator, já corrigidas pela temperatura do motor no momento dos ensaios, resultaram em uma resistência de $3,862 \Omega$.

4.1.2.1 Ensaio em vazio

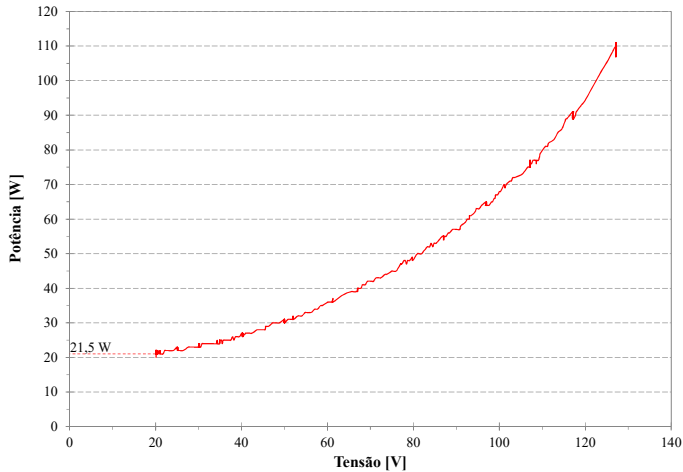
O ensaio em vazio foi realizado para determinar os parâmetros de magnetização do motor avaliado, conforme exposto no item 2.2.5.1. Os resultados das medições estão apresentados na Tabela 4.3. Vale ressaltar que os valores medidos correspondem a valores de linha, para tensões e correntes e a potências trifásicas.

Tabela 4.3 – Medições de grandezas elétricas realizadas no teste em vazio.

Tensão de linha [V]	220,1
Corrente de linha [A]	1,83
Potência ativa[W]	109,3
Potência reativa [VAr]	689,9
Potência aparente [VA]	698,5
Fator de potência	0,156
Ângulo da carga [°]	81,0

Durante o ensaio a vazio foi realizado, também, o teste de separação de perdas com o intuito de determinar as perdas por atrito e ventilação desta máquina. Os resultados encontrados estão ilustrados na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Resultados do ensaio de separação de perdas.



Os resultados expostos na figura anterior indicam que as perdas por atrito e ventilação no motor avaliado correspondem a 21,5 W. Com base no equacionamento indicado no item 2.2.5.1, a Tabela 4.4 apresenta os dados de perdas no ferro e na resistência do estator.

Tabela 4.4 – Perdas no teste em vazio.

P_{rv} [W]	109,3
P_{rot} [W]	21,5
P_{rvrs} [W]	38,7
$P_{rvferro}$ [W]	53,1

4.1.2.2 Ensaio de escorregamento nominal

O ensaio a vazio foi realizado para determinar os parâmetros de magnetização do motor avaliado, conforme exposto no item 2.2.5.1. Os resultados das medições estão apresentados na Tabela 4.3. Vale ressaltar que os valores medidos correspondem a valores de linha, para tensões e correntes e a potências trifásicas.

Tabela 4.5 – Medições de grandezas elétricas realizadas no teste de escorregamento nominal.

Tensão de linha [V]	34,6
Corrente de linha [A]	0,5
Potência ativa[W]	21,7
Potência reativa [VAr]	21,0
Potência aparente [VA]	30,2
Fator de potência	0,718
Ângulo da carga [°]	45,9

Com base no equacionamento indicado no item 2.2.5.2 e nos dados da tabela anterior foi possível determinar os parâmetros do circuito equivalente do motor, indicados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros do circuito elétrico equivalente.

R_s [Ω]	3,86
X_s [Ω]	2,60
R_m [Ω]	785,00
X_m [Ω]	69,74
R_r [Ω]	2,14
X_r [Ω]	3,82

4.2 SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações em regime permanente realizadas com base nos parâmetros do circuito elétrico equivalente, obtidos dos ensaios mostrados no item anterior.

4.2.1 Simulações em regime permanente

Os parâmetros do circuito elétrico equivalente, determinados a partir dos ensaios descritos nos itens 3.2 e 4.1.2, foram inseridos nos modelos dos circuitos elétricos equivalentes, de sequência positiva e negativa.

O torque eletromagnético produzido pelo circuito de sequência negativa possui sentido contrário ao produzido pelo de sequência positiva, de forma que as potências mecânicas destes dois circuitos se subtraem. Em contrapartida, as potências elétricas se somam, modelando assim, a queda de rendimento do motor por razão das tensões de alimentação desequilibradas.

As tensões de alimentação empregadas nas simulações foram as mesmas utilizadas nos ensaios descritos nos itens 3.2 e 4.1.1.

As figuras seguintes mostram a redução do rendimento do motor avaliado através das simulações realizadas, comparadas com os resultados obtidos em ensaios.

Figura 4.5 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -UV.

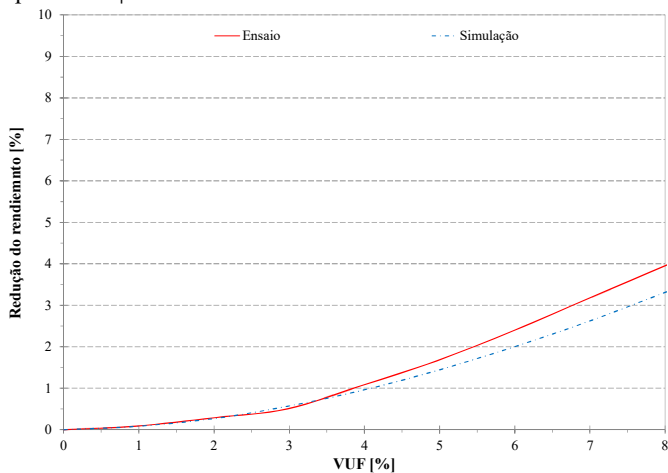


Figura 4.6 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -OV.

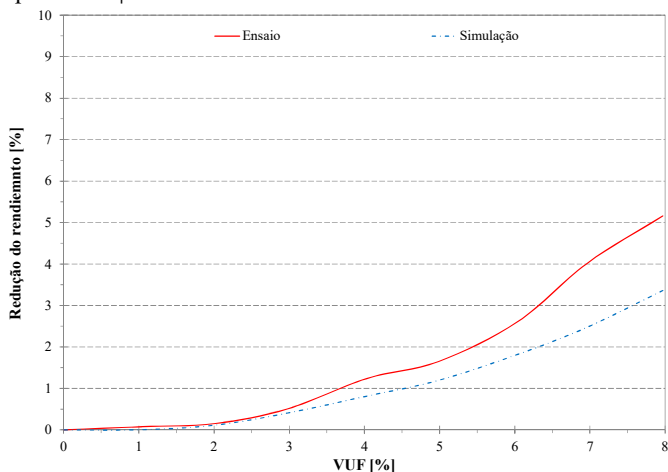


Figura 4.7 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -OV, 1 ϕ -UV.

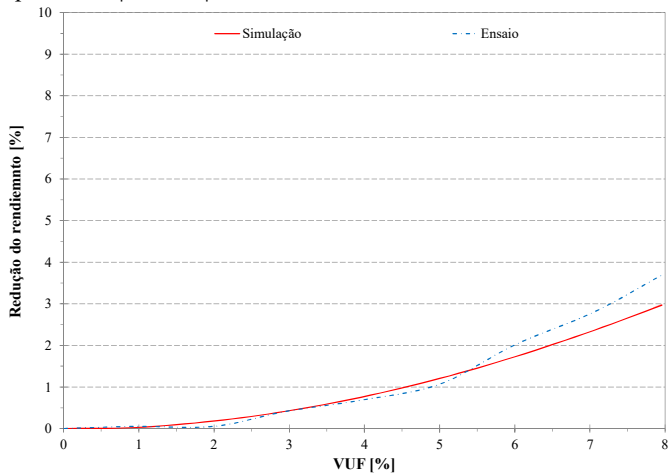


Figura 4.8 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 3 ϕ -UV.

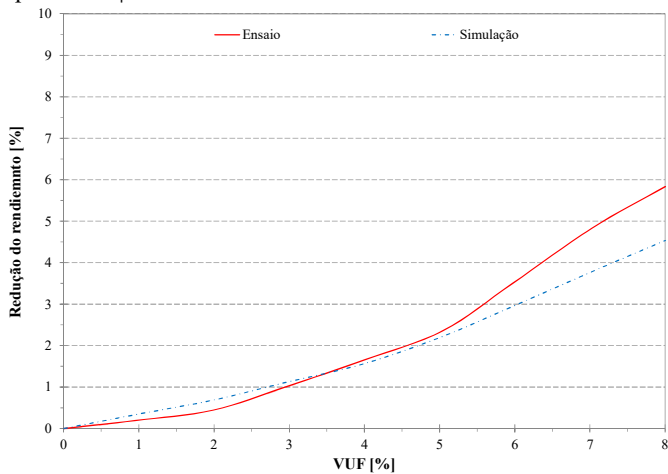


Figura 4.9 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 3 ϕ -OV.

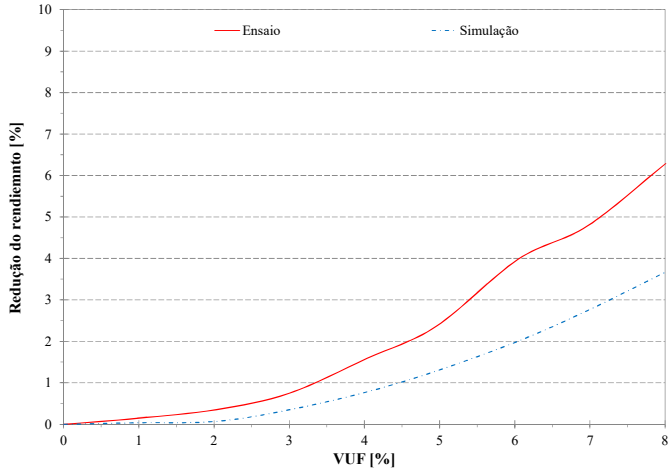


Figura 4.10 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -OV, 2 ϕ -UV.

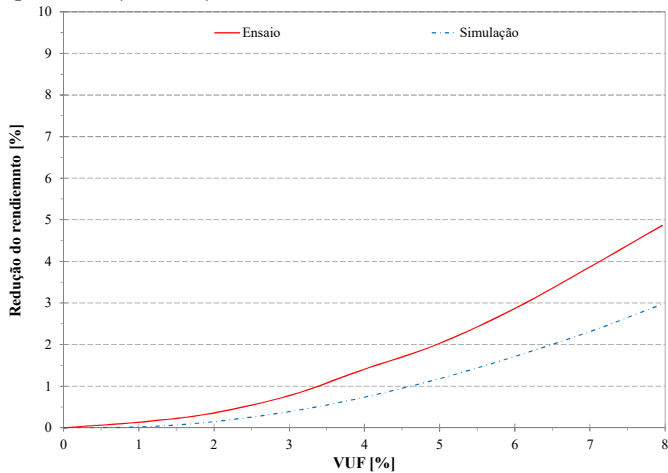
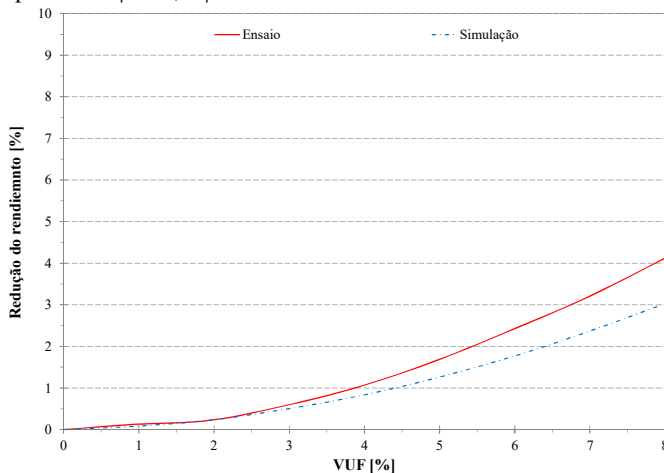


Figura 4.11 – Redução do rendimento do motor avaliado para o tipo de desequilíbrio 2φ-OV, 1φ-UV.



Os dados apresentados nas figuras precedentes mostram que, de modo geral, as reduções no rendimento do motor obtidas das simulações são menores que os resultados encontrados nos ensaios realizados, de forma que estas aproximações podem ser consideradas conservadoras.

Contudo, nota-se a similaridade dos perfis de redução de rendimento, indicando que a não concordância se deve a perdas não inseridas no modelo de simulação.

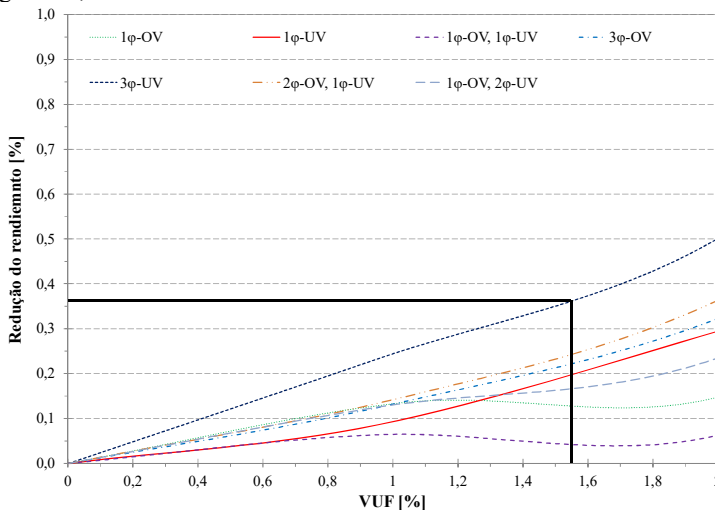
4.3 CONSUMO ANUAL EXCEDENTE EM FUNÇÃO DO DESEQUILIBRIO DE ENERGIA

Os dados apresentados nos itens anteriores indicam que a redução do rendimento de um motor de indução trifásico pode ser superior a 6 %, para níveis de desequilíbrio maiores que 8 %. Contudo, em ambientes industriais, o desequilíbrio típico de tensões que alimentam motores de indução trifásicos não é superior a 1,5 % (LVUR), como pode ser visualizado no item 3.1.

O máximo LVUR encontrado nas medições realizadas em motores instalados em ambientes industriais foi igual a 1,53 %, que corresponde a um VUF de aproximadamente 1,55 %. Para determinar a redução de rendimento máxima de motores submetidos em condições similares e estimar o consumo excedente máximo de energia por conta

deste nível de desequilíbrio, aplicou-se o nível de VUF de 1,55 % aos resultados obtidos dos ensaios realizados, expostos na Figura 4.3 do item 4.1.1. A redução de rendimento máxima neste nível de desequilíbrio está apresentada na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Redução máxima do rendimento do motor avaliado para VUF igual a 1,55 %..



Com base no exposto na figura e no parágrafo anterior, é possível estimar a perda máxima de rendimento e o conseqüente consumo máximo excedente de energia elétrica no conjunto de 244 motores componentes do banco de dados utilizado neste trabalho. Para isto, considerou-se a máxima redução de rendimento em função do desbalanceamento de tensão, 0,36 %, em todos os motores componentes do banco de dados. Vale ressaltar que a redução de rendimento máxima apresentada na figura precedente corresponde ao tipo de desequilíbrio 3φ-UV enquanto o nível máximo de desbalanceamento encontrado nas medições realizadas nas indústrias foi no tipo 3φ-OV. Assim, este trabalho superestima a influência do desbalanceamento na redução de rendimento dos motores e no consumo excedente do conjunto de equipamentos.

Considerando o consumo total estimado de energia elétrica dos motores componentes do banco de dados (63.434,62 MWh), uma redução de 0,6 % representa um consumo excedente máximo de 380,61

MWh anuais, ou R\$ 76.122,00. Estes dados estão resumidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Consumo anual excedente máximo em função do desequilíbrio máximo encontrado nas medições realizadas.

Consumo anual [MWh]	63.434,62
Redução máxima de rendimento em função do desbalanceamento [%]	0,36
Consumo anual excedente [MWh]	228,36
Custo anual excedente [R\$]	45.672,00

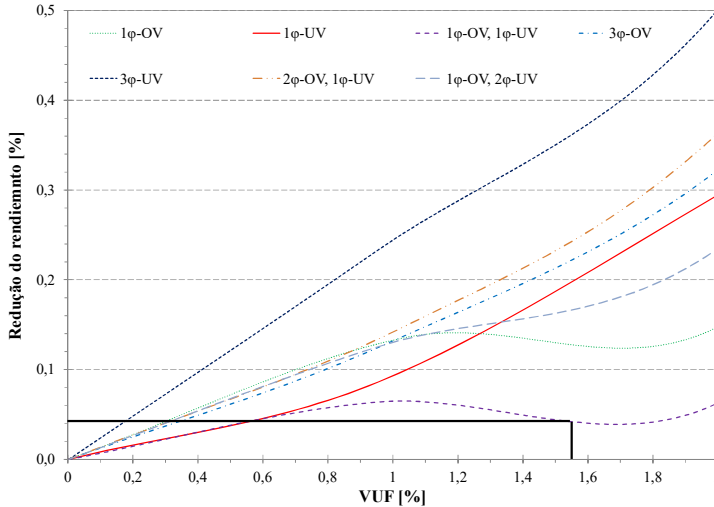
É importante ressaltar que o custo anual excedente exposto na tabela anterior é correspondente a 244 motores divididos em quatro fábricas. Assim, é conveniente estimar o custo excedente máximo para cada fábrica. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Consumo anual excedente máximo nas fábricas nas quais foram medidos os motores componentes do banco de dados criado .

Fábrica	Consumo anual excedente [MWh]	Custo anual excedente [R\$]
Fábrica 1	28,45	5.690,00
Fábrica 2	88,36	17.672,00
Fábrica 3	17,99	3.598,00
Fábrica 4	93,56	18.712,00
Total	228,36	45.672,00

Contudo, vale lembrar que a redução máxima de rendimento considerada corresponde ao tipo de desbalanceamento 3 ϕ -UV, sendo a tensão média, e a de sequência positiva, menores que na condição de perfeito balanceamento (considerando a tensão nominal). Dessa forma, a subtensão influencia também na redução do rendimento. Considerando o tipo de desequilíbrio 1 ϕ -UV, 1 ϕ -OV, que mantém a tensão de sequência positiva igual à nominal do motor, a redução do rendimento no nível de desequilíbrio máximo encontrado no banco de dados é de 0,14 %, como mostra a Figura 4.13.

Figura 4.13 – Redução de rendimento do motor avaliado para VUF igual a 1,55 % e tipo de desbalanceamento 1φ-UV, 1φ-OV.



A partir destes dados é possível estimar o consumo excedente considerando o tipo de desbalanceamento 1φ-UV, 1φ-OV para VUF igual a 1,55 %. A redução de rendimento de 0,04 % representa um consumo excedente anual máximo de 25,37 MWh, no conjunto de motores componentes do banco de dados, que corresponde a custo anual de R\$ 5.074,00.

Com o intuito de determinar o retorno financeiro com a minimização do desbalanceamento de tensão em ambientes industriais, simulou-se o caso mais severo de desequilíbrio inserido no banco de dados, cujo desequilíbrio é de 1,53%. Os dados nominais do motor no qual este desequilíbrio foi encontrado estão expostos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Características nominais do motor avaliado.

Fabricante	WEG
Ano de fabricação	1998
Potência nominal [cv]	100
Tensão nominal [V]	440
Número de polos	4
Velocidade nominal [rpm]	1.775
Escorregamento nominal [%]	1,4

Os resultados das medições realizadas neste motor estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Medições realizadas no motor avaliado.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão de linha [V]	440,3	451,5	442,4
Corrente de linha [A]	97,0	100,8	97,6
Potência ativa [kW]		65,8	
Fator de potência		0,872	

Os parâmetros do circuito equivalente por fase deste motor estão expostos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Parâmetros do circuito elétrico equivalente.

R_s [Ω]	0,032
X_s [Ω]	0,216
R_m [Ω]	52,651
X_m [Ω]	6,725
R_r [Ω]	0,030
X_r [Ω]	0,317

A partir dos dados apresentados anteriormente estimou-se a queda de rendimento, o consumo e o custo excedente em função da operação do motor especificado na Tabela 4.9. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Consumo anual excedente máximo em função do desequilíbrio máximo no motor avaliado.

Potência média [kW]	65,8
Consumo anual [MWh]	552,72
Redução de rendimento em função do desbalanceamento [%]	0,01
Consumo anual excedente [kWh]	55,27
Custo anual excedente [R\$]	11,05

Os dados apresentados na tabela anterior mostram uma redução de rendimento inferior à exposta nos resultados expostos nas análises precedentes. Tais resultados levam à conclusão que, motores de potência maior, com resistências do estator e do rotor menores, são menos

susceptíveis ao desbalanceamento de tensão, considerando suas queda de rendimento.

É possível minimizar o desequilíbrio de tensão com a inserção de um estabilizador de tensão na alimentação dos equipamentos. Com o intuito de determinar o tempo do retorno do investimento considerou-se ser possível alimentar este motor através de um estabilizador de tensão de 100 kVA. Um equipamento deste tipo tem um custo estimado em R\$ 55.549,60, inviabilizando economicamente esta alternativa para a minimização do desbalanceamento de tensões nos níveis encontrados no ambiente industrial atual.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi estudar o comportamento de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desequilibradas, principalmente quanto ao seu rendimento. Motores de indução trifásicos operando nestas condições sofrem com o aumento de perdas, principalmente nos enrolamentos da máquina em função do aparecimento de correntes de sequência negativa. O aumento das perdas causa, conseqüentemente, a redução do rendimento do motor. Além disso, há o aumento de temperatura, ruído e vibrações. O aumento das perdas sob estas condições faz com que o motor não possa mais operar em sua potência nominal, sob o risco de deteriorar o isolamento entre as bobinas dos enrolamentos, elevando ainda mais as perdas e podendo levar o motor à falha. Por tal razão, não é recomendado impor carga nominal ao motor quando ele é alimentado por tensões desbalanceadas. Assim faz-se necessário utilizar um fator de redução da potência nominal da máquina em função do fator de desbalanceamento de tensão.

O fator de desbalanceamento de tensão pode ser calculado de três maneiras distintas. Um considera a razão entre as tensões de sequência negativa e de sequência positiva (VUF). Já as outras duas são calculadas como o máximo desvio da tensão de uma das fases em relações à média, dividido pela tensão média. Uma destas duas utiliza as tensões de fase (PVUR) enquanto a outra utiliza as tensões de linha (LVUR). Usualmente, quando consideradas as mesmas tensões, o PVUR assume valores superiores às demais definições. Além disso, uma vez que esta definição de fator de desequilíbrio de tensões não inclui possíveis desequilíbrios de fase, ela é a menos utilizada. Quando as duas outras definições são comparadas (VUF e LVUR), nota-se que VUF assume valores superiores a LVUR para as mesmas tensões. Tensões de sequência positiva e de sequência negativa são necessárias para a modelagem de motores trifásicos operando em condições desequilibradas. Por tal razão é mais indicada a utilização de VUF para quantificar o nível de desequilíbrio. Contudo, em ambientes industriais, nos quais nem sempre o neutro está disponível para realizar medições de tensões de fase, a utilização de LVUR para a quantificação do nível de desbalanceamento pode ser mais conveniente.

Com o intuito de determinar a redução do rendimento de um MIT alimentado com diversos tipos e níveis de desbalanceamento foram realizados ensaios em laboratório. Adicionalmente, simulações em regime permanente foram executadas com a intenção de comparar os resultados obtidos das simulações com os dados adquiridos dos ensaios.

Estes ensaios mostraram que a redução do rendimento dos motores em função do nível de desequilíbrio segue uma tendência polinomial de segunda ordem, indicando que em baixos níveis de desbalanceamento, inferiores a 2,5 %, a redução do rendimento do motor é menor que 1,0 % para todos os tipos de desbalanceamento testados. Entretanto, é possível perceber que estas reduções podem ser superiores a 6 %, quando o nível de desequilíbrio atinge valores próximos a 8 %. Adicionalmente, a partir dos ensaios e das simulações efetuadas notou-se que cada tipo de desequilíbrio afeta o rendimento do motor com intensidade diferente. Assim, é também importante determinar não apenas o nível do desequilíbrio como também o seu tipo.

Adicionalmente, pode-se concluir, através dos resultados das simulações e dos ensaios realizados, que as reduções de rendimento obtidas nas simulações apresentaram valores inferiores quando comparadas aos resultados adquiridos dos ensaios. Dessa forma, pode-se dizer que os resultados das simulações são conservadores.

Além disso, a partir de um banco de dados construído com base em medições de potência e tensão realizadas em motores atualmente em operação em quatro plantas de diferentes setores e regiões industriais do Brasil, foi possível identificar os níveis de desequilíbrio de tensão a que MITs destas fábricas estão submetidos. Desse modo, com base neste banco de dados, buscou-se estimar o impacto destes desequilíbrios no consumo de energia destas plantas, extrapolando os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório para os motores componentes do banco de dados. As informações armazenadas neste banco de dados mostraram que o tipo de desbalanceamento mais frequente é o 3 ϕ -OV, presente em mais de dois terços das amostras. No entanto, este tipo de desequilíbrio potencializa a redução do rendimento do motor, uma vez que ele é aliado à sobretensões, outro fenômeno que deprecia o rendimento de motores de indução trifásicos. Além disso, o maior nível de desequilíbrio (LVUR) encontrado neste banco de dados foi de 1,53 %, em um desequilíbrio do tipo 3 ϕ -OV. Este nível e tipo de desbalanceamento fazem com que o fator de desbalanceamento (VUF) seja de 1,55 %.

O desequilíbrio de tensão máximo citado no parágrafo anterior corresponde a uma redução de rendimento de aproximadamente 0,36 %. Considerando os mais de 240 motores medidos esta redução de rendimento corresponde a um custo excedente máximo de R\$ 45.672,00. Além disso, vale lembrar que desbalanceamento encontrado é aliado à sobretensão nas três fases, potencializando a depreciação do rendimento. Considerando apenas o desequilíbrio de tensões, mantendo-se as tensões

médias e de sequência positiva inalteradas em relação à nominal (1ϕ -OV, 1ϕ -UV), a redução de rendimento para este mesmo nível de desbalanceamento é de 0,04 %, resultando em um custo excedente máximo de R\$ 5.074,00. Reduções de rendimento desta grandeza inviabilizam financeiramente a correção destes distúrbios que afetam a qualidade da energia fornecida aos equipamentos.

Vale ressaltar que as estimativas apresentadas no parágrafo anterior consideram um motor de 1 cv. Motores de potência baixa, com resistências de estator e rotor de valores elevados são mais susceptíveis a quedas de rendimento em função do desbalanceamento de tensão. Isto fica evidenciado quando se compara os resultados obtidos para um motor de 100 cv, cuja queda de rendimento para o máximo desbalanceamento encontrado em ambientes industriais foi de 0,01 %.

É conveniente lembrar que estudo apresentado neste trabalho leva em conta apenas reduções do rendimento causadas por desequilíbrios de tensão, de modo a considerar os circuitos dos motores equilibrados.

Como sugestão de trabalhos futuros pode-se listar:

- Determinação da influência dos desequilíbrios de tensão nos desequilíbrios de corrente;
- Identificação das causas dos desequilíbrios de corrente, se por conta de desequilíbrios na tensão de alimentação ou por defeitos da máquina;
- Estudo da operação de motores de indução trifásicos submetidos a desequilíbrios de fase;
- Estudo da redução do rendimento de motores de indução acionados por inversores de frequência.

6 REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3ª ed, Brasília: Aneel, 236p, 2008;
- [2] ANEEL, **Contribuição para a normalização da qualidade da energia elétrica – harmônicos e desequilíbrios nas redes elétricas**. Relatório Parcial 6 – Resultados das Medições e Tratamentos, Universidade Federal de Uberlândia, 2000;
- [3] LEE, C.Y., **Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor**, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, no. 2, pp.202 -208,1999;
- [4] C. L. FORTESCUE, **Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks**, A.I.E.E. Trans., vol. 37, pp.1027 - 1140 ,1918;
- [5] ANSI/NEMA, **Motors and Generators, Standard MG1-2003**, Part 14, Published by NEMA, EUA, 2004
- [6] IEEE, **Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants** (Red Book), IEEE standard 141, 1994;
- [7] IEC, **Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors**, Standard IEC 60034-26, Rotating Electrical Machines – Part 26, Published by IEC, Geneva, 2006;
- [8] CHAPMAN, S. J., **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, xix, 684 p., 2013;
- [9] FITZGERALD, A. E.; UMANS, S. D.; KINGSLEY, C.. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 648 p., 2006;
- [10] SOUSA, G.C.D., BOSE, B.K., CLELAND, John; SPIEGEL, Ronald J.. **Loss modeling of converter induction machine system**. International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, vol. 1, pp. 114-120, San Diego,1992;

- [11] IEEE, **Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**, IEEE Standard 112, 2004;
- [12] M. KOSTIC; A. NIKOLIC, A., **Negative consequence of motor voltage asymmetry and its influence on the inefficient energy usage**, Wseas Transaction On Circuits And Systems, Issue 8, Volume 9, pp. 547-556, 2010;
- [13] WILLIAMS, J. E., **Operation of 3-phase induction motors on unbalanced voltages"**, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 73, Pt. III, pp. 125-133, 1954;
- [14] WALLACE, A.K.; Von JOUANNE, A.R.; WIEDENBRUG, E.I.; ANDREWS, P.S.; WOHLGEMUTH, C.W.; DOUGLASS, J.; WAINWRIGHT, G., **The measured effects of under-voltage, over-voltage and unbalanced voltage on the efficiency and power factor of induction motors over wide ranges of load**, Intl. Conf. Electrical Machines and Drives , pp.258 -262, 1997;
- [15] QUISPE, E.; VIEGO, P.; COGOLLO, J., **Statistical Equations to Evaluate the Effects of Voltage Unbalance on the Efficiency and Power Factor of a Three-Phase Induction Motors**, WESEAS Trans. on Circuit and Systems, vol. 4, no. 4, pp.234 -239, 2005;
- [16] PILLAY, P.; MANYAGE M., **Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies**, IEEE Trans. Energy Convers.,vol. 21 ,no. 4 ,pp.813 -822, 2006;
- [17] SANDHU S. K.; CHAUDHARY V., **Simulations of three-phase induction motor operating with voltage unbalance**, In Proc. of Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, pp 273-279,Venice, 2008;
- [18] AKPAMA, E.J.; OKORO, O.I.; CHIKUNI, E., **Simulation of the Performance of Induction Machine under Unbalanced Source Voltage Conditions**, The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 11. Number 1, 2010;

- [19] PATEL, A. R.; CHAUHAN, J. K.; PATEL, D. K., **Simulation for a 3-phase induction motor under unbalanced conditions**, National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, Gujarat, 2011;
- [20] LIVADARU, L.; SIMION, A.; VLASCEANU, S.; MUNTEANU, A.; IRIMIA, D.. **Dual FEM-Simulink analysis of induction motor operating under unbalanced state**, 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp 493 – 502, Brasov, 2012;
- [21] EBADI, A.; MIRZAIIE M.; GHOLAMIAN, A.. **A comparison between electrical circuit and finite element modeling methods for performance analysis of a three-phase induction motor under voltage unbalance**. IJEEE.; 8 (2) :188-194, 2012;
- [22] ALMEIDA, M. L. S.; HOLLANDA, D. L. R.; FERREIRA FILHO, A. L.; MATOS, J. M.. **Comparative evaluation between computational models for representing the three-phase induction motor subjected to voltage unbalance**. In: 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), Montevideú. T&D LA, 2012.

ANEXO 1

Neste capítulo estão exibidas informações adicionais deste trabalho.

As tabelas seguintes apresentam as tensões impostas ao motor durante os ensaios para a determinação do rendimento da máquina sob teste neste trabalho.

Tabela A.1 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1φ-OV.

V_a [V]	V_b [V]	V_c [V]	V_1 [V]	V_2 [V]	VUF [%]	$PVUR$ [%]	$LVUR$ [%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
127,0	127,0	131,0	128,3	1,3	1,0	2,1	0,5
127,0	127,0	134,8	129,6	2,6	2,0	4,0	1,0
127,0	127,0	138,7	130,9	3,9	3,0	6,0	1,5
127,0	127,0	143,0	132,3	5,3	4,0	8,1	2,0
127,0	127,0	147,0	133,7	6,7	5,0	10,0	2,5
127,0	127,0	151,5	135,2	8,2	6,0	12,1	3,1
127,0	127,0	155,5	136,5	9,5	7,0	13,9	3,5
127,0	127,0	160,0	138,0	11,0	8,0	15,9	4,1

Tabela A.2 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1φ-OV, 1φ-UV.

V_a [V]	V_b [V]	V_c [V]	V_1 [V]	V_2 [V]	VUF [%]	$PVUR$ [%]	$LVUR$ [%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
127,0	124,9	129,1	127,0	1,2	1,0	1,7	0,8
127,0	122,6	131,4	127,0	2,5	2,0	3,5	1,7
127,0	120,5	133,5	127,0	3,8	3,0	5,1	2,5
127,0	118,3	135,7	127,0	5,0	4,0	6,9	3,4
127,0	116,0	138,0	127,0	6,4	5,0	8,7	4,3
127,0	113,8	140,2	127,0	7,6	6,0	10,4	5,1
127,0	111,5	142,5	127,0	8,9	7,0	12,2	6,0
127,0	109,5	144,5	127,0	10,1	8,0	13,8	6,8

Tabela A.3 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 3φ-UV.

V_a	V_b	V_c	V_1	V_2	VUF	$PVUR$	$LVUR$
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
123,5	121,5	119,5	121,5	1,2	1,0	1,6	0,8
123,5	118,0	115,5	119,0	2,4	2,0	3,8	1,5
123,5	115,0	112,0	116,8	3,4	3,0	5,7	2,1
124,0	115,0	108,0	115,7	4,6	4,0	7,2	3,3
124,5	111,5	105,0	113,7	5,7	5,0	9,5	3,8
123,0	111,0	100,0	111,3	6,6	6,0	10,5	5,0
122,0	111,0	95,5	109,5	7,7	7,0	11,4	6,3
123,0	109,0	93,0	108,3	8,7	8,0	13,5	7,0

Tabela A.4 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 3φ-OV.

V_a	V_b	V_c	V_1	V_2	VUF	$PVUR$	$LVUR$
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
130,5	132,5	135,0	132,7	1,3	1,0	1,8	0,8
130,5	132,5	139,5	134,2	2,7	2,0	4,0	1,4
130,5	132,5	143,6	135,5	4,1	3,0	6,0	1,9
130,5	132,5	148,0	137,0	5,5	4,0	8,0	2,4
130,5	132,5	152,0	138,3	6,9	5,0	9,9	2,8
130,5	132,5	156,8	139,9	8,5	6,0	12,1	3,4
130,5	132,5	161,0	141,3	9,8	7,0	13,9	3,9
130,5	132,5	165,8	142,9	11,4	8,0	16,0	4,4

Tabela A.5 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 2φ-OV, 1φ-UV.

V_a [V]	V_b [V]	V_c [V]	V_1 [V]	V_2 [V]	VUF [%]	$PVUR$ [%]	$LVUR$ [%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
128,5	130,0	125,5	128,0	1,3	1,0	1,6	1,0
131,0	130,0	123,0	128,0	2,5	2,0	2,3	1,9
133,5	130,0	120,5	128,0	3,9	3,0	4,3	2,9
135,6	130,0	118,4	128,0	5,1	4,0	5,9	3,7
138,0	130,0	116,2	128,1	6,4	5,0	7,8	4,6
140,5	130,0	114,0	128,2	7,7	6,0	9,6	5,5
142,5	130,0	111,5	128,0	9,00	7,0	11,3	6,4
144,5	130,0	109,4	128,0	10,2	8,0	12,9	7,1

Tabela A.6 – Tensões impostas no motor pela fonte de tensão para o desbalanceamento tipo 1φ-OV, 2φ-UV.

V_a [V]	V_b [V]	V_c [V]	V_1 [V]	V_2 [V]	VUF [%]	$PVUR$ [%]	$LVUR$ [%]
127,0	127,0	127,0	127,0	0,0	0,0	0,0	0,0
124,0	125,0	128,0	125,7	1,2	1,0	1,9	0,7
121,5	125,0	130,0	125,5	2,5	2,0	3,6	1,6
119,0	124,0	132,0	125,0	3,8	3,0	5,6	2,4
117,0	124,0	134,2	125,1	5,0	4,0	7,3	3,2
114,5	124,0	136,0	124,8	6,2	5,0	8,9	4,1
112,0	124,0	138,0	124,7	7,5	6,0	10,7	5,0
110,0	124,0	140,3	124,8	8,8	7,0	12,4	5,9
107,5	124,0	142,0	124,5	10,0	8,0	14,1	6,7

As tabelas subsequentes mostram os resultados dos ensaios realizados para determinar o rendimento do motor sob avaliação neste trabalho alimentado por tensões desbalanceadas.

Tabela A0.7 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1ϕ -OV.

<i>VUF</i> [%]	Potência ativa [W]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rpm]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
0,0	924,5	3,791	1.729,0	686,3	74,2
1,0	925,7	3,792	1.727,6	686,0	74,1
2,0	926,7	3,792	1.729,2	686,6	74,1
3,0	931,9	3,791	1.730,8	687,1	73,7
4,0	942,0	3,790	1.732,6	687,6	73,0
5,0	949,2	3,795	1.733,7	689,0	72,6
6,0	962,5	3,795	1.734,9	689,4	71,6
7,0	980,3	3,787	1.736,0	688,4	70,2
8,0	997,4	3,786	1.737,6	689,0	69,1

Tabela A.8 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1ϕ -OV, 1ϕ -UV.

<i>VUF</i> [%]	Potência ativa [W]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rpm]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
0,0	922,8	3,793	1.729,0	686,8	74,4
1,0	924,3	3,804	1.725,5	687,4	74,4
2,0	924,9	3,807	1.725,6	688,0	74,4
3,0	929,4	3,807	1.725,6	688,0	74,0
4,0	933,4	3,810	1.725,4	688,4	73,7
5,0	940,0	3,818	1.725,0	689,6	73,4
6,0	952,8	3,820	1.724,7	690,0	72,4
7,0	963,6	3,823	1.724,1	690,2	71,6
8,0	976,7	3,828	1.723,4	690,9	70,7

Tabela A0.9 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 3φ-UV.

<i>VUF</i> [%]	Potência ativa [W]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rpm]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
0,0	918,2	3,809	1.729,0	689,7	75,1
1,0	921,0	3,838	1.716,9	690,0	74,9
2,0	924,4	3,849	1.712,4	690,2	74,7
3,0	930,5	3,855	1.708,1	689,6	74,1
4,0	937,9	3,858	1.705,0	688,9	73,5
5,0	945,8	3,866	1.699,6	688,0	72,7
6,0	959,5	3,874	1.693,9	687,1	71,6
7,0	975,8	3,880	1.687,8	685,8	70,3
8,0	988,2	3,884	1.683,2	684,6	69,3

Tabela A.10 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 3φ-OV.

<i>VUF</i> [%]	Potência ativa [W]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rpm]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
0,0	920,5	3,825	1.729,0	692,5	75,2
1,0	924,1	3,824	1.732,8	693,9	75,1
2,0	927,0	3,821	1.734,6	694,1	74,9
3,0	932,6	3,821	1.736,0	694,6	74,5
4,0	943,3	3,818	1.737,5	694,7	73,6
5,0	953,9	3,818	1.738,7	695,1	72,9
6,0	975,4	3,815	1.739,9	695,1	71,3
7,0	985,2	3,807	1.741,0	694,0	70,4
8,0	1.007,1	3,807	1.741,9	694,4	68,9

Tabela A.11 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 2 ϕ -OV, 1 ϕ -UV.

<i>VUF</i> [%]	Potência ativa [W]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rpm]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
0,0	917,0	3,822	1.729,0	692,0	75,5
1,0	918,6	3,828	1.726,3	692,0	75,3
2,0	921,2	3,828	1.726,4	692,0	75,1
3,0	926,8	3,828	1.726,6	692,1	74,7
4,0	933,4	3,825	1.726,3	691,5	74,1
5,0	941,5	3,825	1.726,5	691,6	73,5
6,0	953,2	3,828	1.726,0	691,9	72,6
7,0	966,4	3,828	1.725,2	691,6	71,6
8,0	979,2	3,828	1.724,5	691,3	70,6

Tabela A.12 – Rendimento do motor avaliado para o desbalanceamento tipo 1 ϕ -OV, 2 ϕ -UV.

<i>VUF</i> [%]	Potência ativa [W]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rpm]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
0,0	915,7	3,814	1.729,0	684,3	74,7
1,0	916,8	3,826	1.723,3	684,0	74,6
2,0	918,6	3,828	1.723,2	684,4	74,5
3,0	923,5	3,831	1.722,3	684,5	74,1
4,0	929,2	3,831	1.722,4	684,6	73,7
5,0	936,6	3,831	1.721,7	684,3	73,1
6,0	946,3	3,832	1.721,2	684,1	72,3
7,0	957,1	3,834	1.720,8	684,4	71,5
8,0	968,8	3,834	1.719,9	684,0	70,6

